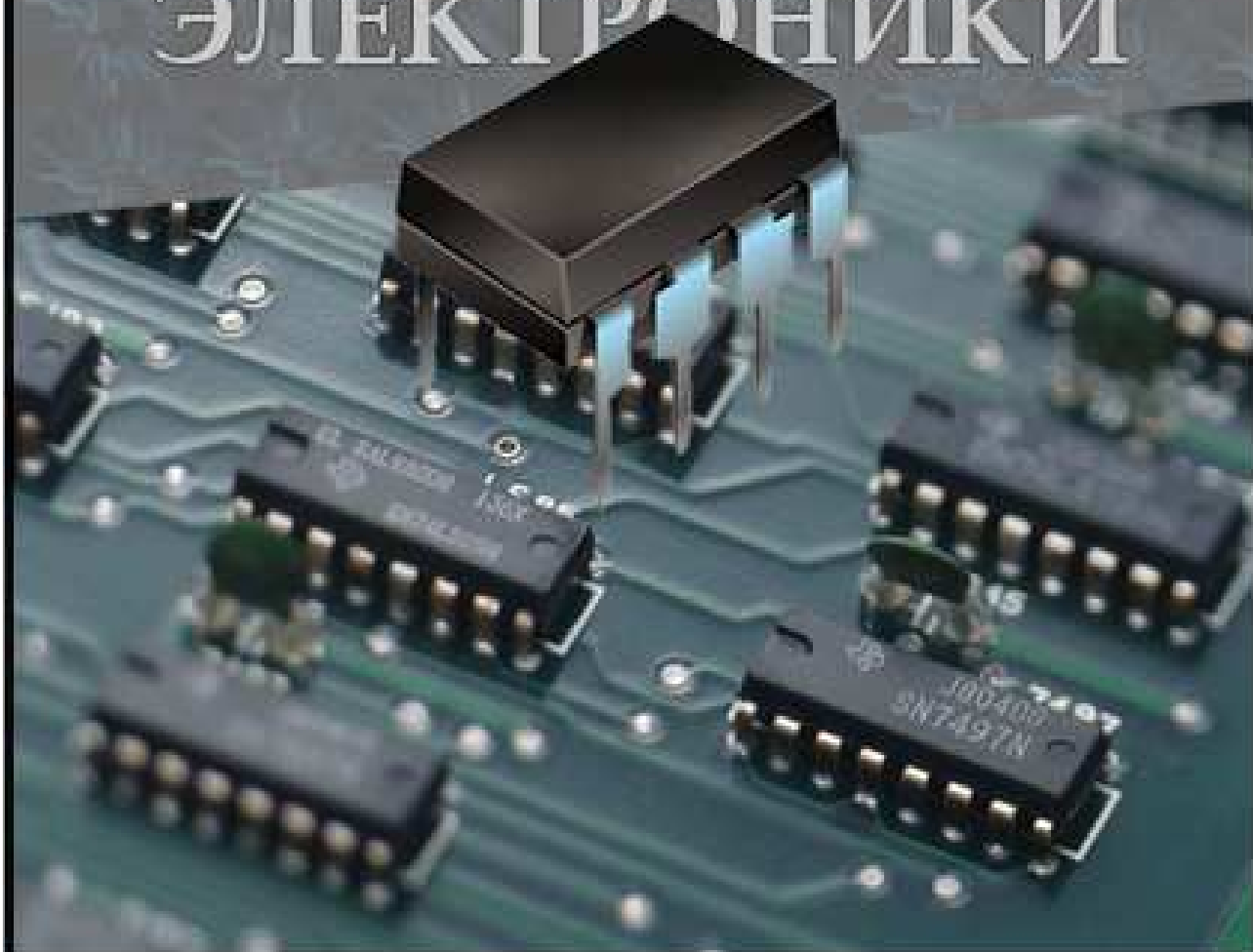


ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**

Филиал кафедры электронной техники и технологии на НПО «Интеграл»

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

для студентов специальностей:

“Проектирование и производство РЭС”,
“Электронно-оптические системы и технологии”

Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования по специальностям “Проектирование и производство РЭС”, “Электронно-оптические системы и технологии”

Минск
«Интегралполиграф»
2009

УДК 621.3.049.77
ББК 32.844.1 я 73
Т12

Р е ц е н з е н т ы:

чл-кор. НАН Беларуси, д. т. н., профессор Ф.П. Коршунов;
кафедра микро- и нанотехники БНТУ (зав. кафедрой чл-кор.
НАН Беларуси, д. т. н., профессор Ю.М. Плескачевский)

А в т о р ы:

Л.П. Ануфриев, С.В. Бордусов, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, А.Ф. Керенцев,
Н.С. Ковальчук, А. О. Коробко, В.Л. Ланин, А.А. Осипов, Л.Я. Портнов,
И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, В.А. Солодуха, В.В. Становский

Под редакцией академика НАН Беларуси А.П. Достанко и члена-
корреспондента НАН Беларуси Л.И. Гурского

Т 12 Технология интегральной электроники: учебное пособие по
дисциплине «Конструирование и технология изделий интегральной
электроники» для студентов специальностей “Проектирование и
производство РЭС”, ”Электронно-оптические системы и технологии” /
Л.П. Ануфриев, С.В. Бордусов, Л.И. Гурский [и др.]; / Под общ. ред.
А.П. Достанко и Л.И. Гурского. – Минск: «Интегралполиграф», 2009. – с.:
ил.

ISBN

Учебное пособие включает базовые технологические процессы и оборудование для
производства изделий интегральной электроники. Предназначено для закрепления и
углубления теоретических знаний, ознакомления с современными технологическими
процессами и автоматизированным технологическим оборудованием для изготовления
изделий интегральной электроники.

Для студентов специальностей “Проектирование и производство РЭС”,
”Электронно-оптические системы и технологии”.

УДК 621. 3.049.77
ББК 32.844.1 я 73

ISBN

© Коллектив авторов, 2009
© УП «Интегралполиграф», 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	13
1.1. Основные материалы изделий интегральной электроники.....	13
1.2. Фазовые диаграммы и твердые растворы	16
1.3. Основные двойные диаграммы состояния широко используемых материалов в изделиях интегральной электроники.....	38
1.4. Твердая растворимость	44
1.5. Диаграммы состояния тройных систем.....	47
1.6. Основные понятия и определения.....	51
1.7. Основные типы структур интегральных микросхем.....	63
1.8 Процесс изготовления биполярных ИМС.....	79
1.9 Процесс изготовления КМОП ИМС.....	88
1.10. Технологический маршрут изготовления мощных диодов Шоттки.....	96
1.11. Технологический маршрут изготовления мощных MOSFET-транзисторов.....	99
1.12. Технологический маршрут изготовления мощных тиристоров	104
Глава 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПОДЛОЖКИ, ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ, РАЗНОВИДНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ	110
2.1. Основные характеристики полупроводниковых подложек	110
2.2. Физико-химические особенности подготовки гладких поверхностей подложек.....	114
2.3. Разновидности загрязнений и их влияние на технологические характеристики полупроводниковых подложек, источники и механизмы загрязнения поверхности подложек.....	123
2.4. Процессы удаления загрязнений с поверхности твердых тел.....	125
2.5. Чистые производственные помещения	131
2.6. Контроль дефектности технологического процесса	137
Глава 3. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН В ЖИДКИХ СРЕДАХ.....	141
3.1. Классификация типов обработки поверхности	141
3.2. Кинетика процесса химического травления	142
3.3. Механизмы травления полупроводников	146
3.4. Особенности жидкостного травления полупроводников и полупроводниковых	

соединений	149
3.5. Особенности жидкостного травления функциональных слоёв	152
3.6. Электрохимическая обработка поверхности	156
3.7. Парогазовое травление.....	158
Глава 4. ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН	161
4.1. Классификация процессов ионно-плазменного травления	161
4.2. Механизмы процессов ионно-плазменного травления.....	164
4.3. Методы плазменного травления	168
4.4. Факторы, определяющие технологические параметры процесса плазменного травления.....	173
Глава 5. ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.....	176
5.1. Эпитаксиальные процессы	176
5.2. Кинетика и механизмы процессов эпитаксии.....	178
5.3. Автоэпитаксия кремния	182
5.4. Гетероэпитаксия кремния	190
5.5. Эпитаксия соединений типа A^3B^5 и твердых растворов на их основе	191
5.6. Дефекты эпитаксиальных слоев.....	201
Глава 6. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ И МЕТОДЫ ИХ НАНЕСЕНИЯ	203
6.1. Стабилизация и защита поверхности ИМС и полупроводниковых приборов.....	203
6.2. Процессы окисления и свойства диэлектрических слоев.....	206
6.3. Формирование тонких слоев методами химического осаждения из газовой фазы	214
6.4. Формирование тонких слоев низкотемпературным плазмохимическим осаждением из газовой фазы	220
6.5. Атомно-слоевое осаждение (ALD)	226
6.6. Пленки, получаемые центрифугованием из растворов из кремнийорганических соединений (НЦР – пленки)	228
Глава 7. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК.....	232
7.1. Термическое испарение материалов в вакууме	233
7.2. Краткая характеристика испарителей	241
7.3. Индукционные испарители.....	250
7.4. Электронно-лучевое испарение	256
7.5. Метод ионного распыления.....	257

7.6. Катодное распыление.....	261
7.7. Магнетронное распыление	264
7.8. Лазерно-плазменное распыление.....	269
7.9. Вакуумное оборудование для формирования пленок.....	272
7.10. Установки лазерного распыления.....	285
Глава 8. ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	289
8.1. Процессы в фоторезистах	289
8.2. Фотошаблоны.....	300
8.3. Методы литографии	304
8.4. Методы повышения качества формирования изображения.....	319
8.5. Метод самосовмещения	327
Глава 9. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ МЕТОДОМ ДИФФУЗИИ	330
9.1. Основы диффузионной технологии.....	330
9.2. Легирующие примеси и источники диффузии	330
9.3. Технология проведения процессов диффузии.....	333
9.4. Контроль параметров диффузионных слоев.....	337
9.5. Ионная имплантация	339
9.6. Геттерирование.....	341
9.7. Эффекты, используемые в технологии СБИС	342
9.8. Дефекты ионного легирования и способы их устранения	345
9.9. Отжиг легированных структур.....	348
9.10. Диффузия.....	351
9.11. Одномерное уравнение Фика	355
9.12. Постоянные коэффициенты диффузии	356
9.13. Механизмы диффузии в твердом теле.....	357
9.14. Диффузия из бесконечного источника.....	360
9.15. Диффузия из ограниченного источника.....	362
9.16. Концентрационно-зависимые коэффициенты диффузии.....	365
9.17. Атомные механизмы диффузии	365
9.18. Факторы, влияющие на процессы диффузии.....	367
9.19. Способы контроля процессов диффузии	369
Глава 10. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСОВ ДЛЯ КОРПУСИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	373
10.1. Типы интегральных микросхем	373

10.2. Корпуса ИМС и их конструкции	377
10.3. Требования к конструкции корпусов	386
10.4. Металлокерамические корпуса	387
10.5. Металлостеклянные корпуса	395
10.6. Пластмассовые корпуса	403
10.7. Корпуса чашечного типа.....	412
Глава 11. СБОРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	414
11.1. Разделение пластин на кристаллы	414
11.2. Монтаж кристаллов в корпусах эвтектическими припоями и клеями.....	429
11.3. Монтаж кристаллов в корпусах легкоплавкими припоями.....	434
11.4. Автоматизированный монтаж кристаллов в корпусах вибрационной пайкой	437
11.5. Контроль качества сборочных операций	440
Глава 12. МИКРОМОНТАЖ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	449
12.1. Проволочный микромонтаж изделий интегральной электроники	449
12.2. Процессы термокомпрессионной микросварки	451
12.3. Ультразвуковая и термозвуковая микросварка	453
12.4. Автоматическое оборудование и инструмент	460
12.5. Монтаж жесткими объемными выводами	470
12.6. Монтаж кристаллов на плате.....	479
Глава 13. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ	481
13.1. Герметизация корпусов сваркой	481
13.2. Герметизация корпусов пайкой	496
13.3. Герметизация пластмассами.....	500
13.4. Бескорпусная герметизация.....	510
13.5. Контроль герметичности изделий.....	511
13.6. Основные причины снижения влагостойчивости приборов.....	515
Глава 14. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	523
14.1. Качество и надежность приборов электронной техники.....	523
14.2. Конструктивно–технологические особенности ИС, влияющие на их надежность ...	528
14.3. Статистические методы управления качеством в производстве интегральных микросхем	543
14.4. Система контроля технологического процесса	556
ЛИТЕРАТУРА.....	569

Введение

В 1948 г. весь потенциал твёрдотельной электроники состоял из одного экспериментального образца транзистора, принцип функционирования которого не был полностью понятен даже его создателям. Через 10 лет твёрдотельные приборы начали широко использоваться вместо вакуумных ламп в радио технике и вычислительной технике, и через некоторое время явились основой создания объекта нового поколения, состоящего из организованного расположения диодов, транзисторов и пассивных электрокомпонентов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) на одном кристалле, который получил название интегральная микросхема, или на одной подложке при производстве гибридных микросхем. Способ создания этих новых твёрдотельных устройств получил название – микроэлектроника.

Современный кристалл интегральной микросхемы размером в несколько квадратных сантиметров и массой в несколько миллиграммов обладает значительно большей вычислительной производительностью, чем первые ЭВМ на вакуумных электронных лампах с массой в десятки тонн.

Микроэлектроника создает малогабаритные твёрдотельные приборы, способ организации электронных процессов в которых позволяет за очень короткие промежутки времени обрабатывать в малых объёмах твёрдого тела большие объёмы информации. Идеальной задачей микроэлектроники является создание твёрдотельных приборов, сочетающих совершенство организации мозга человека с быстродействием изделий интегральной электроники.

Современная технология производства изделий интегральной электроники основана на двух основополагающих принципах: последовательном формировании тонких слоёв или плёнок при определённых режимах и создании топологических рисунков с помощью процессов литографии.

Основная тенденция развития и совершенствования изделий интегральной электроники, устойчиво сохраняющаяся уже почти 60 лет – постоянное увеличение в несколько раз из года в год степени интеграции. Перспективность этой тенденции обусловлена тем, что при отлаженном производстве стоимость изделий практически не зависит от их сложности и определяется в основном производительностью оборудования. Повышение степени интеграции реализуется как за счет уменьшения размеров элементов и компонентов, так и за счет увеличения размера кристалла микросхемы. Оба эти способа успешно реализуются на практике.

Кремний на протяжении 60 лет был основным материалом, раскрывшим потенциал твёрдотельной интегральной электроники, и он, на настоящее время, остаётся практически единственным материалом, являющимся

основой планарной технологии, несмотря на многообразие созданных новых материалов с полупроводниковыми свойствами.

Среди полупроводников у кремния есть единственный серьёзный соперник – арсенид галлия. Обладая более высокой подвижностью носителей, GaAs позволяет достичь в 5 раз более высоких пределов быстродействия. Арсенид галлия открывает путь к эффективной внутрисхемной изоляции, и как следствие – к более низкой мощности рассеяния, чем у кремния. Кремний не позволяет реализовать излучающие диоды с высокой эффективностью излучения, он обеспечивает фотоприёмными системами весь видимый и близкий ИК–диапазоны.

Наконец, существует ещё два сильных фактора: доступность материала и его безвредность для человека. Кремний полностью удовлетворяет обоим критериям. Приведём данные распространённости в земной коре наиболее часто используемых материалов микроэлектроники: Si – 26,0%, Al – 7,45%, C – 0,35%, P – 0,12%, Gd – $7,5 \cdot 10^{-4}$ %, As – $5 \cdot 10^{-4}$ %, Ge – $4 \cdot 10^{-4}$ %, Ga – $1 \cdot 10^{-4}$ %.

Итак, сегодня монокристаллический кремний – основа активных элементов изделий интегральной электроники, поликристаллический кремний – основа токоведущих дорожек (межсоединений) и резистивных слоев, диоксид и нитрид кремния – хорошие диэлектрики, а также материалы для оптических волноводов в изделиях опто– и квантовой электроники. Кремний используется для чувствительных датчиков разного функционального назначения.

Кремний и углерод находятся в 4 группе Периодической системы химических элементов. Углерод служит основой жизни биосистем, а кремний основой “жизни” кристаллических информационных систем. Таким образом мыслящие C–системы дополняют себя быстродействующими Si–системами.

Роль микроэлектроники в современной науке и технике трудно переоценить. Она справедливо считается катализатором научно–технического прогресса. Спектр ее задач простирается от фундаментальных исследований до прикладного использования. Микроэлектроника влияет на все народное хозяйство, но не непосредственно, а через целый ряд специфических отраслей, таких как вычислительная техника, информационно–измерительные системы, робототехника, микропроцессоры. Микроэлектроника, очередной исторически обусловленный этап развития электроники и одно из ее основных направлений, обеспечивает принципиально новые пути решения назревших задач.

Первым стартовым шагом к микроэлектронике, несомненно, был переход от электронных вакуумных ламп, в которых применялся принцип управления электронными потоками в вакууме, к твердотельным приборам, где использовалось управление движением подвижных носителей в полупроводнике. Этот шаг был сделан в лаборатории Bell Telephone Laboratories в 1948 г. и заключался в изобретении транзистора.

Первые транзисторы были точечными и, в дополнение к указанным выше недостаткам, обладали высоким уровнем шумов. Материалом для их изготовления был германий. Переход от точечных транзисторов к

плоскостным по времени совпал с переходом от германия к кремнию и был осуществлен в 1953 г. на фирме Texas Instrument Incorporation. Кремниевый транзистор с диффузионными p–n–переходами позволил увеличить мощность транзистора. Позднее процесс изготовления транзистора, основанный на диффузии, позволил наладить групповое производство транзисторов, что немедленно сказалось на уменьшении стоимости этих приборов. В 1956г. трем американским ученым, Шокли, Бардину и Браттейну, была присуждена Нобелевская премия по физике за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта. К этому времени уже стало ясно, что во многих отраслях применение транзисторов сильно потеснит или даже заменит электронную лампу.

Второй, решающий шаг – появление интегральных микросхем. Миниатюризация и повышение надежности транзисторных устройств явились большим шагом вперед на пути совершенствования изделия электронной техники. Но вот в 1959 г. Дж. Килби и Р. Ноис независимо друг от друга подали заявки на изобретения, согласно которым на одном кристалле кремния строилась целая электронная микросхема. Первая интегральная (биполярная) микросхема была изготовлена в 1961 г. на фирме Fairchild Semiconductor и представляла собой триггер, состоящий из четырех биполярных транзисторов и двух резисторов. Уже в 1963 г. фирмой RCA была выпущена первая МОП интегральная логическая микросхема, в которой было 16 МОП–транзисторов. Быстрому распространению интегральных микросхем способствовала хорошо отработанная технологическая база при групповом производстве транзисторов.

Таким образом, создание интегральных микросхем привело не только к техническому развитию электронных устройств в направлении их миниатюризации и уменьшения веса, но и явилось началом тех больших социальных изменений, которые обусловлены современной революцией в микроэлектронике. Так, появление электронных наручных часов произвело переворот в структуре часовой промышленности. Наручные часы из продукции точного машиностроения перешли в сферу изделий электронной промышленности. Предприятия, которые в недалеком прошлом полностью занимались производством механических наручных часов, изменили структуру производства в пользу электронных часов.

Аналогичным образом исчезли бытовые механические арифмометры, отошли на задний план такие простейшие вычислительные устройства как счеты и логарифмические линейки. Бытовые вычислительные устройства приобрели способность вычисления функций, программирования вычислений, памяти, что побудило называть их скорее не калькуляторами, а электронно–вычислительными машинами (ЭВМ). Благодаря появлению портативных бытовых ЭВМ мы перестали пользоваться таблицами элементарных функций, такими, как таблицы квадратных корней, логарифмов, тригонометрических функций. Таким образом, микроэлектроника в определенном смысле способствует и изменению нашего культурного уровня.

Сильное влияние оказали ИМС на большие ЭВМ и промышленную электронную аппаратуру. На начальном этапе, когда технология сборки и

изготовления ИМС была еще несовершенной, интеграция не приводила к значительному улучшению характеристик изделий, изготовленных по этой технологии. Например, быстродействие ИМС уменьшилось в результате интеграции. Однако по мере повышения быстродействия ИМС длительность задержки сигнала во многих случаях стала определяться не столько самими изделиями, сколько их монтажом. Время задержки в монтажных проводах или межсоединениях складывается из времени распространения по ним со скоростью света электрического сигнала и времени на заряд и разряд паразитных емкостей проводов, достигающих существенных значений. Вторая составляющая оказывает наибольшее воздействие на время задержки сигнала в электронной схеме. Таким образом, для повышения быстродействия ИМС необходима их миниатюризация и интеграция. Этот факт в корне изменил отношение к ИМС и способствовал совершенствованию технологии их изготовления.

Основные усилия разработчиков ИМС направлены на усовершенствование уже сложившихся принципов создания ИМС, на улучшение их электрических и эксплуатационных характеристик. Работы ведутся, главным образом, в направлении повышения быстродействия микросхем (уменьшения энергии, расходуемой внешним источником на одно переключение логического устройства) и их степени интеграции. Решение этих проблем связывают с усовершенствованием технологии получения микроэлектронных структур минимально возможных размеров.

Современная микроэлектроника получила необычайно быстрое развитие благодаря разработке и широкому при-менению сверхбольших интегральных схем (так называемых СБИС). Электронные изделия, выполненные на СБИС, обладают широкими функциональными возможностями, имеют крайне малые габариты, высокую надежность и низкую стоимость.

Дальнейшее развитие микроэлектроники связано с принципиально новым подходом, позволяющим реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, используя различные физические эффекты в твердом теле. Функциональная электроника охватывает вопросы получения континуальных (непрерывных) комбинированных сред с заданными свойствами и создания различных электронных устройств методом физической интеграции, т. е. использования таких физических принципов и явлений, реализация которых позволяет получить компоненты со сложным схемотехническим или системотехническим функциональным назначением (в отличие от технологической интеграции – конструирования ИМС на основе функционально простых элементов типа транзисторов, диодов, резисторов и т.д.).

Такое направление получило название "функциональная микроэлектроника". Используются оптические явления (оптоэлектроника), взаимодействие электронов с акустическими волнами в твердом теле (акустоэлектроника), эффекты в новых магнитных материалах (магнетоэлектроника), электрические неоднородности в однородных полупроводниках, явление холодной эмиссии в пленочных структурах,

явления живой природы на молекулярном уровне (бионика, биоэлектроника, нейристорная электроника) и др.

Глава 1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

1.1. Основные материалы изделий интегральной электроники

За сравнительно короткий исторический отрезок времени (первый транзистор был изготовлен в 1948 году, первая интегральная микросхема – в 1958 году) твердотельная интегральная электроника стала ведущим направлением, определяющим прогресс в развитии радиоэлектронных средств и устройств вычислительной техники.

Интегральная электроника (микроэлектроника) – это новое научно-техническое направление твердотельной электроники, которое посредством технологических (физических, химических и схмотехнических) методов и приёмов решает проблему создания высоконадёжных микроминиатюрных электронных устройств.

В качестве основных конструкционных материалов в интегральной электронике используются полупроводники, металлы и диэлектрики. Исторически различия между металлами, полупроводниками и диэлектриками связывалось с особенностями электропроводности этих тел. К металлам относили вещества, имеющие удельную проводимость, измеряемую величинами порядка 10^4 (Ом·см)⁻¹. Вещества, имеющие удельную проводимость в пределах 10^{-7} (Ом·см)⁻¹ и меньшую, относили к диэлектрикам. Все материалы, которые имели удельную проводимость в пределах $10^4 \div 10^{-7}$ (Ом·см)⁻¹, считались полупроводниками. С физической точки зрения такое определение не является достаточно точным. Например, с помощью введения примесей можно увеличить электропроводимость полупроводников на несколько порядков, сделав её по величине соизмеримой с проводимостью металлов, но при этом они не станут металлами. От металлов полупроводники отличаются не величиной, а характером зависимости удельной электрической проводимости, прежде всего, от температуры. В природе существует два типа полупроводниковых веществ: ионные полупроводники и электронные полупроводники. При производстве изделий интегральной электроники, в основном, используются электронные полупроводники.

Сегодня ионные полупроводники не получили широкого распространения в технике, так как при прохождении через них электрического тока имеет место перенос массы и изменяется их состав, структура и форма.

К электронным полупроводникам относится огромное количество самых различных веществ. Так как в этих веществах ток переносится электронами, то при прохождении не происходит переноса вещества и приборы могут эксплуатироваться длительное время. К числу этих полупроводников относятся 13 простых веществ: бор В, углерод С, кремний Si, фосфор Р, сера S, германий Ge, мышьяк As, серое олово Sn, сурьма Sb, висмут Bi, селен Se, теллур Те, йод J. К ним относятся и ряд бинарных соединений типа $A^X B^{VIII-X}$, где А – элемент группы X, а В – элемент группы VIII-X (рис. 1.1). Такие соединения как AgCl, CuBr, KBr, LiF и др. типа $A^I B^{VII}$ ещё не нашли широкого применения.

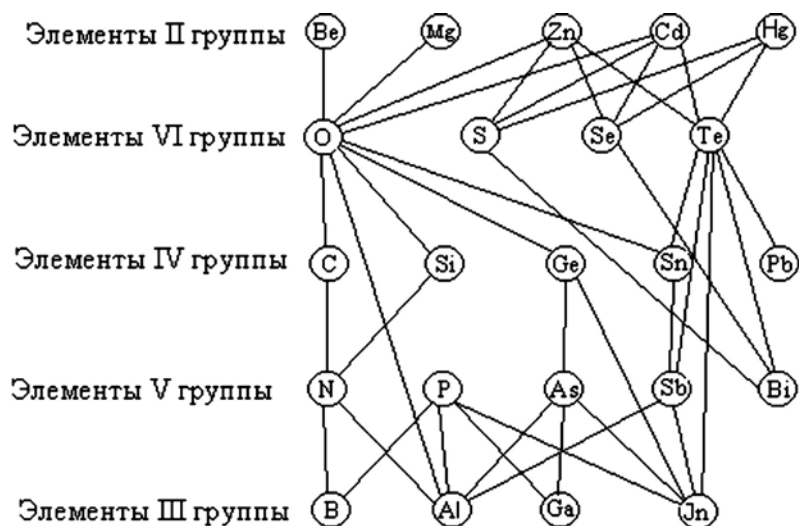


Рис. 1.1. Схема образования двухкомпонентных полупроводников

В настоящее время используются соединения типа $A^{II} B^{VI}$, среди которых в первую очередь CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnO, ZnSe, HgTe, HgSe. Их свойства сейчас достаточно хорошо изучены.

Наряду с сульфатами, теллуридами и селенидами очень перспективными материалами являются антимониды, арсениды, фосфиды, нитриды алюминия, галлия, индия, бора, относящиеся к типу $A^{III} B^V$. Эти элементы уже сегодня являются одними из важнейших полупроводниковых материалов. Полупроводниковыми свойствами обладают SiC и SiGe, относящиеся к типу $A^{IV} B^{IV}$. Полупроводниковые свойства обнаружены у соединений типа $A^{IV} B^{VI}$, среди которых PbS, PbSe, PbTe, а также соединений типа $A^I B^{VI}$, среди которых CuS, CuO, Cu₂O и др.

Перспективными представляются сложные соединения и твердые растворы, среди которых $A^X B_1^{VIII-X} B_2^{VIII-X}$; $A_1^X A_2^X B^{VIII-X}$; $A_1^X A_2^X B_1^{VIII-X} B_2^{VIII-X}$, например, GaAsP, InGaSb, ZnCdSeTe. Кроме этих соединений полупроводниковыми свойствами обладает большое количество более сложных соединений. Наряду с неорганическими материалами к полупроводникам относятся и органические материалы, такие как антрацен, фталоцианин, коронен и целый ряд других, которые находят использование в изделиях наноэлектроники.

В науке и технике ведётся целенаправленный поиск материалов, обладающих новыми свойствами. В последние годы учёными интенсивно изучались структура и свойства таких материалов как серое олово, теллурид

ртути, сплав висмута с сурьмой. Наиболее интересные свойства серого олова и теллурида ртути – это отсутствие запрещенной зоны. Эти материалы относят к бесщелевым полупроводникам. Запрещенная зона в них отсутствует при любых воздействиях, не меняющих симметрию кристаллической решетки: нагрев и охлаждение в определенном температурном интервале, всестороннее сжатие, введение примесей. Сплавы висмута с сурьмой, наоборот, приобретают новые свойства при различных внешних воздействиях. Так, например, под действием всестороннего сжатия, магнитного поля, при изменении стехиометрического состава этот материал может перейти в состояние, не имеющее запрещенной зоны. В некоторых сплавах системы висмут-сурьма под действием мощного магнитного поля образуются экситонные фазы, которые представляют собой электроны и дырки, объединенные в устойчивые комплексы, напоминающие атомы водорода и обладающие исключительно интересными свойствами. Эти свойства сейчас интенсивно изучаются с целью практического использования.

1.2. Фазовые диаграммы и твердые растворы

Геометрическое изображение равновесных состояний термодинамической системы при различных значениях параметров (температуры T , давления P , концентрации компонентов x_i , мольного объема V и др.) называется диаграммой состояния. Диаграмма состояния даёт информацию о фазовом составе системы в зависимости от параметров.

Равновесные состояния физически однородной системы и совершаемые ею равновесные процессы можно изображать графически соответственно точками и кривыми на плоскости с прямоугольными декартовыми координатами, вдоль осей которых откладываются параметры состояния системы, или однозначно связанные с ними функции состояния. Наиболее распространённые диаграммы $x_i - T$, где i – конкретный компонент (для двойных диаграмм A и B , для тройных A, B, C и т. д.), $V - P$, $S - T$, $S - H$ (первый символ – ось абсцисс, второй – ось ординат).

Фазовые диаграммы состояний являются неотъемлемой частью любого анализа свойств материалов в тех случаях, когда речь идет о взаимодействии различных материалов. Особенно фазовые диаграммы состояния важны в интегральной электронике, т.к. для изготовления функциональных слоев на кристаллах микросхем, монтаже кристаллов в корпуса, присоединении выводов приходится использовать большой набор различных материалов. Учитывая тот факт, что в производстве изделий интегральной электроники в тесном контакте с различными металлами находится кремний, особое внимание необходимо уделять фазовым диаграммам, в которых в качестве одного из компонентов фигурирует именно кремний.

Однако прежде, чем приступить к рассмотрению фазовых диаграмм состояния рассмотрим отдельные положения термодинамики.

1.2.1. Функции состояний.

Функцией состояния называется такая физическая характеристика системы, изменение которой при переходе

системы из одного состояния в другое не зависит от вида термодинамического процесса, соответствующего этому переходу, а полностью определяется значениями параметров начального и конечного состояний.

Приведем важнейшие функции состояний:

Внутренняя энергия E . Внутренней энергией E называется энергия системы, зависящая только от её термодинамического состояния $E = W - (W_k + W_{II})$, Здесь W – полная энергия системы; W_k – кинетическая энергия макроскопического движения системы; W_{II} – потенциальная энергия, связанная с действием на систему внешних силовых полей.

Первый закон термодинамики выражается соотношением: $Q = \Delta E + A$, здесь Q – количество теплоты, сообщенное системе, расходуемое на изменение её внутренней энергии ΔE и на совершение системой работы A против внешних сил.

Второй закон термодинамики формулируется следующим образом: а) невозможен процесс, единственным результатом которого является совершение работы A , эквивалентной количеству теплоты Q , полученной от нагревателя; или б) невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты Q от холодного тела к горячему.

Энтропия S . Энтропией называется функция S состояния системы, дифференциал которой в элементарном обратимом процессе равен отношению бесконечно малого количества теплоты, сообщённого системе, к абсолютной температуре системы: $dS = \delta Q/T$. Для изолированной системы, находящейся в равновесии, энтропия S должна быть минимальной $S_{min} = Q/T$. Для неизолированной системы при постоянной температуре (изотермический процесс) $\Delta S \geq Q/T$.

Напомним, что свободная энергия Гельмгольца (F): $F = E - TS$; F – свободная энергия Гельмгольца, или изохорно-изотермический потенциал.

Свободная энергия Гиббса (G): $G = F + PV = E - TS$; G – свободная энергия Гиббса, или изобарно-изотермический потенциал.

Энтальпия H (теплосодержание, тепловая функция) – это функция состояния термодинамической системы, равная сумме её внутренней энергии и произведения давления на объём системы: $H = E + PV$.

Изобарно-изотермический потенциал или свободную энергию Гиббса G можно представить с использованием энтальпии H : $G = F + PV = E - TS = H - TS$.

1.2.2. Однофазовая диаграмма состояния (диаграмма равновесия, фазовая диаграмма). Любая термодинамическая система может в зависимости от условий находиться в 4-х агрегатных состояниях или фазах: газ, плазма, жидкость, твёрдое тело. В термодинамике обычно плазму не выделяют в отдельное агрегатное состояние, ее относят к газообразному состоянию и рассматривают три основные агрегатные состояния – газообразное, жидкое и твердое. Однофазовые диаграммы состояний – это графики, на которых в зависимости от давления, объема и температуры изображают фазовые состояния только одного материала. Обычно не

принято рисовать трехмерный график на двухмерной плоскости. Такой график изображают в виде его проекции на плоскость температура–давление. Пример однофазной диаграммы состояний приведен на рис. 1.2. На диаграмме четко разграничены области, в которых материал может существовать только в одном агрегатном (фазовом) состоянии – как твердое тело, жидкость или газ. Вдоль разграничительных линий вещество может иметь два агрегатных состояния (две фазы), находящихся в равновесии друг с другом. Возможна любая из комбинаций агрегатных состояний: твердое тело–жидкость, твердое тело–газ, жидкость–газ.

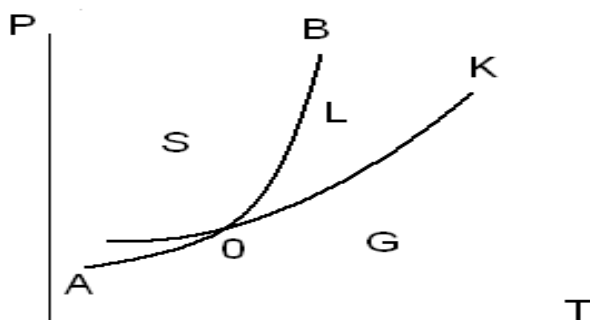


Рис. 1.2. Однофазная диаграмма состояний(диаграмма равновесия, фазовая диаграмма)

В точке пересечения линий диаграммы, так называемой тройной точке (точка *O* на рисунке), могут одновременно существовать все три фазы. Причем это возможно при одной-единственной температуре, поэтому тройная точка служит хорошей точкой отсчета температур. Обычно в качестве одной из точек отсчета выступает тройная точка воды (например, в прецизионных измерениях с использованием термопар, где спай термопары контактирует с системой лед – вода – пар).

O – равновесие трёх фаз, тройная точка; *OK* – кривая испарения; *OB* – кривая плавления; *A*, *K*, *B* – критические точки, в точке *K* исчезает различие агрегатных состояний газ – жидкость (*G* – *L*); в точке *B* – агрегатных состояний жидкость – твердое тело (*L* – *S*); в точке *A* – агрегатных состояний твердое тело – газ (*S* – *G*)

Полиморфные превращения, например, алмаз – графит усложняют фазовую диаграмму. Еще более сложная фазовая диаграмма у диоксида кремния SiO_2 , у которого может быть 11 полиморфных превращений в температурном интервале, в котором происходит синтез изделий интегральной электроники. Необходимо отметить, что при полиморфных превращениях изменяется не только тип кристаллической решётки, но и мольный объём *V*. Особенности этих процессов будут рассмотрены в следующем разделе.

1.2.3. Фазовые переходы. Фазовые переходы – это переходы из одного фазового состояния в другое при изменении параметров системы. Полиморфные превращения также относятся к фазовым переходам. Общая классификация фазовых переходов, была предложена в 1933 г. Эренфестом.

Согласно этой классификации фазовые переходы подразделяются на переходы (превращения) первого и второго родов.

Фазовые переходы первого рода (испарение, конденсация, плавление, кристаллизация, переходы из одной кристаллической модификации в другую рис.1.3.

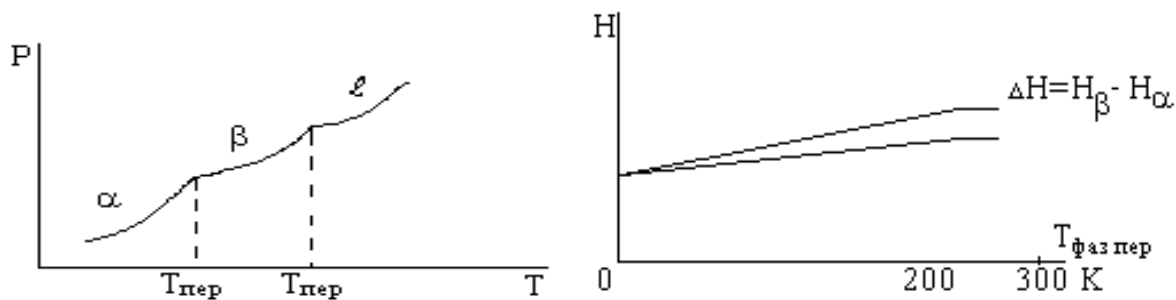


Рис. 1.3. Фазовые переходы первого рода в координатах: давление – температура ($P-T$) и энтальпия – температура ($H-T$)

Напомним, что кристаллическое состояние вещества классифицируется по семи сингониям (триклинная, моноклинная, ромбическая, тетрагональная, тригональная или ромбоэдрическая, гексагональная, кубическая) при этом расположение атомов в этих сингониях характеризуется 14 типами решеток (решетки Браве). Степень упаковки атомов в этих семи сингониях и 14 решетках различна, различны и объемы f , занимаемые атомами, в этих сингониях и решетках. Например, для простой кубической решетки занимаемый атомами объем f составляет $f = 0,52$; объемноцентрированной кубической – $f = 0,68$; гранецентрированной кубической – $f = 0,74$; гексагональной с плотной упаковкой – $f = 0,74$.

Из этих данных следует очень важный вывод, при фазовых переходах (превращениях с изменением типа кристаллической решетки) происходит изменение объема и следовательно физико-химических свойств материалов. Изменения объема при фазовых переходах приводят к возникновению остаточных напряжений в материале, что служит причиной нежелательных деформаций, приводящих к короблению материала, а в отдельных случаях и к его разрушению.

Термодинамический (химический) потенциал μ – функция состояния, определяющая изменение термодинамических потенциалов при изменении числа частиц в системе. Другими словами μ – есть функция, которая определяет направление и предел самопроизвольного перехода компонента из одной фазы в другую при соответствующих превращениях и условиях, определяемых параметрами T, P, V, S, x_i .

Термодинамические потенциалы связаны с друг другом соотношением:

$$\mu^{\text{моль}} = M\mu^{\gamma_0}, \quad (1.1)$$

где μ^{γ_0} – количество вещества в граммах; $\mu^{\text{моль}}$ – количества вещества в молях; M – молекулярный вес соответствующего вещества.

Для теории твердых растворов, которые широко используются при создании изделий интегральной электроники, особенно изделий опто- и квантовой электроники огромное значение имеет развитый Гиббсом метод термодинамических или химических потенциалов. Химическое равновесие

можно определить с помощью метода термодинамических или химических потенциалов.

Термодинамический (химический) потенциал μ характеризуется энергией, приходящейся на 1 атом:

$$\mu = G / N_o, \quad (1.2)$$

где G – энергия Гиббса; N_o – число Авогадро, $N_o = 6,0222 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

При переходах первого рода в точке перехода сосуществует две фазы: например, α и β , рис.1.3. Переход осуществляется при определенной температуре $T_{пер.}$. При переходе изменяются скачком первые производные термодинамического потенциала μ по температуре и давлению: энтальпия, энтропия, объем, а следовательно и плотность.

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = -S; \quad \frac{\partial \mu}{\partial p} = V, \quad (1.3)$$

здесь S – энтропия, V – объем.

Так как термодинамический потенциал μ при фазовых переходах первого рода меняется скачкообразно и определяется выражением:

$$\mu = E - TS + PV, \quad (1.4)$$

то и энергия E также должна изменяться скачком. При этом разность значений термодинамических потенциалов для первой и второй фаз определяется выражением:

$$\mu_1 - \mu_2 = (E_1 - E_2) - T(S_1 - S_2) + P(V_2 - V_1) = (H_2 - H_1) - T(S_2 - S_1), \quad (1.5)$$

а теплота перехода выражением

$$Q = H_2 - H_1 = T(S_2 - S_1). \quad (1.6)$$

Она равна произведению температуры на разность энтропии фаз, т.е. имеет место скачкообразное изменение или поглощение теплоты.

Функция $\mu_1(P, T)$ и $\mu_2(P, T)$ характеризует особенности изменения термодинамического потенциала вблизи точки фазового перехода, при этом с обеих сторон точки фазового перехода имеются минимумы термодинамического потенциала. Этой особенностью объясняется возможность перегрева или переохлаждения фаз в случае фазовых переходов первого рода в системе.

Определим взаимосвязи между скачками термодинамических функций ΔS и ΔV при фазовых переходах. После дифференцирования по температуре соотношения $\mu_1(P, T) = \mu_2(P, T)$ с учетом выражения для S , V и Q получим:

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{S_1 - S_2}{V_1 - V_2} = \frac{Q}{T(V_2 - V_1)}. \quad (1.7)$$

Эта известная формула Клайперона-Клаузиуса. Она позволяет определить изменение давлений, находящихся в равновесии фаз при изменении температуры либо изменения температуры перехода между двумя фазами при изменении давления. Скачкообразное изменение объема приводит к отсутствию определенной связи между структурой и системой фаз,

преобразующихся при фазовом переходе первого рода, которые при переходе изменяются скачком.

Типичными для фазовых переходов первого рода являются переходы между агрегатными состояниями вещества, полиморфными (аллотропическими) превращениями, а также многие фазовые превращения в многокомпонентных материалах.

Принципиальное отличие фазовых переходов второго рода от фазовых переходов первого рода заключается в следующем: переходы второго рода характеризуются как непрерывностью изменения термодинамического потенциала μ , так и непрерывностью изменения его производных. При переходах второго рода первые производные свободной энергии: энтальпия, энтропия, объем, плотность изменяются монотонно, рис. 1.4.

Обе кривые на рис. 1.4 характеризуют монотонное убывание μ с температурой, определяя значение энтропии фаз S_α и S_β :

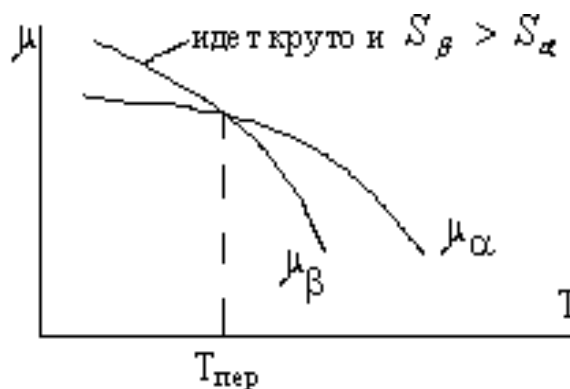


Рис. 1.4. Изменение химических потенциалов μ_α и μ_β при фазовом переходе второго рода

$$-S_\beta = \frac{\partial \mu_\beta}{\partial T} \text{ и } -S_\alpha = \frac{\partial \mu_\alpha}{\partial T}. \quad (1.8)$$

при этом значения μ_β при изменении температуры убывают быстрее, чем значения μ_α , а в точке перехода $T_{\text{пер}}$: $\mu_\alpha(P, T) = \mu_\beta(P, T)$

1.2.4. Типы диаграмм состояния двойных систем. Прежде, чем перейти к рассмотрению диаграмм состояния приведем некоторые определения. В термодинамике фаза, не путать с радиотехникой, — это совокупность частей системы, тождественных по химическому составу и термодинамическим свойствам; эти части системы находятся между собой в термодинамическом равновесии.

Гомогенная система однофазна, в ней отсутствуют внутренние границы раздела. Гетерогенная система содержит как минимум две фазы. Вода в тройной точке содержит три фазы: лед, жидкость, пар, рис.1.2. Фазы отделены друг от друга поверхностями раздела. Вещество может существовать в виде различных фаз (например, агрегатных состояний, полиморфных модификаций т. д.).

В общем виде правило фаз определяется соотношением Гиббса в виде:

$$f + v = k + n, \quad (1.8)$$

где φ – число фаз; ν – число степеней свободы, т.е. число независимых способов, которыми можно изменить состояние системы, при изменении параметров системы; k – число компонентов в системе, в качестве компонентов системы могут выступать не только химические элементы, но и различные химические соединения; n – число параметров, определяющих равновесие.

Иногда используется для определения ν термин вариантность системы. Обычно состояние системы определяется двумя параметрами T и P . В этом случае правило фаз определяется следующим соотношением:

$$\varphi + \nu = k + 2, \quad (1.9)$$

при $\varphi - k = 2$, $\nu = 0$ и систему называют невариантной или инвариантной; при $\varphi - k = 1$, $\nu = 1$ и систему называют моновариантной; при $\varphi - k = 0$, $\nu = 2$ и систему называют дивариантной и т.д.

Многие вещества при постоянном давлении имеют конкретную температуру плавления. При этом жидкая и твердая фазы таких веществ в определенном температурном интервале находятся в равновесии, т.е. в этом температурном интервале система является двухфазной.

Для двойных сплавов (A , B), например, таких как приведенные на рис.1.1 свободная энергия на 1 моль фазы при постоянном давлении $P = const$, полностью определяется температурой системы T и свойствами ее компонентов A и B .

Зависимость молярной свободной энергии от состава можно изобразить графически, рис. 1.5. Значения свободной энергии сплава AB составов $N_B(1)$ и $N_B(3)$ лежат на пунктирной линии $S-L$, зависимости свободной энергии Гиббса и или Гельмгольца $G(F)$ от концентрации компонента B , N_B , рис. 1.5(б).

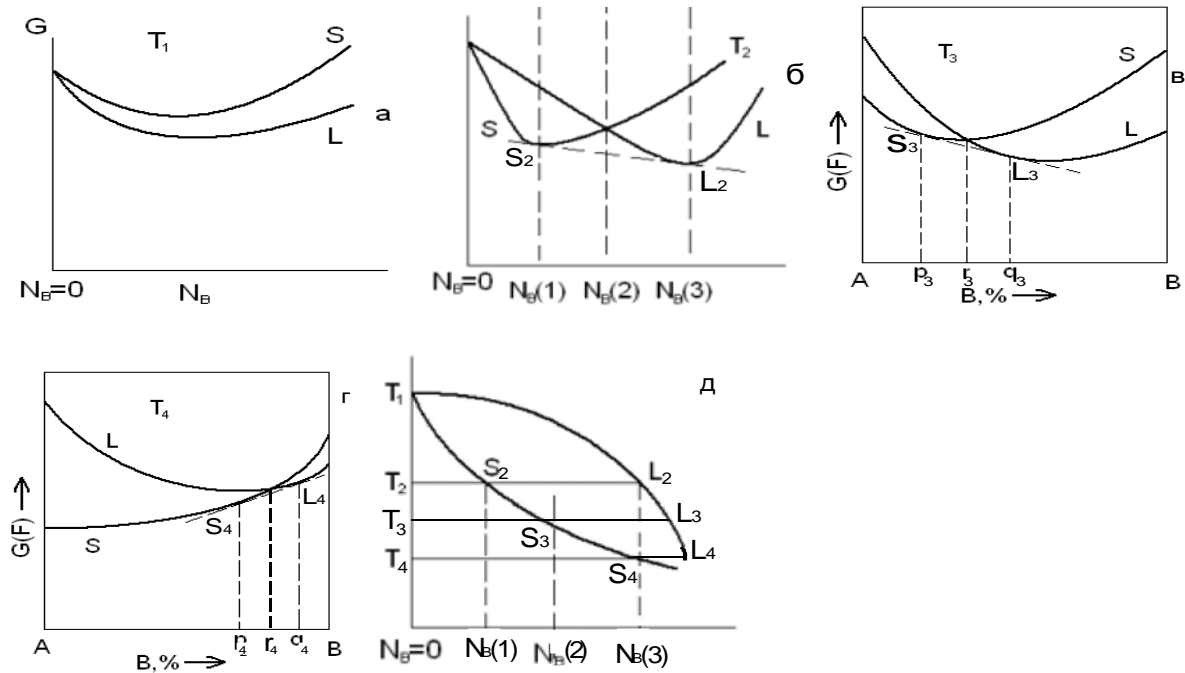


Рис 1.5. Зависимость молярной свободной энергии жидкой и твердой фаз от атомных долей компонента B $N_{B(1)}$, $N_{B(2)}$, $N_{B(3)}$ для температур T_1 (а), T_2 (б), T_3 (в), T_4 (г), и построенная на таком принципе двойная диаграмма (д)

Для жидкой фазы значение свободной энергии выше, чем для твердой фазы при температуре T , при которой система находится в двухфазном состоянии независимо от концентраций N_A и N_B компонентов A , B . Если система состоит из твердой и жидкой фазы в точке с концентрацией компонентов $N_A(2)$ и $N_B(2)$ свободная энергия системы может быть понижена превращением системы в твердую фазу состава $N_B(1)$ при понижении температуры или жидкую фазу состава $N_B(3)$ при повышении температуры, рис. 1.5 (б).

Для жидкой фазы сплава AB ниже температур плавления соответственно компонентов A и B при одинаковом соотношении компонентов значение свободной энергии выше, чем для твердой фазы при всех температурах. На рис.1.5(а) приведены значения свободной энергии $G(F)$ при температуре плавления компонента A $G(F)_A$ и их зависимости при увеличении концентрации N_B компонента B .

Двойная диаграмма состояния рис.1.5(д) показывает, что при температуре выше T_1 сплавы всех составов будут представлять собой равновесную жидкую фазу, обозначаемую буквой L . Сплав $N_B(3)$ при температуре T_2 находится только в жидком состоянии, при T_3 – только в твердом состоянии. В промежутке от T_2 до T_3 сплав AB с концентрацией $N_B(2)$ будет находиться в обоих состояниях (фазах): жидкость + твердое тело.

Большинство веществ и химических элементов при постоянном давлении имеют определенную температуру плавления, рис.1.5(а). В точке плавления конкретного вещества (химического элемента, на рисунке компонента A) значения свободной энергии $G(F)_A$ для твердой и жидкой фаз одинаковы. Концентрация компонента A (рис. 1.5) в точке A – 100%, $N_A = 100\%$, а концентрация компонента B , $N_B = 0\%$, концентрация компонента B в точке B – 100%, $N_B = 100\%$, а концентрация компонента A , $N_A = 0\%$. При этом в зависимости от концентраций элементов A и B в сплаве AB с концентрациями по мере увеличения компонента B : $N_{B(1)}$, $N_{B(2)}$, $N_{B(3)}$ жидкая и твердая фаза таких веществ в определенном температурном интервале будут находиться в равновесии (между точками S и L для конкретных температур T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , n – соответственно 1, 2, 3, 4 т. д.), рис. 1.5(б, в, г, д).

Твердые растворы двойных сплавов AB могут иметь в зависимости от конкретных компонентов и их концентрации разные кристаллические решетки, т.е. разные фазы, так при одинаковой 50% концентрации компонентов A и B решетка сплава AB может быть, например, гексагональной, а при составе компонентов, соответствующих формуле A_3B – кубической и т. д.

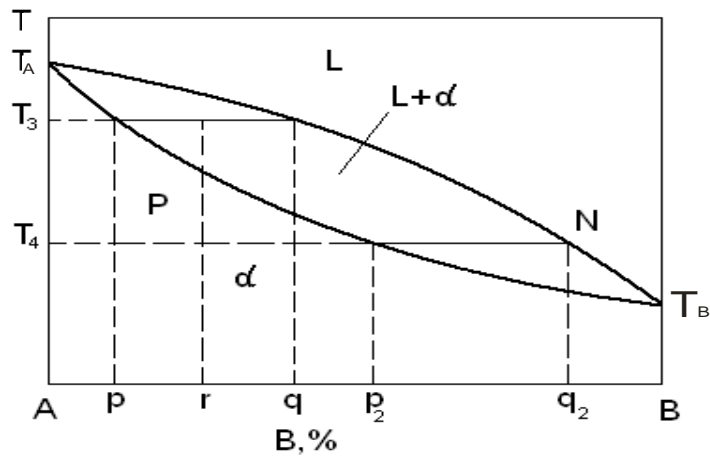


Рис. 1.6. Равновесная диаграмма состояния при неограниченной растворимости компонентов A и B в жидком и твердом состояниях: $L + \alpha$ –область, в которой в равновесии находятся жидкая фаза L и твердая фаза S в виде твердого раствора модификации α

Термодинамический потенциал или свободная энергия Гиббса дается соотношением

$$G = E - TS + PV, \quad (1.10)$$

при стремлении произведения $PV \rightarrow 0$, соотношение приобретает вид $F = E - TS$, которое известно, как соотношение для свободной энергии Гельмгольца, F – свободная энергия Гельмгольца.

Кривые свободной энергии для жидких и твердых растворов в системе с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состоянии. На рис. 1.5 показано равновесие жидкой и твердой фаз при температурах T_1, T_2, T_3, T_4 . В результате может быть построена равновесная диаграмма состояния, соответствующая кривым свободной энергии при температурах T_1, T_2, T_3, T_4 , и т. д., т. е. при изменениях температуры от температуры плавления T_A компонента A до температуры плавления T_B компонента B . Типичная диаграмма состояния при неограниченном растворении компонентов как в жидком, так и в твердом состояниях показана на рис.1.6. Составы твердой и жидкой фаз находящихся в равновесии друг с другом, определяются точками касания общей касательной к обеим кривым свободной энергии, рис. 1.5 (б, в, г). Если использовать свободную энергию Гельмгольца, то условие равновесия имеет вид в точке X :

$$(\partial F_s / \partial C)_{CS} = (\partial F_L / \partial C)_{CL} \quad (1.11)$$

При температуре T_A для компонента A твердая и жидкая фаза имеют одно и то же значение свободной энергии Гиббса (Гельмгольца) $G(F)_A$, рис 1.6, а при температуре T_B для компонента B твердая и жидкая фаза будут иметь также одно и то же, но другое по величине, значение свободной энергии $G(F)_B$

Состав твердой и жидкой фаз, находящихся в равновесии друг с другом при различных температурах, можно нанести на диаграмму в координатах температура – состав. При таком построении получается фазовая, или равновесная, диаграмма состояния, которая обобщает все сведения, вытекающие из проведенного анализа кривых свободной энергии. На рис.1.6

эти построения показаны для температур T_3 и T_4 и конкретных составов сплавов от $N_B(1)$ до $N_B(2)$ и от $N_B(3)$ до $N_B(4)$, которые, как это принято в материаловедении обозначены соответственно, как от p до q и от p_2 до q_2 .

При температурах выше кривой $T_A N T_B$, называемой кривой ликвидуса, сплавы различного состава находятся только в жидком состоянии.

При температурах ниже кривой $T_A P T_B$, называемой кривой солидуса, все сплавы находятся только в твердом состоянии и представляют собой твердые растворы, на данной диаграмме модификации α .

В области между кривыми $T_A N T_B$ и $T_A P T_B$ система представляет собой смесь жидкой и твердой фаз, находящихся в равновесии друг с другом. В этой области система характеризуется одной термодинамической степенью свободы. В областях выше кривой $T_A N T_B$ и ниже кривой $T_A P T_B$ система характеризуется двумя термодинамическими степенями свободы.

Компоненты A и B могут иметь различные кристаллические решетки, и, естественно, различные физико-химические свойства. Такие компоненты неограниченно растворяются друг в друге в жидком состоянии и ограничено в твердом.

На рис.1.7 приведены кривые свободной энергии при температурах T_1 для двух типов систем с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Как видно для случая *a*) минимум для кривой свободной:

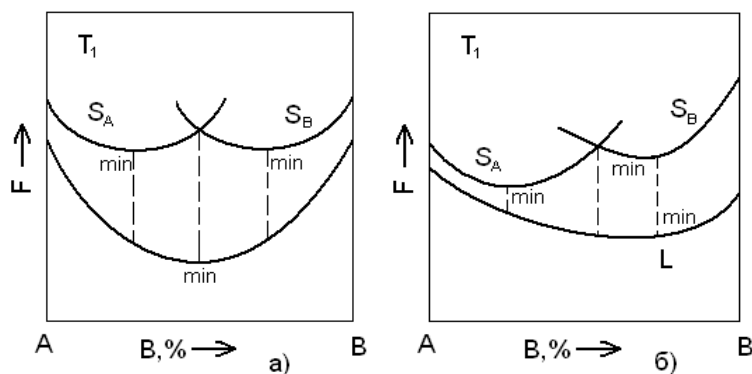


Рис. 1.7. Кривые свободной энергии при температурах T_1 для систем с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии: а) минимум для кривой свободной энергии жидкой фазы находится между минимумами свободной энергии для твердых фаз A и B ; б) интервалы для минимумов свободной энергии в твердом и жидком состояниях не совпадают.

Энергия Гельмгольца жидкой фазы находится между минимумами свободной энергии для твердых фаз A и B . Для случая б) интервалы для минимумов свободной энергии в твердом и жидком состояниях не совпадают.

В результате построения свободных энергий для различных температур для случая *a*) получим равновесную диаграмму состояния с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии эвтектического типа, рис 1.8. А для случая *б*) получим равновесную диаграмму состояния с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии перитектического типа, рис 1.9.

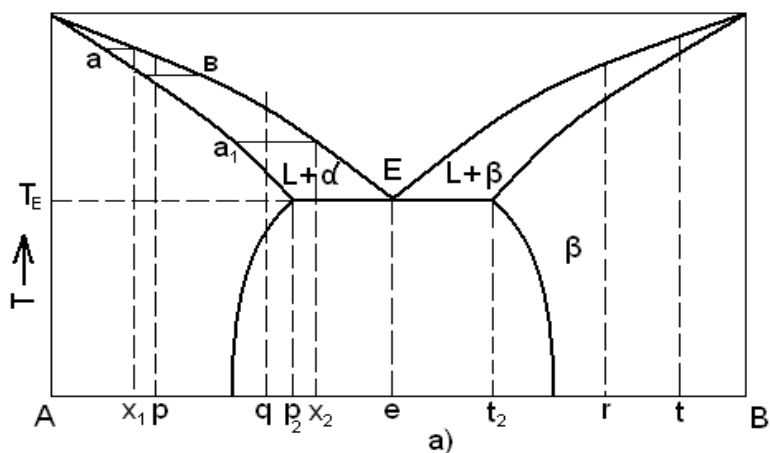


Рис. 1.8. Равновесная диаграмма состояния с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии эвтектического типа

Сплав состава точки E называют эвтектическим. Жидкость этого состава кристаллизуется при эвтектической температуре T_E , образуя смесь кристаллов двух твердых растворов составов p_2 и t_2 . Отношение весовых количеств этих твердых фаз измеряется отношением отрезков $e \cdot t_2 / p_2 \cdot e$ на оси $A - B$.

Для диаграмм перитектического типа, в которых минимум для свободной энергии жидкой фазы находится за пределами интервала для минимумов свободной энергии для твердых фаз имеется особая температура T_p , при которой в равновесии находятся три фазы: жидкая, состава p_0 и твердые растворы α - и β -состава p_2 и t_2 соответственно.

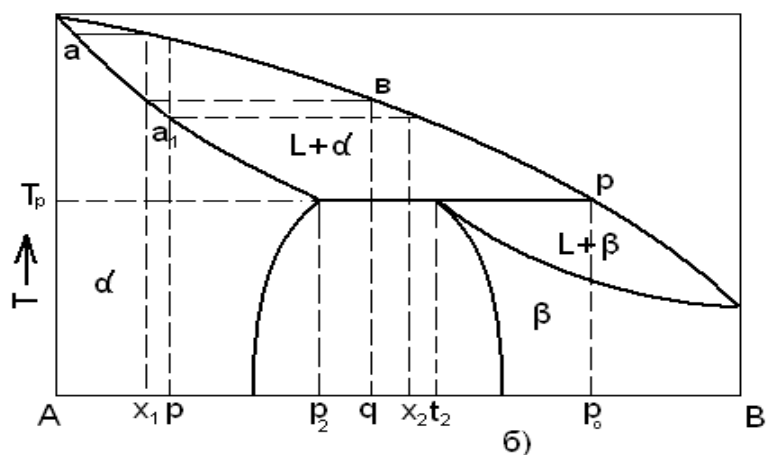


Рис.1.9. Равновесная диаграмма состояния с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии перитектического типа

Точку P называют перитектикой. Значение этой диаграммы состояния заключается в том, что при температуре T_p жидкость состава p_0 реагирует с кристаллами α -твердого раствора состава p_2 , в результате чего образуются кристаллы β -твердого раствора состава t_2 .

В равновесных условиях температура остается постоянной и равной T_p до тех пор, пока не закончится перитектическая реакция; такая система

является неинвариантной (три фазы находятся в равновесии и нет степеней свободы).

Рассмотрим двойные диаграммы состояния (диаграммы состояния двойных систем) представляют состояния систем с двумя компонентами. На таких диаграммах по оси ординат откладывается температура, по оси абсцисс – процентное соотношение компонентов смеси (обычно это или процент от общей массы (вес. %), или процент от общего числа атомов (ат. %)). Давление обычно полагается равным 1 атм. Если рассматривается жидкая и твердая фазы, измерением объема пренебрегают. На рис. 1.10. представлена типичная двухфазная диаграмма состояний эвтектического типа для компонентов A и B с использованием весового или атомного процента.

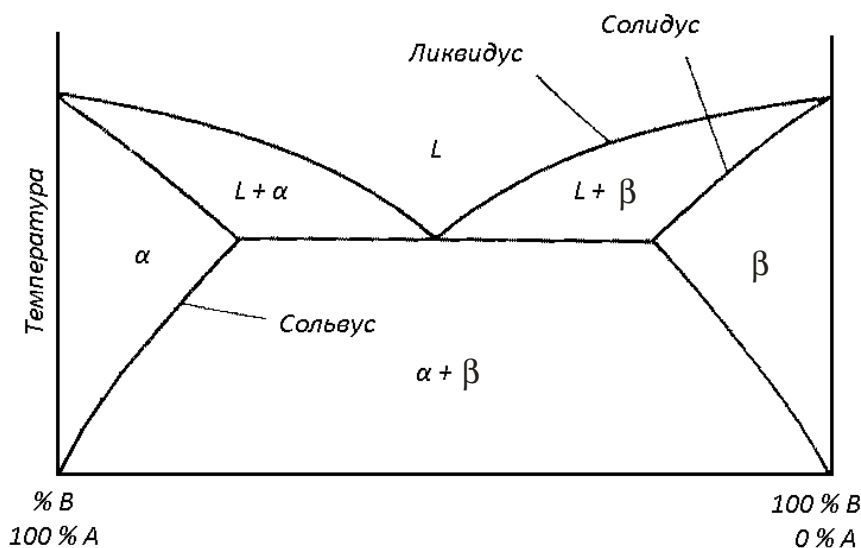


Рис. 1.10. Двухфазная диаграмма состояний эвтектического типа

Буквой α обозначена фаза вещества A с растворенным веществом B , β означает фазу вещества B с растворенным в нем веществом A , а $\alpha + \beta$ означает смесь этих фаз. Буква L (от liquid – жидкий) означает жидкую фазу, а $L + \alpha$ и $L + \beta$ означают жидкую фазу плюс твердую фазу α или β соответственно. Линии, разделяющие фазы, т. е. линии, на которых могут существовать различные фазы вещества, имеют следующие названия: солидус – линия, на которой одновременно существуют фазы α или β с фазами $L + \alpha$ и $L + \beta$ соответственно; сольвус – линия, на которой одновременно сосуществуют фазы α и $\alpha + \beta$ или β и $\alpha + \beta$, и ликвидус – линия, на которой одновременно существует фаза L с фазой $L + \alpha$ или $L + \beta$.

Точка пересечения двух линий ликвидуса часто является точкой наименьшей температуры плавления для всех возможных комбинаций веществ A и B и называется эвтектической точкой. Смесь с соотношением компонентов в эвтектической точке называется эвтектической смесью (или просто эвтектикой).

Целесообразно будет рассмотреть, как происходит переход смеси из жидкого состояния (расплава) в твердое и как фазовая диаграмма помогает предсказать равновесную композицию всех фаз, существующих при данной температуре. Обратимся к рис. 1.11.

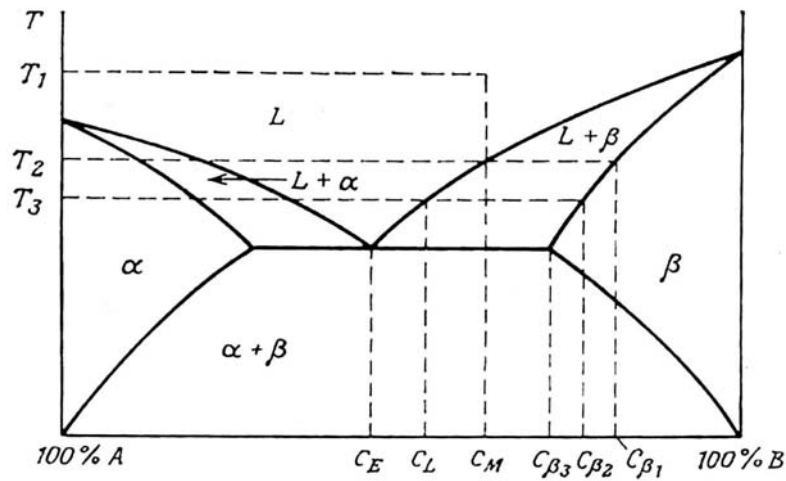


Рис. 1.11. Двухфазная диаграмма состояний, на которой показаны процессы отвердевания

Предположим, что вначале смесь имела состав C_M при температуре T_1 , при температуре от T_1 до T_2 существует жидкая фаза, а при температуре T_2 одновременно существуют фазы L и β . Состав присутствующей фазы L есть C_M , состав фазы β есть C_{β_1} . При дальнейшем снижении температуры до T_3 состав жидкой фазы меняется вдоль кривой ликвидуса, а состав фазы β – вдоль кривой солидуса до пересечения с изотермой (горизонтальной линией) T_3 . Теперь состав фазы L будет C_L , а состав твердой фазы β – C_{β_2} . Следует отметить, что состав C_{β_2} будет иметь не только вещество, состава C_L перешедшее в фазу β при температуре T_3 , но и все вещество, перешедшее в фазу β при более высокой температуре. Это выравнивание составов должно произойти путем твердотельной диффузии компонента A в образовавшуюся фазу β , так что к моменту достижения температуры T_3 все вещество, находящееся в фазе β , будет иметь состав C_{β_2} .

Дальнейшее снижение температуры приводит нас в эвтектическую точку. В ней фазы α и β существуют одновременно с жидкой фазой L . При более низких температурах существуют только фазы α и β . Образуется смесь фаз α и β состава C_E с агрегатами β с начальным составом C_{β_3} . Затем, выдерживая эту смесь длительное время при температуре ниже эвтектической, можно получить твердое тело. Образовавшееся твердое тело будет состоять из двух фаз α и β . Состав каждой из фаз можно определить в точке пересечения изотермы с соответствующей линией сольвуса.

Только что было показано, как определить состав каждой из присутствующих фаз. Теперь рассмотрим задачу определения количества вещества в каждой фазе. Во избежание путаницы на рис. 1.12 еще раз приводится простая двухфазная диаграмма. Предположим, что при температуре T_1 состав расплава есть C_M (имеется в виду компонент B), тогда при T_2 фаза L имеет состав C_L , а фаза β будет иметь состав C_S . Пусть M_L – масса вещества, находящегося в жидком состоянии, а M_S – масса вещества,

находящегося в твердом состоянии. Условие сохранения суммарной массы приводит к следующему уравнению

$$(M_L + M_S)C_M = M_L C_L + M_S C_S. \quad (1.12)$$

В этом уравнении нашел отражение тот факт, что общая масса вещества при температуре T_1 , умноженная на процент компонента B , – есть общая масса вещества B . Она равна сумме масс вещества B , существующего в жидкой и в твердой фазах при температуре T_2 . Решая это уравнение, получаем

$$\frac{M_S}{M_L} = \frac{C_M - C_L}{C_S - C_M} = \frac{L}{S}. \quad (1.13)$$

Это выражение известно как “правило уровня”. С помощью этого правила, зная начальный состав расплава и общую его массу, можно определить массы обеих фаз и количество компонента B в любой фазе для любого участка двухфазной диаграммы. Точно так же можно вычислить и количество компонента A в любой фазе для любого участка двухфазной диаграммы.

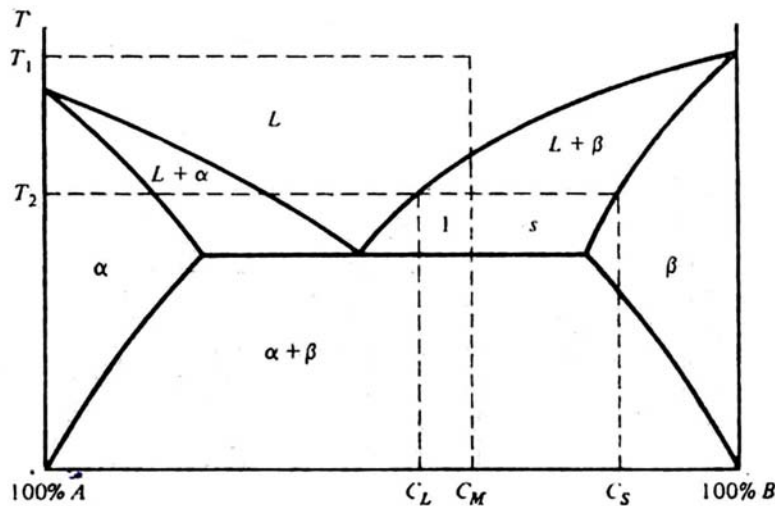


Рис. 1.12. Правило уровня

На рис. 1.13. приведен еще один пример отверждения расплава. Снижение температуры от T_1 до T_2 приводит к смешиванию фаз L и β с составом соответственно C_M и C_β . По мере дальнейшего охлаждения состав L меняется вдоль линии ликвидуса, а состав β – вдоль линии солидуса, как было описано ранее. При достижении температуры T_3 состав β станет равным C_M , и, как следует из правила уровня, при температуре, меньшей T_3 , жидкая фаза существовать не может. При температуре, меньшей T_4 , фазы α и β существуют как агрегаты фаз α и β . Например, при температуре T_5 агрегаты фазы β будут иметь состав, определяемый пересечением изотермы T_5 и сольвуса β . Состав α определяется аналогично – пересечением изотермы и сольвуса α .

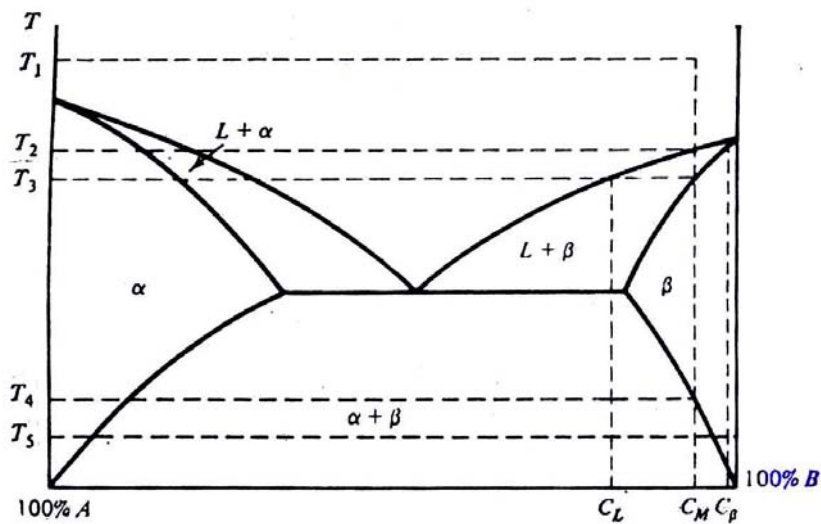


Рис. 1.13 Двухфазная диаграмма и процесс отвердевания количество вещества A , присутствующего в любой из фаз

Участки двухфазной диаграммы, называемые до сих пор α и β , – это участки твердой растворимости: в области α растворен компонент B в компоненте A , а в области β растворен компонент A в компоненте B . Максимальные количества компонента A , которое может быть растворено в B и компонента B , которое может быть растворено в A при данной температуре, находятся в зависимости от температуры. При эвтектической или более высокой температуре может иметь место быстрое сплавление A и B . Если полученный при этом сплав резко охладить, то атомы A могут быть захвачены в решетку компонента B . Но если твердая растворимость при комнатной температуре намного ниже (это говорит о том, что при этой температуре рассматриваемый подход не слишком пригоден), то в сплаве могут возникнуть большие остаточные напряжения, существенно влияющие на его свойства (при наличии значительных остаточных напряжений возникают пересыщенные твердые растворы, и система не находится в равновесном состоянии, а диаграмма дает информацию только о равновесных состояниях). Иногда, такой эффект является желательным, например при упрочнении стали закалкой с получением мартенсита. Но в изделиях интегральной электроники возникновение больших по величине остаточных напряжений обычно приводит к разрушению изделий или к несоответствию заданным параметрам. Поэтому легирование, т. е. внесение добавок в кремний во время диффузии, проводится при повышенных температурах с таким расчетом, чтобы предупредить повреждение поверхности из-за избыточного сплавления. Если же количество легирующей примеси в подложке окажется выше предела твердой растворимости при любой температуре, то выделяется вторая фаза, что приводит к нежелательным деформациям изделий.

1.4. Основные двойные диаграммы состояния широко используемых материалов в изделиях интегральной электроники

Существует большое количество веществ, которые неограниченно растворяются друг в друге как в жидком, так и в твердом состояниях. Примером может служить система их двух таких важных для интегральной электроники веществ, как кремний и германий. Система кремний – германий показана на рис. 1.14.

Диаграмму с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состояниях часто называют изоморфной. Для того чтобы два элемента считались изоморфными, они должны подчиняться правилам Юма – Розери, т.е. иметь различие в значениях атомных радиусов не превышающее 15%, одинаковую валентность, одинаковую кристаллическую решетку и, кроме этого, приблизительно одинаковую электроотрицательность (электроотрицательность атома характеризуется способностью захватывать электроны при ковалентном типе химической связи или притягивать их, например, при металлическом типе связи). Примерами могут быть системы Si – Ge, Cu – Ni, Au – Pt и Ag – Pd, которые характеризуются неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состоянии, соответствуют правилам Юма – Розери и, следовательно, являются изоморфными.

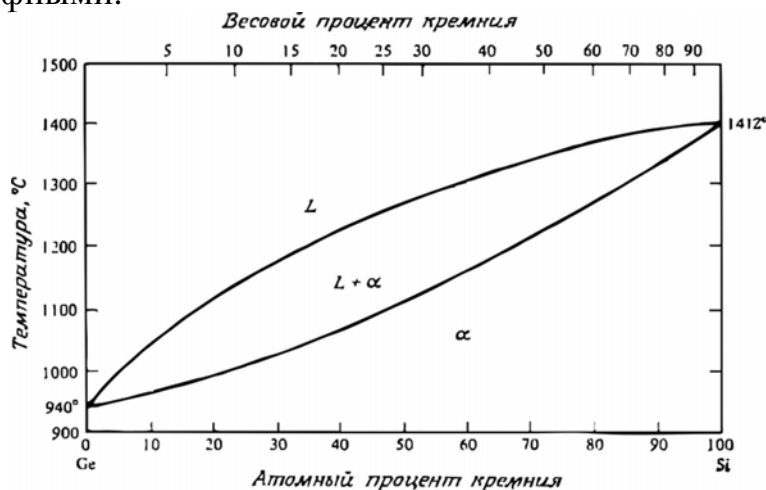


Рис. 1.14. Система кремний – германий

Система Pb – Sn служит хорошим примером простой бинарной системы со значительной, хотя и ограниченной твердой растворимостью. Фазовая диаграмма состояний этой системы приведена на рис. 1.15. Точка пересечения солидуса и сольвуса называется точкой граничной растворимости, значения граничной растворимости как олова в свинце, так и свинца в олове достаточно большие. Данная система в прошлом широко использовалась при производстве изделий интегральной электроники благодаря широкому применению оловянно–свинцовых припоев, использование которых в настоящее время по экологическим соображениям резко сокращено. Из двухфазной диаграммы этой системы видно, как изменение соотношения компонентов, изменяет температуру плавления сплавов. Когда при изготовлении изделия требуется провести несколько последовательных паяк, то для каждой следующей пайки применяется припой с более низкой температурой плавления. Это делается для того, чтобы не плавилась пайки, сделанные раньше.

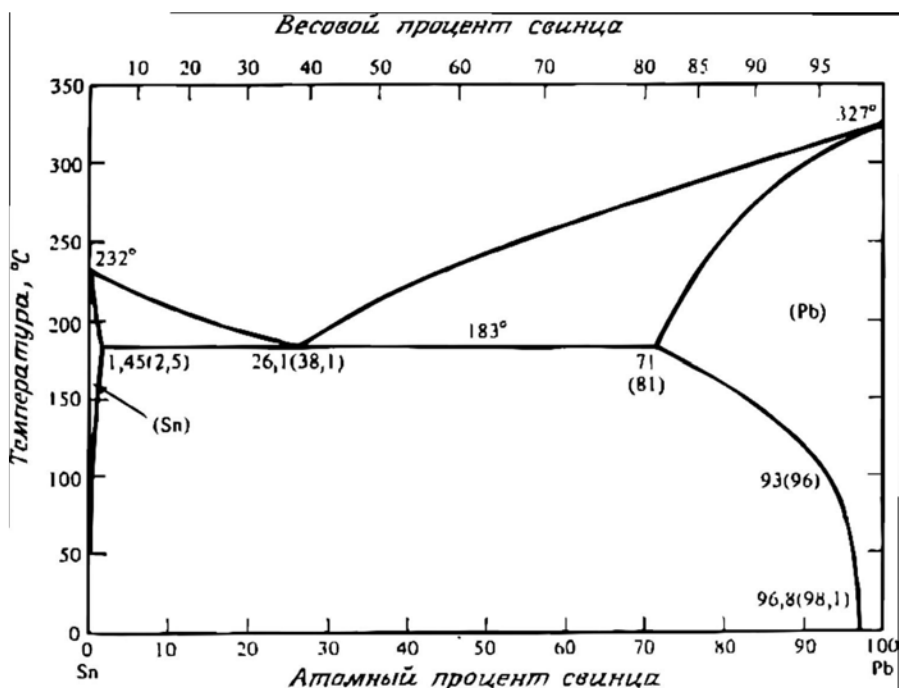


Рис. 1.15. Фазовая диаграмма состояний системы свинец – олово

Для производства изделий интегральной электроники не менее важны свойства системы Au – Si, поскольку эвтектическая температура этой системы 370°C крайне мала по сравнению с температурами плавления чистого золота – 1063°C или чистого кремния – 1412°C (рис 1.16).

Растворимости золота в кремнии и кремния в золоте слишком малы, чтобы их отобразить на обычной фазовой диаграмме состояний. Из-за низкой эвтектической температуры оказывается выгодно монтировать кристаллы микросхем на или покрытые золотом подложки, держатели или платы с золотыми контактными площадками, пользуясь эвтектической реакцией Au – Si в качестве основного механизма сварки (или пайки). Для монтажа кремниевых кристаллов в корпуса также используются сплавы золота. Но в этом случае вторым компонентом является германий.

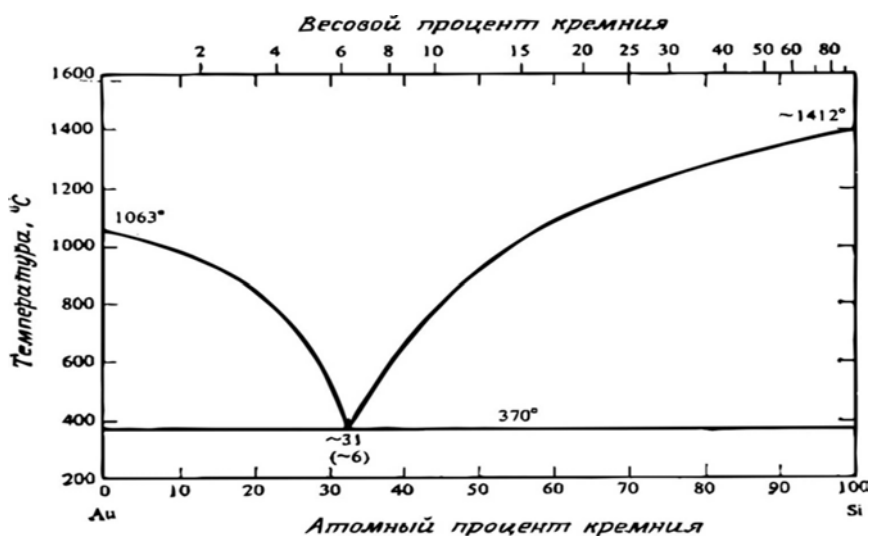


Рис. 1.16. Система золото – кремний

Особое значение для производства изделий интегральной электроники имеет система Al – Si, так как подавляющее большинство токоведущих

дорожек на кремниевых кристаллах интегральных микросхем выполняется из алюминия. Данная диаграмма приведена на рис.1.17

Данная диаграмма является эвтектической. В точке эвтектики при эвтектической температуре 577°C содержание кремния в весовых и атомных процентах составляет соответственно 11,3% и 11,7%, при этом важным является максимальная растворимость кремния в алюминии. Особенности этого процесса в увеличенном масштабе показаны в левом верхнем угле диаграммы. Эти особенности заключаются в следующем: при увеличении температуры в диапазоне от 300°C до температуры эвтектики 577°C растворимость кремния медленно увеличивается от нуля до 1,59%, 1,65% в атомных и весовых процентах соответственно. Эта особенность растворимости кремния в алюминии учитывается в производственных процессах производства изделий интегральной электроники. Так например, в процессах нанесения металлического слоя для формирования токоведущих дорожек применяются сплавы алюминия, содержащие порядка одного процента кремния, что предотвращает или сводит к минимуму процессы вертикальной диффузии компонентов на границе кремний – сплав алюминия, например, состава (Al+4,0 %Cu+1,0 – 1,5%).

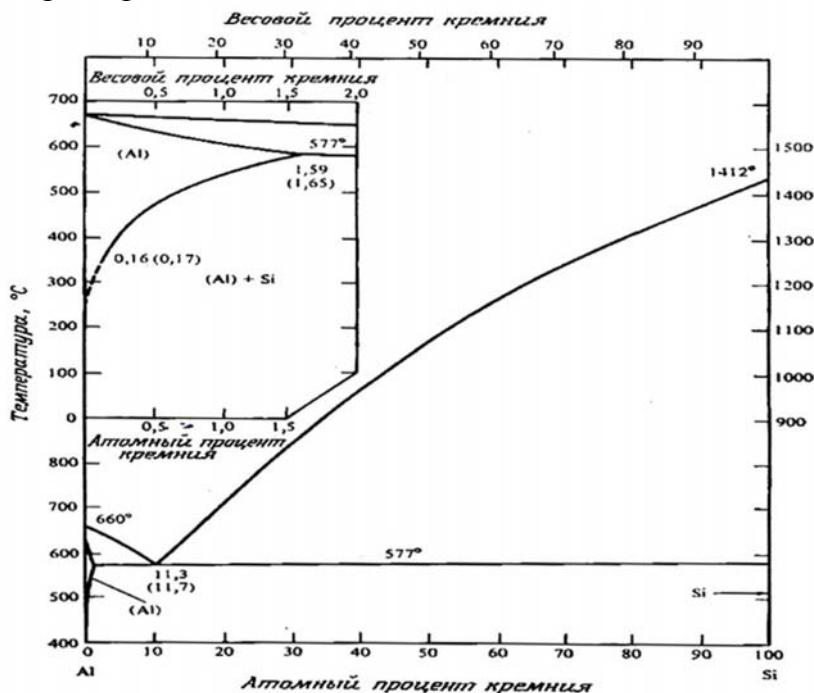


Рис. 1.17. Система алюминий – кремний

Диаграмма системы Au – Al, показанная на рис. 1.18, имеет в производстве изделий интегральной электроники также важное значение, поскольку обычно золотые провода соединяются с алюминиевыми токоведущими дорожками, расположенными на поверхности кремниевого кристалла микросхемы, или наоборот алюминиевая проволока присоединяется к контактными площадкам на кристалле микросхемы, выполненным из золота. Комбинации элементов, образующих химические соединения в системе Au – Al, имеют более сложные диаграммы состояний.

Их можно разбить на несколько более простых диаграмм, каждая из которых относится к определенной паре соединений или соединений и отдельных компонентов. Например, $AuAl_2$ образуется, если количество золота в сплаве с алюминием составляет 33 атомных процента при температуре менее 1060° (рис. 1.18). Слева от этой линии сосуществуют фаза чистого алюминия и соединение $AuAl_2$. Соединения, подобные $AuAl_2$, называются интерметаллическими и образуются при соответствующем стехиометрическом соотношении элементов. Интерметаллические соединения характеризуются высокой температурой плавления, сложной кристаллической решеткой и, кроме того, отличаются твердостью и хрупкостью. Таким образом, фазовая диаграмма состояний Au – Al может быть разбита на две или больше диаграмм, например на диаграмму Al – $AuAl_2$ и диаграмму $AuAl_2$ – Au и т.д..

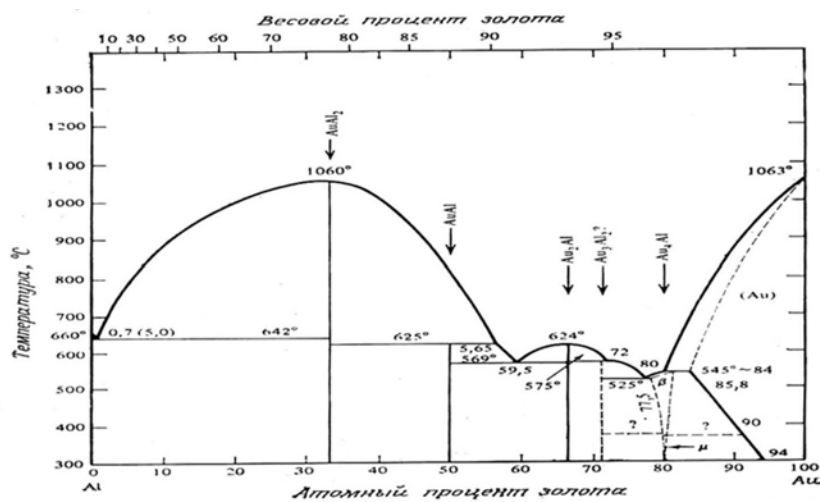


Рис. 1.18. Система золото – алюминий

На диаграмме указаны несколько важных интерметаллических соединений: $AuAl_2$, Au_2Al , Au_5Al_2 и Au_4Al . При образовании контактов в системе Au – Al могут присутствовать все эти интерметаллические соединения. Проблемы, связанные с образованием этих соединений, называют пурпурной или рыжей чумой. Эти проблемы обсуждаются в следующих главах.

1.5. Твердая растворимость

Граничная растворимость большинства легирующих примесей в кремнии крайне мала и в действительности не является максимальной растворимостью. На рис. 1.19 а представлена типичная кривая солидуса для примесей в кремнии. Необходимо отметить, что растворимость растет с температурой до определенного значения, а затем убывает до нуля при температурах приближающихся к температуре плавления кремния. Такая кривая называется ретроградной кривой растворимости. Уточненная версия такой диаграммы в окрестности точки плавления кремния показана на рис. 1.19 б.

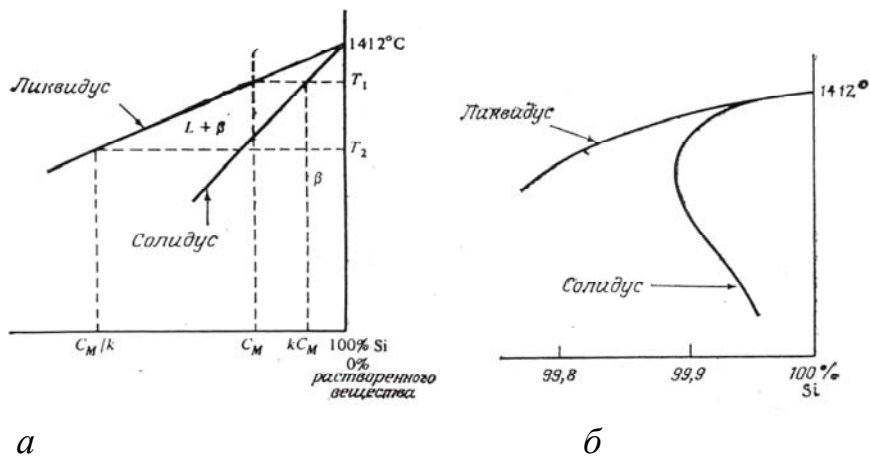


Рис. 1.19 Ретроградная растворимость кремния (а) и типичная фазовая диаграмма в окрестности точки плавления кремния (б)

Если состав расплава кремния равен C_M в процентах массы растворенного вещества, то кремний будет застывать с содержанием растворенного вещества kC_M , где k – коэффициент сегрегации ($k=C_S/C_L$). Когда концентрация в твердом теле достигнет значения C_M при замораживании, в то время как концентрация в жидком растворе будет равна C_M/k , поскольку соотношение концентраций в жидком и твердом растрах должна быть равна k .

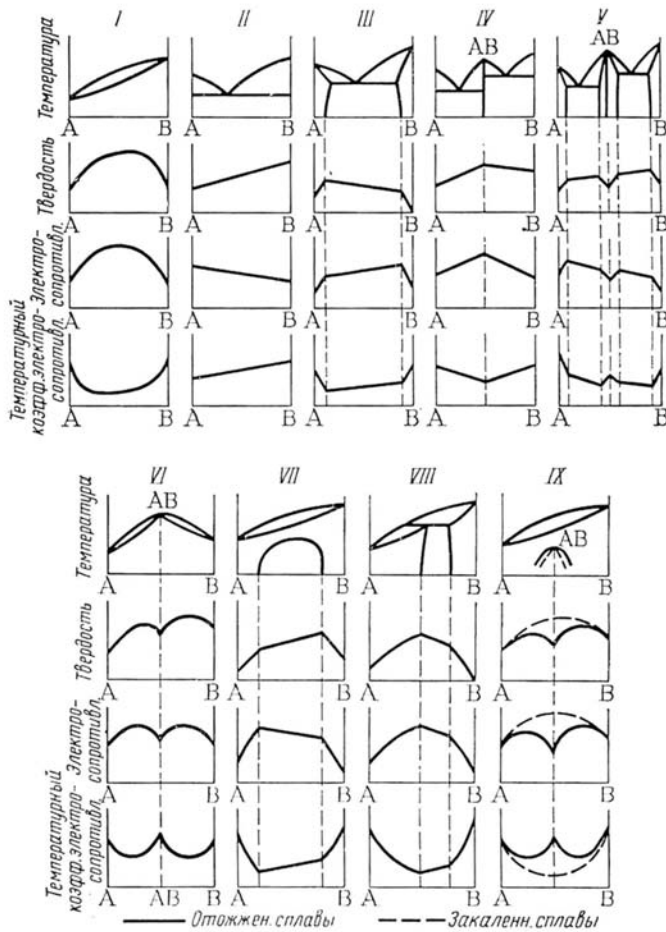


Рис. 1.20. Важнейшие типы диаграмм состояния бинарных систем
Наклон линии солидуса, следовательно, равен

$$S_s = \frac{T_1 - T_2}{kC_M - C_M}, \quad (1.14)$$

а наклон ликвидуса будет

$$S_L = \frac{T_1 - T_2}{C_M - C_M/k}. \quad (1.15)$$

Отношение наклонов ликвидуса и солидуса оказывается равным коэффициенту сегрегации k

$$\frac{S_L}{S_s} = k = \frac{kC_M - C_M}{C_M - C_M/k}. \quad (1.16)$$

На рис. 1.20. приведены важнейшие типы диаграмм состояния по В.А. Немилову. На этом же рисунке показано, как взаимосвязаны на примере изменений твердости, электросопротивления и температурного коэффициента сопротивления физико–химические свойства материалов, имеющих определенные типы диаграмм состояния, с их составом и определяемым соотношением компонентов в сплавах.

Диаграммы состояния непрерывных твердых растворов (тип VI) могут иметь не только максимум, но и минимум (рис. 1.21).

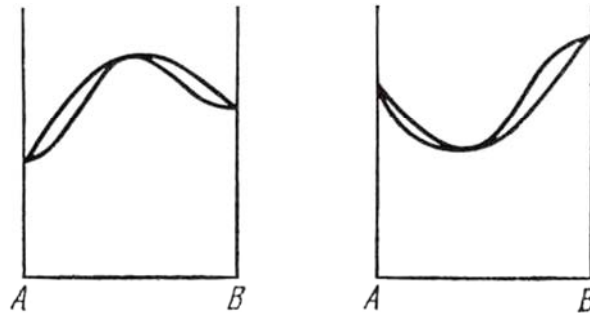


Рис. 1.21. Диаграмма состояния непрерывных твердых растворов с максимумом или минимумом

1.6. Диаграммы состояния тройных систем

В настоящее время в различных областях современной техники, в том числе и в интегральной электронике, все шире начинают использоваться различные многокомпонентные материалы, обладающие уникальными физико–химическими свойствами, механическими, электрическими, магнитными, теплофизическими и т.д. При этом наиболее изученными являются диаграммы состояния для материалов, состоящих из трех компонентов. Для построения диаграмм тройных систем $A - B - C$ обычно используются треугольные диаграммы Гиббса (рис. 1.22). Для определения фигуративной точки Φ опускают перпендикуляры на стороны диаграммы (рис. 1.22, а). Высота перпендикуляра в долях высоты треугольника показывает концентрацию компонента, символ которого помещен в вершине треугольника. Значение свойства задается двумя способами: 1) высотой перпендикуляра (например, E_0E_5 на рис. 1.22, б) к данной точке; и 2)

кривыми, отражающими на диаграмме геометрические места точек с равными свойствами (так, например, на географической карте изображаются изогипсы). На рис. 1.22, в показана диаграмма состояния системы $\text{Bi} - \text{Pb} - \text{Sn}$.

На рис. 1.22, б компоненты B и C образуют дистектическую диаграмму с эвтектиками E_3 и E_4 . Компоненты A и B , а также A и C образуют эвтектические диаграммы с эвтектиками E_1 и E_2 и, наконец, возникают тройные эвтектики E_5 и E_6 .

В случае, когда компоненты диаграммы $A - B - C$ простые соединения, несимметричная диаграмма (рис. 1.23) никаких преимуществ перед симметричной диаграммой не имеет. Но если в качестве компонентов выступают сложные соединения, то введение несимметричной диаграммы дает существенные преимущества. На сторонах диаграммы отложено содержание каждого простого оксида в процентах. Поясним сказанное на примере системы альбит – анортит – диопсид (соответственно $\text{Ab} - \text{An} - \text{Di}$, на рис. 1.23). Состав альбита: $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 6\text{SiO}_2$; анортита: $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$; диопсида: $\text{MgO} - \text{CaO} - 2\text{SiO}_2$.

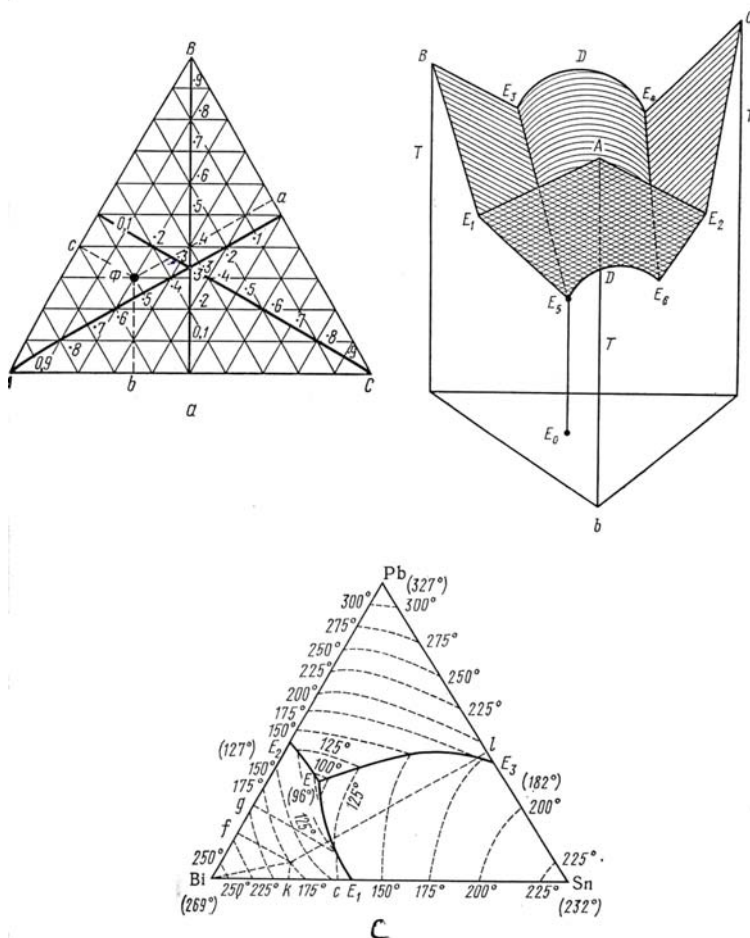


Рис. 1.22. Симметричная тройная диаграмма состояния по Гиббсу:

- а – нахождение фигуральной точки Φ ; б – диаграмма состояния в трех измерениях с построением поверхности свойств; в – диаграмма состояния для системы $\text{Bi} - \text{Pb} - \text{Sn}$ с нанесенными на ней изотермами и эвтектическими линиями

Таким образом, система складывается из пяти оксидов: Na_2O , MgO , CaO , Al_2O_3 , и SiO_2 . Химический анализ показывает содержание в системе именно простых оксидов, а не сложных соединений альбита, анортита, диопсида – компонентов тройной диаграммы. Поэтому, определив химический состав, приходится делать сложные пересчеты для нахождения фигуративной точки. Положение значительно упрощается с использованием метода несимметричной диаграммы по Ормонту (рис. 1.23, а).

Математический анализ показал, что концентрация любого простого оксида может быть представлена эквипроцентными углами к сторонам диаграммы (рис. 1.23, а). Отложив на сторонах последней концентрационный масштаб и используя шаблоны, стороны которых направлены под углами, отвечающими эквипроцентным линиям (рис. 1.24, а), можно без всякого расчета найти по положению точки состав многокомпонентного вещества в простых оксидах. А по химическому составу можно найти и фигуративную точку (рис. 1.24, б). Для этой цели нужно знать содержание не всех (в нашем примере пять), а только некоторых (двух, для надежности трех) простых оксидов, ибо в идеальном случае все прямые должны пересечься в точке S . Можно установить надежность химического анализа и графическим путем.

Применительно к технологии производства изделий интегральной электроники такие подходы с использованием шаблонов для нахождения фигуративной точки по содержанию простых оксидов и определение содержания простых оксидов по положению фигуративной точки очень важны при разработке, например, систем для электрической изоляции компонентов и элементов микросхемы на кристалле или изоляции микросхемы от воздействия окружающей среды (пассивирующие покрытия). Так как в производстве диэлектриков часто используются сложные составы, применение несимметричной диаграммы может облегчить работу и исследователя, и технолога. Возникает возможность непосредственно связать химический и фазовый состав с ходом температур плавления, механических, оптических, электрических и магнитных и значительно сократить количество аналитических определений при разработке технологических процессов изделий интегральной электроники.

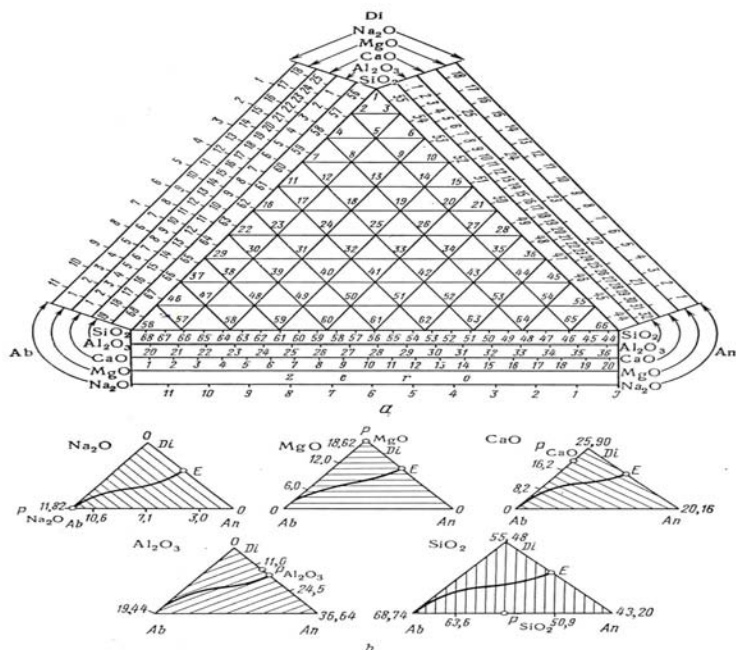


Рис. 1.23. Несимметричная тройная диаграмма состояния для системы альбит – анортит – диоксид: а – общий вид диаграммы; б – эквиконцентрационные линии на пяти простых оксидах

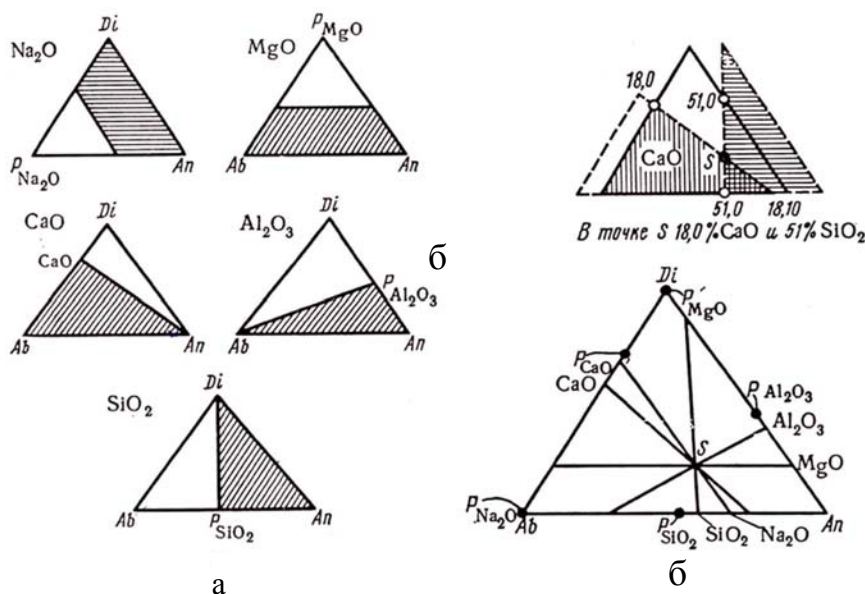


Рис. 1.24. Построение и применение шаблонов для нахождения фигуративной точки по содержанию простых оксидов и определение содержания простых оксидов по положению фигуративной точки: а – построение шаблонов; б – применение шаблонов для расчетных цепей.

1.7. Основные понятия и определения

В процессе производства методами планарной технологии интегральных микросхем (ИМС) в приповерхностном слое полупроводниковой пластины и на ее поверхности формируются активные и пассивные элементы (диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы), которые затем объединяются на отдельных участках пластины в определенного типа функциональные

микросхемы пленочными проводниками (межсоединениями), получаемыми в процессах металлизации и последующего травления. Участки пластины со сформированными определенными функциональными интегральными микросхемами после разрезания пластины по границам этих участков будут называться кристаллами.

Для характеристики особенностей применяемых в ИМС элементов и компонентов, а также технологических процессов их изготовления используют понятие – структура ИМС. Конкретная структура ИМС определяет последовательность формирования микросхемы по нормали к поверхности кристалла, т.е. включает процессы последовательного формирования функциональных и технологических слоев из различных материалов с определенной толщиной и электрофизическими свойствами. При производстве ИМС используют структуры диффузионно–планарные, эпитаксиально–планарные структуры И²Л и др. на биполярных транзисторах, а также структуры на МДП–приборах, и т. д. Заданная структура ИМС позволяет определить количество и последовательность применения технологических процессов формирования активных и пассивных элементов в приповерхностных слоях и на поверхности пластины и определить технологические режимы каждого технологического процесса.

На рис. 1.25 представлен разрез участка ИМС с диффузионно–планарной структурой, включающий биполярный транзистор и диффузионный резистор. Для одновременного формирования активного и пассивного элементов необходимо, чтобы *p*–область резистора и изолирующая его *n*–область имели глубину и электрофизические свойства, одинаковые или близкие к свойствам областей соответственно базы и коллектора транзистора. Аналогичное соответствие должно обеспечиваться и для других элементов, входящих в состав ИМС. Соответствие технологических параметров всех активных и пассивных элементов и компонентов ИМС является главным признаком и непременным условием применения интегральной технологии и позволяет минимизировать число технологических операций при производстве данного изделия интегральной электроники.

Таким образом, технология изделий интегральной электроники является совокупностью технологических процессов, обеспечивающих при наличии структурного подобия (технологической совместимости) различных элементов и компонентов ИМС формировать их одновременно или последовательно в едином технологическом процессе.

Достоинством планарной технологии при производстве серий ИМС различного функционального назначения является их единая структура, а следовательно и одинаковая технологическая последовательность обработки и определенный комплект оборудования, работающий по заданной программе т. е. обеспечивающий заданные технологические режимы. Такая планарная технология называется базовой и обеспечивает экономичность и эффективность производства ИМС. Базовая технология не зависит от размеров элементов в плане, их взаимного расположения и формы токоведущих дорожек. Эти свойства конкретной ИМС определяются в процессе топологического проектирования, и обеспечиваются

фотолитографией – процессом создания с помощью фоторезистов защитной фотомаски на поверхности пластины, функциональное назначение которой – обеспечить возможность избирательного травления поверхностных слоев на кремниевой пластине, чаще всего диоксида кремния.

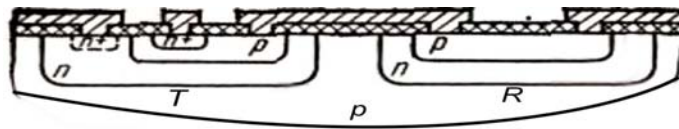


Рис.1.25. Разрез участка ИМС с диффузионно–планарной структурой T – транзистор; R – резистор

Процесс топологического проектирования начинается с создания топологии микросхемы – чертежа определяющего форму, размеры и взаимное расположение элементов и токоведущих дорожек (соединений) ИМС в плоскости, параллельной плоскости кристалла. Элементы и соединения создаются путем последовательного формирования или нанесения отдельных слоев (коллекторный слой, базовый слой, металлический слой и т. д.). При этом различают общую и послойную топологию (рис.1.26 в соответствии с рис. 1.25). По топологическому чертежу базового слоя, например, может быть разработан чертеж фотошаблона, с помощью которого создают оксидную маску для избирательной диффузии примеси p -типа.

При заданном наборе элементов топология ИМС (точнее, чертеж токоведущих дорожек) определяет ее функциональные свойства. Можно представить себе кристалл, содержащий некоторый универсальный набор элементов (очевидно, с некоторой избыточностью) и сплошной слой металла, покрывающий все кристаллы на пластине. Такие кристаллы в составе общей пластины могут быть «доработаны» по желанию заказчика до конкретных функциональных ИМС в зависимости от формы токоведущих дорожек, полученной с помощью соответствующего фотошаблона. Описанная универсальная пластина–заготовка, получившая название базового кристалла, позволяет обеспечить экономичность производства ИМС более узкого, специального применения, выпускаемых в небольших количествах.

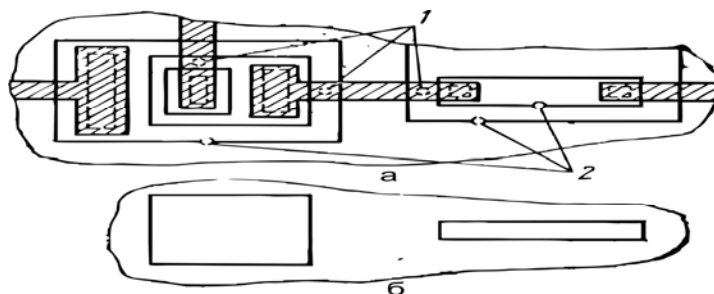


Рис. 1.26. Участки чертежей общей топологии ИМС (а) и базового слоя (б) 1 – дефекты, возникшие при нанесении металлического слоя; 2 – дефекты, возникшие в процессе диффузии примеси

При классификации изделий интегральной электроники кроме твердотельных интегральных микросхем (ИМС), о которых речь шла выше, различают еще гибридные и совмещенные интегральные микросхемы.

Применение твердотельных интегральных микросхем ограничено по ряду причин. Одна из них заключается в том, что производство твердотельных ИМС оказывается целесообразным лишь в крупносерийном и массовом производстве, когда становятся экономически оправданными значительные затраты на подготовку производства (главным образом на проектирование и изготовление комплекта фотошаблонов). Другая причина лежит в ряде ограничений на параметры элементов и ИМС в целом: невысокая точность диффузионных резисторов ($\pm 10\%$) и отсутствие возможности корректировки их сопротивления, невозможность получать конденсаторы достаточно больших емкостей, температурные ограничения, ограничения по мощности и др.

Наряду с твердотельными ИМС широко используются комбинированные гибридные интегральные микросхемы (ГИС). Технологической основой ГИС являются процессы нанесения резисторов, конденсаторов, проводников и контактов в виде тонких или толстых пленок из соответствующих материалов на диэлектрическую пассивную подложку. Транзисторы, диоды, индуктивности, а иногда и резисторы и конденсаторы, изготовленные в виде отдельных дискретных электрокомпонентов, монтируются на общей подложке, образуя ГИС (рис. 1.27).

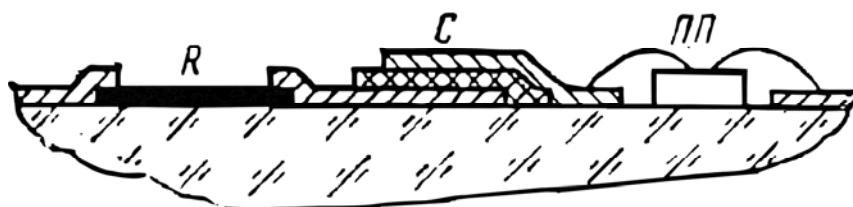


Рис. 1.27. Участок ГИС (разрез) R – тонкопленочный резистор, C – конденсатор, $ПП$ – полупроводниковый прибор (диод, транзистор, кристалл твердотельной интегральной микросхемы)

Гибридная пленочная интегральная микросхема ГИПС, наряду с пленочными элементами, полученными с помощью интегральной технологии, содержит дискретные электрокомпоненты, имеющие самостоятельное конструктивное оформление. В зависимости от метода нанесения пленочных элементов на подложку ГИС различают тонкопленочные (напыление в вакууме) и толстопленочные (трафаретная печать) ГИПС.

ГИС имеют худшие технические показатели (размеры, массу, быстродействие, надежность), чем твердотельные ИМС. В то же время они позволяют реализовать широкий класс функциональных электронных изделий, являясь при этом экономически целесообразными в условиях серийного и даже мелкосерийного производства. Экономическая обоснованность использования ГИС объясняется менее жесткими требованиями к фотошаблонам и трафаретам, с помощью которых формируют пленочные элементы, а также применением менее дорогостоящего оборудования. В составе пленочных ГИС возможно получить резисторы с точностью $\pm 5\%$, конденсаторы $\pm 10\%$, а с применением методов подгонки параметров – до десятых долей процента. Гибридно–

пленочная технология позволяет реализовать практически любые по сложности функциональные изделия.

Стремление расширить область применения твердотельных ИМС привело к созданию другого типа комбинированных микросхем – совмещенных интегральных микросхем (рис.1.28). При их изготовлении наряду с твердотельной технологией производства ИМС используют и тонкопленочную технологию производства ГИС, обеспечивающую более качественное создание некоторых пассивных элементов, к которым предъявляются повышенные требования по точности и температурной стабильности.

Совмещенная интегральная микросхема – это комбинированное изделие интегральной электроники, в которой некоторые элементы (обычно пассивные) наносят на поверхность пластины (кристалла) методами пленочной технологии. Однако совмещенные интегральные микросхемы в отдельный класс изделий интегральной электроники не выделяются, так как планарная технология производства твердотельных интегральных микросхем включает и процессы формирования тонких пленок различного функционального назначения.

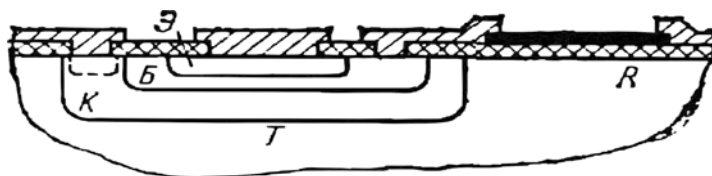


Рис. 1.28. Фрагмент совмещенной ИМС: *T* – транзистор (Э–эмиттер, Б–база, К–коллектор), *R* – пленочный резистор

Известно, что твердотельные интегральные микросхемы по сравнению с изделиями с навесными элементами имеют лучшие технико–экономические показатели: размеры и массу, надежность, быстродействие, стоимость. Известно также, что эти показатели улучшаются с повышением функциональной сложности ИМС, т. е. с увеличением числа элементов, полученных с помощью интегральной технологии. Для обозначения числа элементов, полученных с помощью интегральной технологии на кристалле используют термин степень интеграции. Степень интеграции – это показатель степени сложности ИМС, характеризуемой числом элементов на общем кристалле. Для характеристики степени интеграции используют показатель $K = \lg N$, где N – число элементов ИМС. В зависимости от значения K условно различают ИМС малой степени интеграции (МИС), средней степени интеграции (СИС), большие интегральные схемы (БИС) и сверхбольшие (СБИС).

Повышение степени интеграции ИМС является важнейшей задачей микроэлектроники, в значительной мере определяющей основные тенденции схмотехнических и конструкторско–технологических разработок. Среди факторов, ограничивающих степень интеграции, важное место занимает технологический фактор. В полупроводниковой интегральной микросхеме нельзя заменить или даже исправить дефектный элемент. При наличии хотя бы одного дефектного элемента ИМС целиком бракуется. Плотность

дефектов, в свою очередь, определяется качеством технологического процесса и прежде всего процесса фотолитографии.

Качество защиты пластины оксидной пленкой, с помощью которой избирательно вводят примеси для получения *p*- и *n*-областей (рис. 1.29), зависит от ее однородности, сплошности. При наличии в слое диоксида кремния микроотверстий («проколов») примесь проникает через них, образуя в полупроводнике незапланированные легированные микрообласти, которые (в зависимости от их расположения) могут вывести соответствующий активный элемент из строя.

Причинами образования «проколов» являются неоднородности в светочувствительном слое и на его поверхности (пузырьки, инородные включения, частицы пыли, и т. п.), а также дефекты фотошаблона (царапины и «проколы» на непрозрачных участках или светонепроницаемые дефекты на прозрачных участках). Элемент (а следовательно, и вся микросхема) выходит из строя при попадании дефекта в некоторую критическую зону.

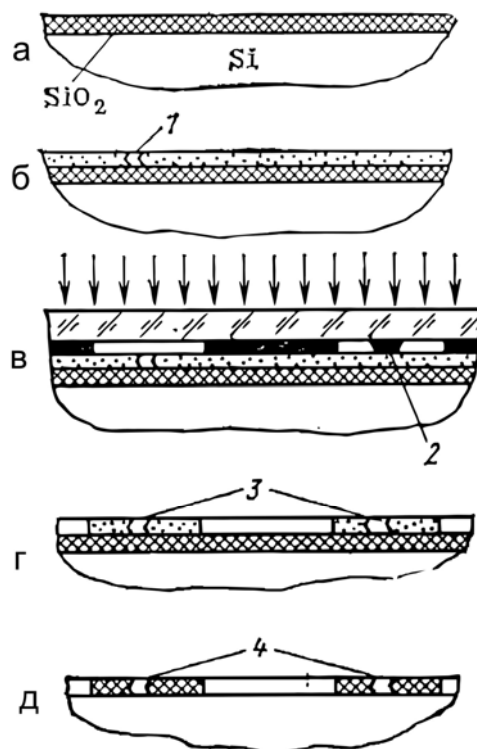


Рис. 1.29. Формирование маски из диоксида кремния а – окисление поверхности пластины; б – нанесение фотослоя (1 – «прокол» в фотослое); в – экспонирование через фотошаблон (2 – непрозрачный дефект на фотошаблоне); г – проявление и образование фотомаски (3 – «проколы» в фотомаске); д – травление диоксида кремния и снятие фотомаски (4 – «проколы» в диоксиде кремния)

Например, в процессе эмиттерной диффузии примесей через проколы в окисной маске могут образоваться высоколегированные микрообласти *n*+– типа. Такие области, если они приходятся на граничную зону коллекторных и базовых областей, приводят к возникновению токов утечки через *p*-*n*-переход и пробоем перехода (дефекты 2, см. рис. 1.29). Проколы в диоксиде кремния, образующиеся при вытравливании окон под металлические контакты, приводят на этапе нанесения металла к образованию паразитных

контактов (дефекты 1, см. рис. 1.29) и к коротким замыканиям областей эмиттер – база, база – коллектор, резистор – изолирующая область и т. д.

Повышение степени интеграции уменьшает процент выхода годных ИМС, если площади элементов и качество процесса фотолитографии остаются на неизменном уровне. Таким образом, повышение степени интеграции ИМС должно сопровождаться уменьшением размеров элементов и совершенствованием процесса литографии. Высокое качество фотолитографии предполагает прежде всего отсутствие в фотослое пылевидных частиц, газовых (воздушных) включений, остатков растворителя, а также высокое качество фотошаблонов (низкая плотность дефектов). В свою очередь, при изготовлении фотошаблонов также используются фотомаски, к которым предъявляются еще более жесткие требования.

Для повышения качества фотолитографических процессов в производственных помещениях создают обеспыленную атмосферу, а для производственного персонала устанавливают определенные правила производственной гигиены.

С другой стороны, повышение степени интеграции при неизменном качестве технологического процесса возможно за счет уменьшения площади, занимаемой элементами ИМС, и, следовательно, площади критических зон. К этому же результату приводит и сокращение числа циклов фотолитографии. Этот второй путь реализуется разработкой новых типов структур либо с уменьшенной площадью, либо таких, для производства которых требуется меньшее число фотолитографических циклов обработки (либо то и другое одновременно).

Для создания устройств более узкого функционального класса могут быть использованы специальные структуры, позволяющие достичь высокой степени интеграции ИМС. Примером могут служить структуры на приборах с зарядовой связью (ПЗС), на которых могут быть построены сдвиговые регистры, запоминающие устройства и некоторые логические элементы.

Для выбранной структуры ИМС минимальные размеры элементов зависят от возможностей фотолитографического процесса, который характеризуются тремя основными параметрами: 1) минимальным размером элемента, надежно воспроизводимым на полупроводниковой пластине, которым оценивается разрешающая способность процесса; 2) предельными отклонениями размеров элементов одного топологического слоя от номинальных; 3) предельным смещением последующего топологического слоя относительно предыдущего (например, базового слоя относительно коллекторного, эмиттерного относительно базового и т. д.). Эти параметры имеют характер технологических ограничений и учитываются при определении размеров областей в плане, т. е. при топологических чертежах. Основной тенденцией развития литографических процессов является повышение разрешающей способности этапа экспонирования рисунка.

Важнейшей причиной, ограничивающей минимальные размеры элементов при экспонировании через фотошаблон, является дифракция света. Поэтому стремятся использовать электро–магнитное излучение с более короткими, чем световые длины волн (электронные, рентгеновские). В

связи с этим все большее развитие получают электроно– и рентгенолитография. Детально процессы литографии рассматриваются в следующих главах.

Прежде, чем рассмотреть конкретные структуры интегральных микросхем, используемых при производстве различных изделий интегральной электроники, рассмотрим кратко общую характеристику основных процессов планарной технологии производства изделий интегральной электроники.

В зависимости от структуры ИМС и конструкции корпуса общее количество операций технологического процесса изготовления изделия может достигать 300 и более. Планарная технология охватывает разнообразные по физическим принципам, технологическому оснащению и методам контроля процессы обработки, направленные на создание изделий интегральной электроники, причем характер связей между отдельными операциями во времени и пространстве также весьма различен. Таким образом, процесс производства ИМС представляет собой систему, оптимальная организация которой имеет первостепенное значение для изготовления качественных изделий. Изменения в процессе производства, связанные, например, с изменением структуры ИМС, с изменением проектной нормы, увеличением диаметра полупроводниковых пластин, увеличением процента выхода годных ИМС, изменением объема выпуска ИМС и т. д., различным образом влияют на отдельные стадии производства ИМС. При этом с учетом непрерывного прогресса микроэлектроники организация производства ИМС по предметно–замкнутому принципу не является эффективной даже в условиях массового производства.

По своему назначению и месту, занимаемому в общем процессе производства ИМС, все операции объединяются в самостоятельные (частные) технологические процессы, которые, в свою очередь, могут быть подразделены на три большие группы.

Первая группа включает заготовительные процессы, имеющие целью получение монокристаллических полупроводниковых слитков определенного типа электропроводности и заданного удельного сопротивления, резку слитков на пластины, обработку поверхностей пластин с заданной микро– и макрогеометрией, а также качеством поверхностного слоя, изготовление отдельных деталей и узлов корпуса ИМС, сборка узлов корпуса.

Вторая группа процессов – обрабатывающая – объединяет все операции, необходимые для формирования структур ИМС в групповых процессах и их контроля на функционирование. Сюда входят процессы фотолитографии, эпитаксии, окисления, термической диффузии примесей, ионной имплантации, формирования функциональных слоев (металлических, диэлектрических, полупроводниковых, изолирующих и т.д.), теххимической обработки.

В третью группу процессов, которую называют сборочно–контрольной, входят разделение пластины на отдельные кристаллы, монтаж кристаллов в корпуса, разварка выводов, герметизация, контроль и классификация, механические и климатические испытания, окраска, маркировка и упаковка.

Первая группа процессов является обеспечивающей для процессов второй и третьей групп и по своему характеру близка к приборостроительному производству. Специфичность методов обработки и оборудования этой группы, а также независимость их от конкретной структуры ИМС обычно организуется на специализированных предприятиях, связанных с предприятиями, составляющими вторую и третью группы процессов, договорами на поставку продукции.

Третья группа процессов также характеризуется специфическими методами обработки и оборудованием, но имеет более тесную связь с процессами второй группы. В большинстве случаев целесообразной формой организации процессов третьей группы является создание специализированных цехов или участков (в зависимости от масштабов производства) в пределах одного предприятия.

Наиболее полно особенности структуры ИМС и главные черты планарной технологии отражаются второй группой процессов. Несмотря на разнообразие физико-химических принципов, лежащих в основе процессов этой группы, их объединяет ряд характерных признаков, требующих концентрации этих процессов на различных участках одного предприятия. Важнейшие из этих признаков следующие:

1) взаимосвязь производственных участков, обусловленная цикличностью технологического процесса (пластины многократно возвращаются на определенные участки для формирования очередного функционального слоя и для подготовки поверхности пластины или поверхности предыдущего функционального слоя к последующим технологическим операциям);

2) ограниченное время межоперационного хранения партии пластин;

3) высокие требования к производственной гигиене (1–2–й классы помещений по климатическим параметрам и 1–2–й классы по запыленности воздушной среды).

Характер и последовательность операций, составляющих процессы второй группы, полностью определяются типом структуры ИМС. Режимы обработки на отдельных операциях зависят от толщины и электрофизических свойств слоев и отдельных областей структуры.

1.8. Основные типы структур интегральных микросхем

При сравнительной оценке различных типов структур ИМС обычно рассматривают ряд конструктивно-технологических показателей:

1) качество межэлементной изоляции, которое определяется удельной емкостью (пФ/мкм²);

2) площадь, занимаемую типичным функциональным элементом ИМС-вентилем;

3) количество циклов легирования;

4) количество циклов фотолитографии.

Среди планарных структур, в которых использованы биполярные транзисторы, исторически более ранней является диффузионно-планарная структура (см. рис. 1.30). Функции межэлементной изоляции в ней

выполняют $p-n$ -переходы, смещенные в обратном направлении и ограничивающие области отдельных активных элементов. Для получения обратно смещенного $p-n$ -перехода в области подложки, разделяющей элементы, формируется омический контакт, связанный с наиболее низким потенциалом источника питания, а к изолирующим областям резисторов с помощью контактов подводится высокий потенциал.

В качестве исходной заготовки используют пластину монокристаллического кремния, равномерно легированную акцепторной примесью (дырочная электропроводность). После того как на заготовку нанесен слой оксида кремния SiO_2 , (рис. 1.6) в этом слое с использованием фотолитографии избирательно вытравливают участки прямоугольной формы, которые называют – окнами, и через эти окна путем термической диффузии вводят атомы примеси–донора (рис. 1.6. а, б, в). Процесс диффузии совмещают с термическим окислением кремния, в результате которого на поверхности вновь образуется сплошной слой SiO_2 .

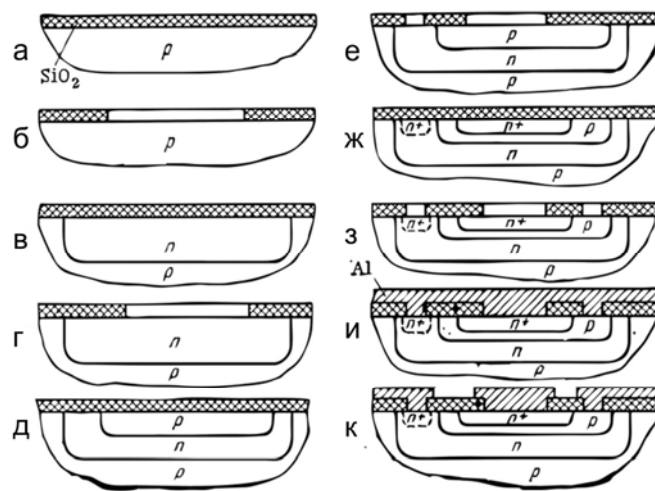


Рис. 1.30. Последовательность формирования диффузионно–планарной структуры: а – исходная пластина; б, г, е – вскрытие окон в окисле перед диффузией примеси в коллекторные, базовые и эмиттерные области соответственно; в, д, ж – диффузия примеси в коллекторные, базовые и эмиттерные области соответственно и окисление поверхности; з – вскрытие окон под контакты к диффузионным областям; и – металлизация поверхности; к – избирательное травление металлической пленки и образование межсоединений

Таким образом, одновременно создаются коллекторные области всех транзисторов, а также изолирующие области всех диодов и резисторов для всех кристаллов партии пластин. Затем вновь вскрывают окна меньших размеров в окисле и последующей диффузией акцепторной примеси создают базовые области транзисторов p -типа проводимости, а также области p -типа проводимости анодов диодов и резисторов. В результате очередного (третьего) цикла фотолитографии, диффузии и окисления получают области эмиттеров, катодов диодов, а также высоколегированные области для последующего создания омических контактов к высокоомным коллекторным и изолирующим областям.

Для создания межэлементных связей в слое SiO_2 вновь вскрывают окна и на пластину наносят металлическую пленку (обычно алюминиевую). При этом в местах, свободных от SiO_2 , образуется контакт с соответствующими областями кремния. Заключительный цикл фотолитографии (по пленке алюминия) позволяет создать систему токоведущих дорожек (межсоединений), а также контакты по периферии кристаллов. Эти контакты будут использованы для коммутации кристаллов с внешними выводами корпуса.

Планарный транзистор (независимо от типа структуры) имеет коллекторный контакт в одной плоскости с базовым и эмиттерным контактами. Вследствие этого коллекторный ток преодолевает протяженный горизонтальный участок дна коллекторной области (под дном базы), имеющий малые поперечные размеры.

В диффузионном коллекторе концентрация активной примеси распределена по глубине неравномерно: она максимальна на поверхности и равна нулю – на дне коллектора, – поэтому слой коллектора под базой имеет высокое сопротивление, что увеличивает напряжение насыщения и время переключения транзистора.

Равномерное распределение примеси по толщине коллектора может быть получено с помощью процесса эпитаксиального наращивания кремния с дозированным количеством донорной примеси. Такой процесс применяют при создании эпитаксиально– планарной структуры.

При формировании эпитаксиально–планарной структуры, в качестве исходной заготовки по–прежнему используют монокристаллическую пластину кремния, равномерно легированную акцепторной примесью. Для нанесения эпитаксиального слоя на одну из сторон пластины с ее поверхности стравливают оксид и поверхность тщательно очищают (рис. 1.31). Затем проводят осаждение монокристаллического слоя кремния n -типа проводимости. Далее поверхность пластины окисляют и с использованием фотолитографии вскрывают окна в виде узких замкнутых дорожек, соответствующих контуру коллекторных и изолирующих областей ИМС. Проводя через окна диффузию акцепторной примеси до смыкания ее с p -областью, получают таким образом изолированные друг от друга островки равномерно легированного эпитаксиального n -кремния. Рассмотренный процесс диффузии называют изолирующей или разделительной диффузией. В полученной на данной стадии заготовке (рис. 1.31) в дальнейшем формируют базовые и эмиттерные области (диффузионным методом), а также контакты и межсоединения (так же как в диффузионно–планарной структуре).

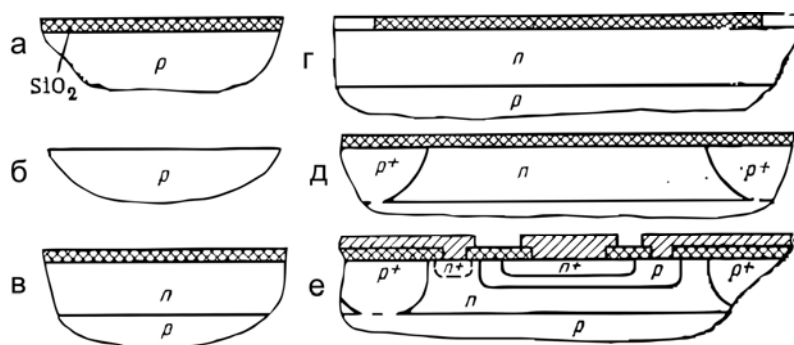


Рис. 1.31. Последовательность формирования эпитаксиально–планарной структуры а – исходная пластина; б – стравливание окисла, подготовка поверхности; в – эпитаксиальное наращивание n -слоя, окисление поверхности; г – вскрытие окон в окисле под изолирующую (разделительную) диффузию примеси; д – диффузия акцепторной примеси, окисление поверхности; е – готовая структура после формирования диффузионных базовых и эмиттерных областей, а также получения межсоединений

Концентрация легирующей примеси в эпитаксиальных пленках может изменяться в широких пределах. Однако с повышением концентрации примеси в эпитаксиальном коллекторе снижается пробивное напряжение перехода база – коллектор (рис. 1.32).

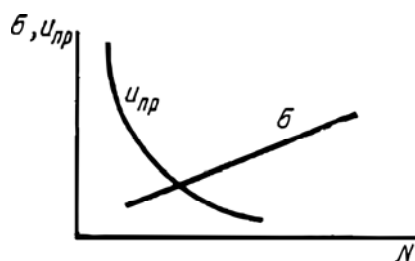


Рис. 1.32. Характер зависимости проводимости σ эпитаксиального слоя и напряжения пробоя $U_{пр}$ перехода от концентрации легирующей примеси n -типа проводимости

Компромиссное решение удастся получить в эпитаксиально–планарной структуре со скрытым слоем (рис. 1.33). В этом случае эпитаксиальный коллектор легируют умеренно (необходимую концентрацию примеси рассчитывают из условия пробоя перехода база – коллектор), а малое сопротивление коллектора обеспечивают параллельно включенным скрытым слоем ($n+$), имеющим высокую концентрацию примеси.

Основные операции технологического процесса получения эпитаксиально–планарной структуры со скрытым слоем приведены на рис. 1.33. В поверхностном оксидном слое пластины p -типа проводимости вскрываются окна, через которые в течение определенного времени проводят диффузию примеси, чтобы получить области с высокой концентрацией. Для того чтобы избежать значительного проникновения примеси в эпитаксиальный коллектор при последующих циклах высокотемпературной обработки (разделительная диффузия, базовая диффузия и т. д.), подбирают примесь с малым коэффициентом диффузии (например, мышьяк). Далее поверхность освобождают от оксида и наращивают эпитаксиальный слой кремния n -типа. После окисления поверхности процесс обработки протекает по той же схеме, что и для структуры без скрытого слоя. В диффузионно– и эпитаксиально–планарных структурах межэлементная изоляция обеспечивается, как было отмечено ранее, обратносмещенными p - n -переходами. Напряжение смещения изолирующего p - n -перехода обычно составляет несколько вольт (напряжение питания). Такие переходы имеют достаточно высокие значения токов утечки и емкостей. В результате уменьшается быстродействие микросхемы, а расстояние между элементами приходится делать увеличенными.

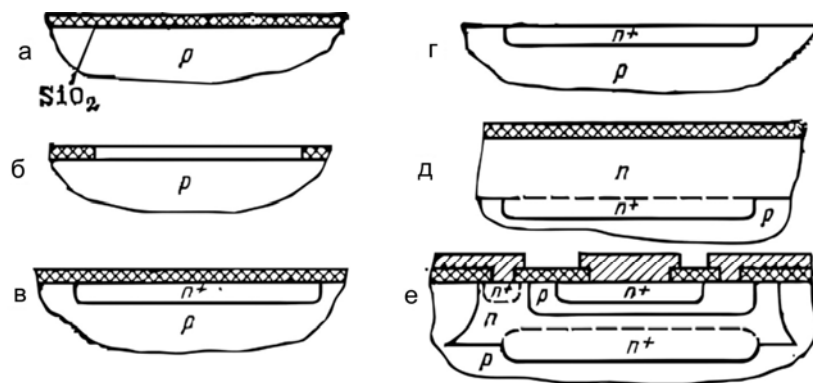


Рис. 1.33. Последовательность формирования эпитаксиально–планарной структуры со скрытым n^+ -слоем: а – исходная пластина; б – вскрытие окон под диффузию скрытого слоя; в – диффузия n^+ -примеси, окисление поверхности; г – стравливание окисла, подготовка поверхности; д – эпитаксиальное наращивание n -слоя, окисление поверхности; е – готовая структура после разделительной диффузии, формирования базовых и эмиттерных областей, а также межсоединений

Наилучшие значения параметров электрической развязки элементов на кристалле обеспечивает структура с диэлектрической изоляцией (рис. 1.34). В этой структуре каждый элемент размещен в своеобразной области, представляющей собой область монокристаллического кремния, ограниченную слоем оксида кремния и напоминающую форму “кармана”. При этом расстояние между элементами может быть уменьшено до 8–10 мкм.

На рис. 1.34 представлена последовательность формирования структуры с диэлектрической изоляцией. В исходной пластине кремния n -типа проводимости с использованием фотолитографии вытравливают участки оксида кремния, а затем и кремния по контуру будущих элементов. В результате образуются канавки по замкнутому контуру. Полученную рельефную поверхность окисляют. Далее методом осаждения эту поверхность покрывают толстым слоем поликристаллического кремния. При осаждении из газовой фазы вследствие дезориентирующего влияния оксидного слоя кремний имеет поликристаллическую структуру и служит конструкционным основанием будущей ИМС. Обратную сторону кремниевой пластины шлифуют, удаляя монокристаллический слой до вскрытия оксида кремния по границам областей, и производят доводку (для удаления нарушенного слоя). После протравливания и отмывки поверхности ее окисляют.

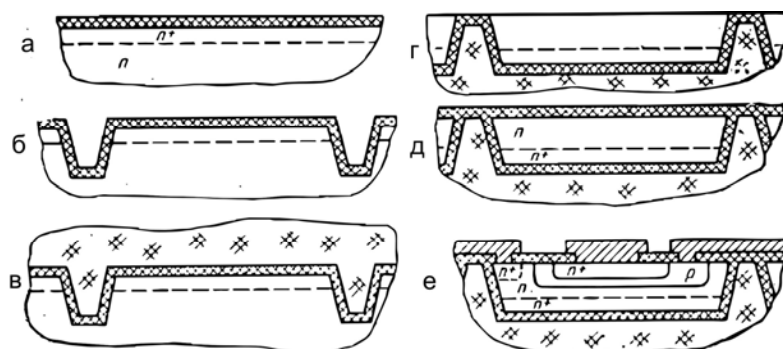


Рис. 1.34. Последовательность формирования изолированных областей в структуре с диэлектрической изоляцией: а – исходная пластина; б – избирательное травление окисла, глубокое травление кремния, окисление поверхности; в – осаждение поликристаллического кремния; г – шлифование в полирование обратной стороны пластины; д – окисление поверхности; е – готовая структура после базовой и эмиттерной диффузии и получения межсоединений

Далее в образовавшихся изолированных областях монокристаллического кремния n -типа проводимости термической диффузией формируют базовые области, диффузионные резисторы, эмиттеры, области под контакты. Нанесают металлические слои и формируют необходимой формы межсоединения на поверхности пластины. Если исходная пластина содержит эпитаксиальный n^+ -слой, то транзисторы получаются со скрытым n^+ -слоем.

Структуры с диэлектрической изоляцией характеризуются большими затратами на их изготовление, главным образом из-за необходимости шлифования и полирования подложек. Кроме этого из-за нарушения монолитности подложки, обусловленного нанесением толстого слоя поликристаллического кремния, в формируемой структуре возникают остаточные напряжения, которые могут вызвать коробление пластины после удаления монокристаллического слоя. Коробление пластины, в свою очередь, может привести к появлению трещин в пластине.

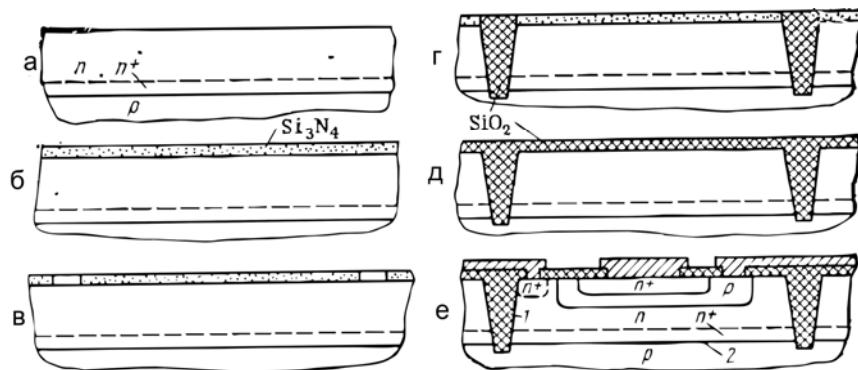


Рис. 1.35. Последовательность формирования изолированных областей в изопланарной структуре а – пластина с эпитаксиальным и скрытым слоями; б – нанесение слоя нитрида кремния; в – избирательное травление нитрида кремния по контуру будущих элементов; г – глубокое окисление кремния; д – стравливание нитрида кремния и окисление поверхности; е – готовая структура после формирования базовых и эмиттерных областей, а также межсоединений

Это обусловило поиск комбинированных методов изоляции элементов на кристалле. На рис. 1.35, е представлена изопланарная структура транзистора, в которой донная часть 2 коллектора изолирована от монокристаллической пластины p - n -переходом, а боковая 1 – толстым слоем оксида кремния, полученным сквозным локальным окислением эпитаксиального слоя. Такая структура аналогична эпитаксиально-планарной, при изготовлении которой разделительная диффузия заменена сквозным окислением.

Начальные стадии процесса получения изопланарной структуры следующие (рис. 1.35). На поверхность пластины, содержащей эпитаксиальные n^+ - и n -слои, осаждают (из газовой фазы) слой нитрида кремния Si_3N_4 . С использованием фотолитографии в этом слое формируют защитную маску с окнами по контуру коллекторных областей. В процессе окисления нитридная маска сохраняется. Затем ее стравливают и всю поверхность окисляют. Далее проводят диффузию для формирования базы и эмиттера, затем формируют контактные окна и межсоединения.

Недостатком изопланарной структуры является необходимость при ее формировании длительного окисления для образования разделительных областей SiO_2 , что может вызвать нежелательное перераспределение примеси из скрытого слоя в эпитаксиальный коллектор. Для сокращения времени, затрачиваемого на окисление, уменьшают толщину эпитаксиального слоя и соответственно базы и эмиттера. На практике изопланарный процесс обычно выполняется при толщине эпитаксиального слоя не более 3–4 мкм.

Усовершенствованным вариантом рассмотренной структуры является структура с изолирующими V -канавками (рис. 1.36, е). При ее формировании проводят сквозное протравливание эпитаксиального слоя с последующим окислением поверхностей полученных канавок и заполнением оставшихся пустот поликристаллическим кремнием. Такая структура получила название полипланарной.

На начальных этапах получения полипланарной структуры (рис. 1.6) кремниевую пластину с предварительно сформированными n^+ - и n -эпитаксиальными слоями окисляют. Затем с использованием фотолитографии в слое оксида кремния вскрывают окна, замкнутые по контуру будущих элементов. Далее методом анизотропного травления получают канавки строго определенной (V -образной) формы. Ширина a канавки и ее глубина d связаны соотношением $a/d=1,41$. Для надежной изоляции на кристалле элементов ИМС глубина канавки должна быть немного больше толщины эпитаксиального слоя. Использование специальных травителей обеспечивает получение канавок практически без бокового подтравливания.

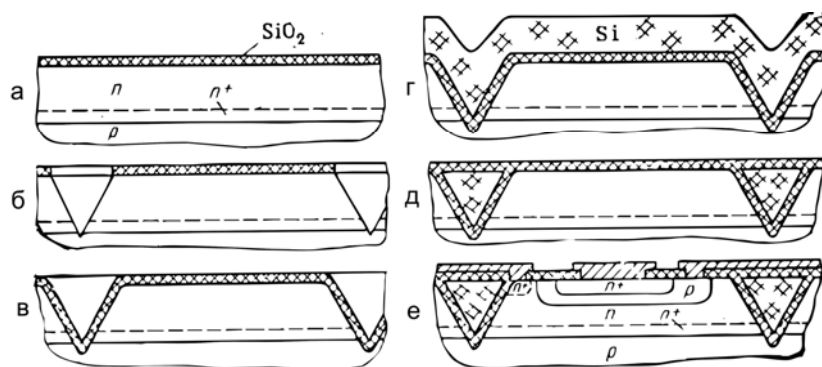


Рис. 1.36. Последовательность формирования изолированных областей в полипланарной структуре а – пластина с эпитаксиальным и скрытым слоями, покрытая оксидом кремния; б – избирательное травление оксида кремния и анизотропное травление кремния; в – стравливание оксида кремния и окисление всей поверхности; г – осаждение поликристаллического кремния; д – шлифование, полирование и окисление поверхности; е – готовая

структура после формирования базовых и эмиттерных областей, а также межсоединений

Затем поверхность окисляют и на нее осаждают поликристаллический кремний, толщиной, необходимой для полного зарастивания всех канавок. Путем шлифования с последующим полированием снимают излишки кремния до вскрытия оксидной пленки. После окисления поверхности окончательно формируют транзисторы, диоды и другие элементы ИМС.

Специфическим недостатком описанной структуры является необходимость применять пластины с ориентацией поверхности в плоскости (100), которая не является наилучшей с точки зрения характеристик, необходимых для формирования активных элементов, но удовлетворяет требованиям анизотропного травления. Существенным недостатком структуры является введение в процесс операций механической обработки – шлифования и полирования поверхности пластины.

При изготовлении структур с диэлектрической и комбинированной изоляциями можно применять пластины со сформированным сплошным скрытым слоем. У таких пластин толщина основания из p -Si составляет 300–550 мкм ($\rho = 10$ Ом·см), толщины эпитаксиального n -слоя – 2,5–20 мкм ($\rho = 0,15 \dots 7$ Ом·см), скрытого n^+ -слоя – 3–15 мкм (удельное поверхностное сопротивление 10–50 Ом).

Анализ рассмотренных структур производства интегральных микросхем по биполярной технологии показывает, что их развитие от изоляции p - n -переходами до создания специальных изолирующих областей в кремниевой пластине обеспечило формирование качественной изоляции, создало условия для более компактного размещения элементов на кристалле и в конечном счете к улучшению электрических характеристик, в частности к значительному повышению быстродействия ИМС. При этом площадь, занимаемая транзисторами, а, следовательно, и типовым элементом – вентилем практически не изменилась.

Особый случай представляет структура интегральной инжекционной логики (И2Л), в которой формируются горизонтальный и вертикальный транзисторы, а резисторы, занимающие обычно большую площадь, заменены транзисторами, что позволило существенно уменьшить размеры вентиля. Разрез и схема вентиля при изготовлении структуры И2Л будут рассмотрены после анализа структур интегральных микросхем изготавливаемых по технологии «металл–диэлектрик (оксид кремния)–полупроводник»: МДП или (МОП) –технологии.

Существенное уменьшение площади под вентиль с одновременным упрощением технологии имеет место при использовании структур «металл–диэлектрик–полупроводник» (МДП–структуры). Основным элементом микросхем на МДП–структурах является МДП–транзистор с индуцированными каналами n - или p -типа проводимости.

МДП(МОП)–транзистор имеет симметричную структуру (рис. 1.37, е) На рисунке приведена структура с двумя транзисторами, один МДП–транзистор с каналом n - типа проводимости, второй с каналом p -типа проводимости. Такая структура называется структурой с взаимно

дополняющими транзисторами или комплементарной структурой (КМДП–структурой). Она включает области истока, области стока и изолированные затворы, с помощью затворов можно индуцировать каналы соответственно n - и p -типов проводимости и управлять величинами этих проводимостей. Так как переходы, ограничивающие области истоков и стоков, всегда смещены в обратном направлении и перенос основных носителей заряда происходит в тонком приповерхностном слое полупроводника между истоком и стоком каждого транзистора, то дополнительных мер для взаимной изоляции приборов с одноименным типом проводимости канала не требуется. Для предотвращения образования паразитных каналов вводят охранные (каналоограничивающие) области.

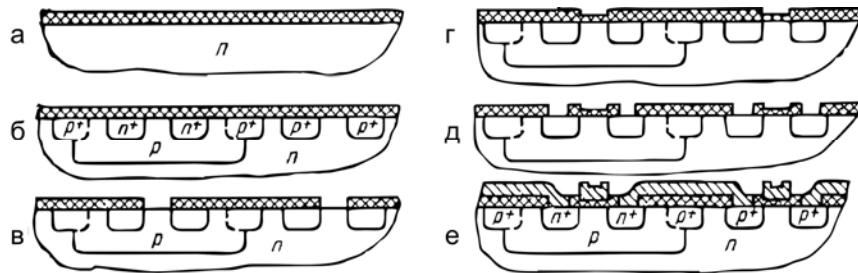


Рис. 1.37. Последовательность формирования КМДП–структуры: а – исходная пластина; б – последовательное получение p –, p^+ и n^+ –областей методом диффузии; в – избирательное травление SiO_2 ; г – термическое окисление кремния (получение подзатворного диэлектрика); д – избирательное травление SiO_2 под контакты к истокам и стокам; е – готовая структура после получения межсоединений

Структура, содержащая МДП–транзисторы обоих типов, позволяет на 2–3 порядка по сравнению с n - или p -МДП–структурами снизить мощность, потребляемую устройством в статическом режиме. Обычно КМДП–структуры формируют в пластине n -типа проводимости и все транзисторы с n -каналами объединяют в одной дополнительно сформированной p -области–кармане. Для взаимной изоляции МДП–транзисторов n - и p -типов проводимости в КМДП–структуре формируют дополнительную охранную область p^+ -типа проводимости.

Последовательность получения КМДП–структуры представлена на рис. 1.38. С использованием фотолитографии и диффузии формируют p -области–карманы, далее создают p^+ -области истоков и стоков p -канальных приборов, а также охранные области p^+ -типа проводимости а затем в p -области–кармане – n^+ -области истоков и стоков n -канальных транзисторов. Для формирования областей затворов с использованием фотолитографии вытравливают окна в диоксиде кремния SiO_2 , а затем методом термического окисления кремния получают в них тонкие слои SiO_2 расчетной толщины (диэлектрик под будущим затвором). Далее вскрывают в окисле окна под контакты и формируют межсоединения (включая и электроды затворов).

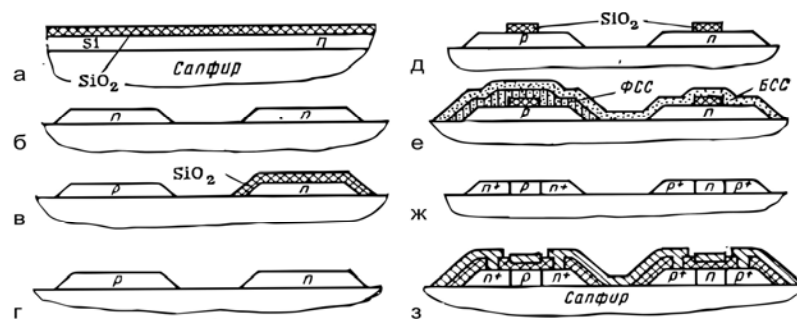


Рис. 1.38. Последовательность формирования КМДП–КНС–структуры: а – исходная пластина «сапфир – эпитаксиальный кремний – оксид кремния»; б – избирательное анизотропное травление кремния с помощью оксидной маски (образование островков); в – избирательная диффузия акцепторной примеси; г – снятие маски с островков; д – маскирование островков с помощью SiO_2 ; е – избирательное покрытие фосфорсиликатным стеклом (ФСС) p -островков и общее покрытие боросиликатным стеклом (БСС); ж – структура после диффузии примесей и травливания БСС, ФСС и SiO_2 ; з – готовая структура после нанесения SiO_2 и формирования межсоединений

Полная изоляция МДП–транзисторов обеспечивается при формировании их в виде островков на монокристаллической изолирующей пластине (рис. 1.38, д). В качестве изолирующей пластины обычно используют синтетический сапфир, который имеет достаточно хорошую кристаллографическую совместимость с кремнием. Поэтому эти структуры получили название «структур кремний на сапфире» или сокращенно КНС–структуры. Эпитаксиально выращенный на сапфире кремний имеет высокую плотность структурных нарушений (вакансии, дислокации), что заметно снижает подвижность носителей заряда. Вследствие этого структуры на биполярных транзисторах оказались не эффективными и наиболее широкое применение нашли МДП–КНС–структуры, особенно КМПД–КНС–структуры. В отличие от структур, изолированных p – n –переходом, когда используется высокоомная (низколегированная) пластина, структуры на изолирующей сапфировой подложке устойчивы к температурным и радиационным воздействиям.

В процессе формирования КМДП–КНС–структуры (рис. 1.38) методом эпитаксиального наращивания (процесс гетероэпитаксии) создают сплошной слой высокоомного n –Si. После маскирования оксидом кремния и анизотропного травления получают отдельные изолированные островки n –Si. Затем проводят повторное маскирование оксидом кремния и термической диффузией часть островков легируют акцепторной примесью на всю глубину, превращая их в островки p –Si. После этого защищают маской из оксида кремния участки будущих каналов и избирательно покрывают p –островки фосфоро–силикатным ($\text{SiO}_2 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$), а n –островки – боросиликатным ($\text{SiO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$) стеклами. Нагревая структуру осуществляют диффузию

донорной (фосфор) и акцепторной (бор) примесей из фосфоро– и боросиликатных стекол в области стоков и истоков. Затем стекла и участки SiO₂ травливают, наносят слой оксида кремния, вытравливают участки оксида под затвор, выращивают тонкий качественный подзатворный слой диэлектрика и формируют металлические электроды затворов, а также межсоединения. Гетероэпитаксиальные слои, полученные в таких структурах, имеют небольшую толщину (~1мкм), что обусловлено относительным несовершенством кристаллической структуры кремния, выращенного на сапфире: с увеличением толщины пленки кремния плотности вакансий и дислокации увеличиваются.

Таблица 1.1. Сравнительные характеристики основных типов структур интегральных микросхем:

Основные типы структур микросхем	Емкость изоляции 10 ⁻⁴ , пФ/мкм ²	Площадь на один вентиль, мм ²	Число циклов легирования	Число циклов в литографии
Диффузионно–планарная	2	0,025	3	5
Эпитаксиально–планарная без скрытого слоя	1,5	0,025	3	5
Эпитаксиально–планарная со скрытым слоем	1,5	0,02	4	6
С инжекционным питанием (И ² Л)	1	0,003	3	5

С диэлектрич еской изоляцияй	0,03	0,02	2	5
Изопланарн ая	0,2	0,02	2	5
Полипланар ная	0,15	0,02	2	5
<i>n</i> -МДП	1,5	0,0036	2	5
<i>p</i> -МДП	1,5	0,0068	2	5
КМДП	1,5	0,012	3	6
КМДП- КНС	0,002	0,01	3	8

МДП–микросхемы, в которых в качестве канала используется тонкий приповерхностный слой, вполне могут быть реализованы в тонких эпитаксиальных слоях порядка десятых долей микрометра. Однако тонкие эпитаксиальные слои практически исключают возможность многократного образования оксида кремния за счет термического окисления, так как толщина слоя SiO₂, необходимого для защиты при термической диффузии, соизмерима с толщиной такого эпитаксиального слоя. Поэтому обычно слои оксида кремния получают методом осаждения из газовой фазы, что, кстати, позволяет использовать относительно низкие температуры.

Для производства КМДП – ИМС на основе КНС–структур целесообразно применять сапфировые пластины с эпитаксиальным слоем кремния. Слой кремния *n*-типа имеет ориентацию поверхности пластины в плоскости(100) и толщины 0,6; 0,8 и 1,2 мкм; подвижность носителей в гетероэпитаксиальном слое толщиной 1,2 мкм не менее 300 см²/(В с).

Сравнительная характеристика рассмотренных структур приведена в табл.1.1. Описанные структуры являются основными и естественно не исчерпывают всех типов и модификаций, которые используются в серийном производстве ИМС или разрабатываются как перспективные.

На рис. 1.39 представлены структуры ИМС (на примере инвертора). Сокращение площади структуры *S* в случае КМДП достигнуто заменой коллекторного резистора дополняющим (нагрузочным) МДП–транзистором, а в случае И²Л–структуры – многоколлекторным биполярным транзистором, причем благодаря применению *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов достигается совмещение отдельных областей переключательного транзистора и транзистора–инжектора. Во всех трех случаях сохраняется свойство универсальности структур: каждая из них пригодна для построения широкого класса функциональных изделий интегральной электроники.

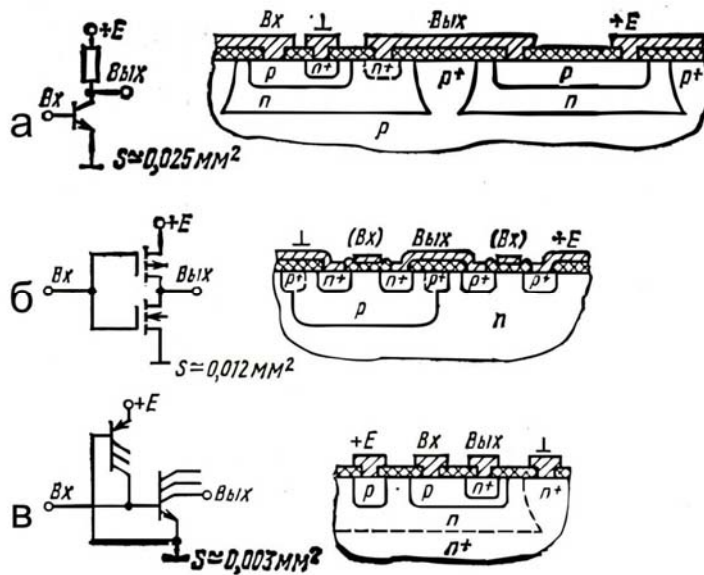
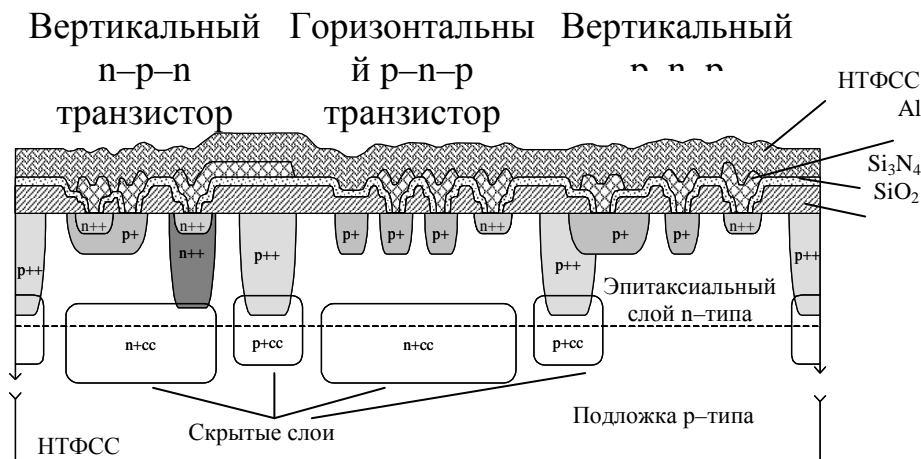


Рис. 1.39. Реализация инвертора с помощью различных структур микросхем а – эпитаксиально–планарная структура с питанием через резистор; б – КМДП–структура; в – структура с инжекционным питанием (И²Л–структура)

1.9. Процесс изготовления биполярных ИМС

Как известно, существуют два типа биполярных транзисторов: $n-p-n$ и $p-n-p$. В качестве элементов ИМС, как правило, используются оба типа транзисторов. Их формирование осуществляется в едином технологическом процессе. Структура планарных $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторов в составе биполярной ИМС приведено на рис. 1.40.

Кроме того, в составе биполярных ИМС широко используются и пассивные элементы (резисторы, конденсаторы). Причем, резисторы могут формироваться как непосредственно в объеме полупроводниковой подложки в одном из слоёв транзистора, так и на ее поверхности отдельным слоем из резистивного материала, например, поликристаллического кремния (ПКК). Конденсаторы, как правило, формируются за счет использования в качестве нижней обкладки эмиттерной $n+$ –области, а верхней – металлического слоя, либо используется барьерная ёмкость эмиттерного $p-n$ –перехода. В качестве конденсаторного диэлектрика могут использоваться слои нитрида кремния Si_3N_4 либо диоксида кремния SiO_2 . Варианты устройства пассивных элементов в составе ИМС представлены на рис. 1.41.



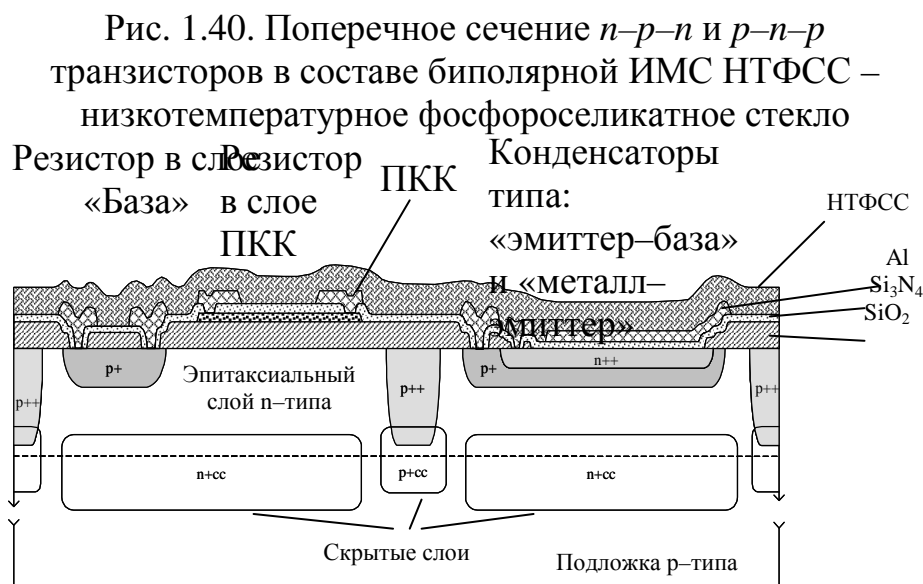


Рис. 1.41. Поперечное сечение $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторов в составе биполярной ИМС

Биполярные $n-p-n$ транзисторы, как правило, формируются в кремниевом эпитаксиальном слое с относительно высоким удельным сопротивлением. Типовые значения параметров слоёв интегральных усилительных и переключающих транзисторов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Типовые конструктивные параметры интегральных транзисторов

Наименование параметров	Усилительный транзистор с изоляцией $p-n$ переходом	Переключающий транзистор с изоляцией $p-n$ переходом
Эпитаксиальный слой		
Толщина, мкм	10	3
Удельное сопротивление, Ом×см	1	0,3÷0,8
Скрытый слой		
Поверхностное сопротивление, Ом/□	20	20
Диффузия эпитаксиальный слой, мкм	2,5	1,4
Эмиттер		
Глубина залегания, мкм	2,5	0,8
Поверхностное сопротивление, Ом/□	5	12
База		

Глубина диффузии, мкм	3,25	1,3
Поверхностное сопротивление, Ом/□	100	200
Подложка		
Удельное сопротивление, Ом×см	10	10
Ориентация	[111]	[111]

Назначение эпитаксиального слоя – формирование слаболегированной коллекторной области, необходимой для обеспечения высоких значений пробивных напряжений коллектор–база. Одновременно для снижения сопротивления коллектора в подложке формируется скрытый слой сильнолегированного кремния $n+$ -типа (как правило, легированием сурьмой). Включение в транзисторную структуру скрытого слоя снижает сопротивление коллектора с нескольких кОм до нескольких сотен Ом. Для еще большего снижения сопротивления коллектора диффузией примеси $n+$ -типа (фосфор) формируется, так называемая область глубокого коллектора, достигающая $n+$ -скрытого слоя. Это позволяет снизить последовательное сопротивление коллектора до 10 Ом.

Область разделительной диффузии также должна соединиться с областью $p+$ -скрытого слоя сопротивлением 200 – 500 Ом/□, формируемой в подложке легированием бором, (это также обеспечивает снижение сопротивления коллектора $p-n-p$ вертикального транзистора). Области базы и эмиттера выполняются с помощью последовательных операций диффузии.

Одновременно с формированием вертикального $n-p-n$ транзистора в одном кристалле формируются вертикальный $p-n-p$ и горизонтальный $p-n-p$ транзисторы. Для вертикального $p-n-p$ транзистора эмиттером обычно служит область базы $n-p-n$ транзистора. Эпитаксиальный слой при этом выполняет функцию базы, а $p-n$ переход, сформированный $p+$ -скрытым слоем в подложке и областью разделения $p+$ -типа, выполняет функцию коллектора. Поскольку в данном случае $p+$ – коллектором является подложка ИС, то он не изолирован от коллекторов остальных вертикальных $p-n-p$ транзисторов. По этой причине транзисторы данного типа могут использоваться только в ИС с коллектором, заземленным по переменному току.

В горизонтальном $p-n-p$ транзисторе базовые области p -типа $n-p-n$ транзистора используются в качестве эмиттера и коллектора. Областью базы также служит часть эпитаксиального слоя n -типа. Две области p -типа располагают на минимальном расстоянии друг от друга. В такой структуре транзистор работает в поперечном направлении, т.е. параллельно поверхности кристалла между областями эмиттера и коллектора. В данной структуре отсутствуют преимущества объемной структуры. За счет дефектов в приповерхностной области подвижность основных и неосновных носителей значительно ниже, чем в объеме. Поэтому усилительные и

частотные характеристики таких транзисторов значительно хуже, чем у вертикальных $n-p-n$ транзисторов. В горизонтальном $p-n-p$ транзисторе обе коллекторные области соединены и полностью окружают эмиттерную область, что позволяет повысить коэффициент усиления. В структуре создается также скрытый n^+ -слой, который уменьшает сопротивление базы и подавляет экстракцию дырок $p-n$ перехода между эпитаксиальным слоем – подложка.

Эволюция структуры биполярной ИМС, содержащей $n-p-n$, горизонтальный и вертикальный $p-n-p$ транзисторы, ионно-легированный и поликремниевый резисторы и конденсатор показана на рисунках 1.42, а–к.

Изготовление биполярной ИМС осуществляют в следующей последовательности:

- формирование партии пластин монокристаллического кремния марки КДБ10 ориентации [111] с удельным сопротивлением $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 1.42, а) (на данном этапе на пластины лазерным маркировщиком наносят номер партии и номер пластины);

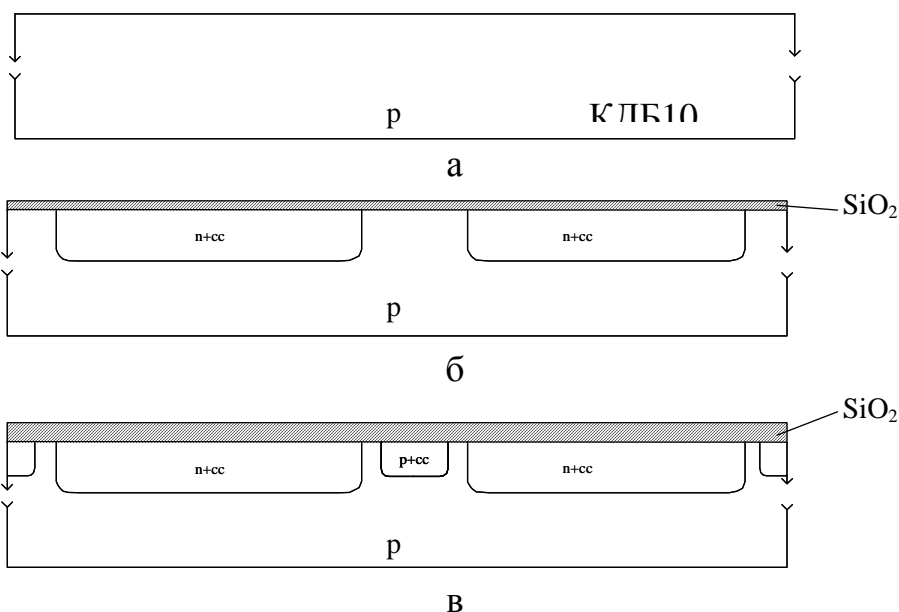
- химическая обработка пластин, термическое окисление, фотолитография « n^+ -скрытый слой», травление окисла, ионное легирование сурьмой, термообработка (разгонка сурьмы), удаление слоя SiO_2 химическим травлением, термическое окисление (рис. 1.42, б).

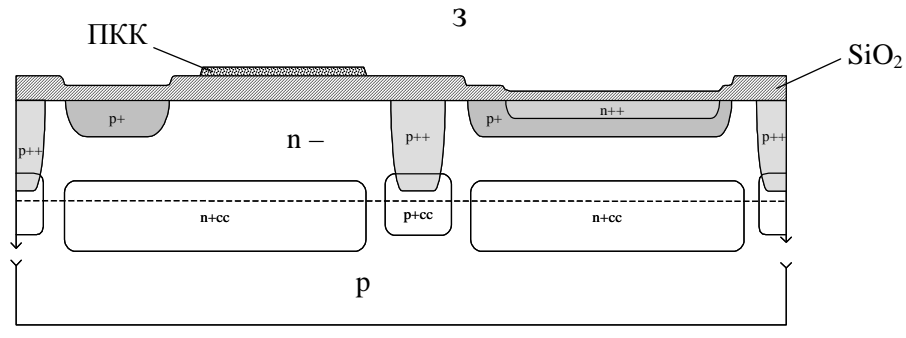
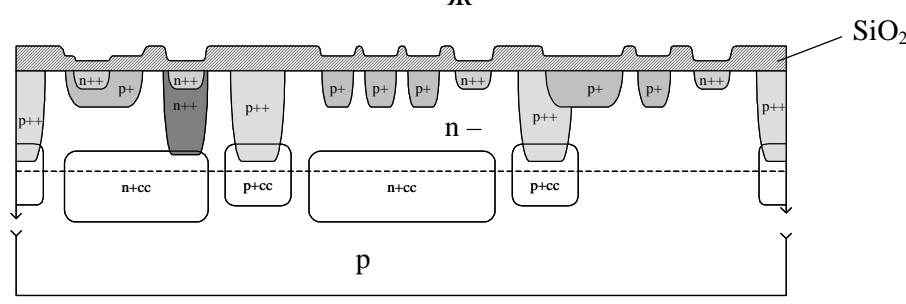
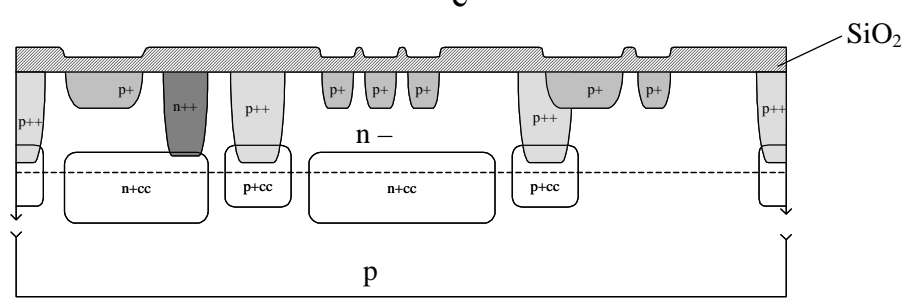
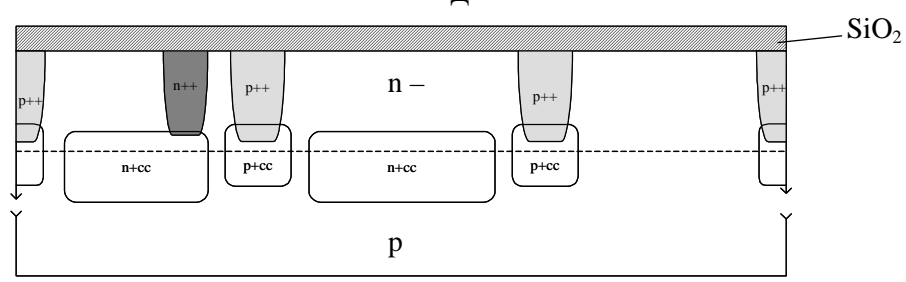
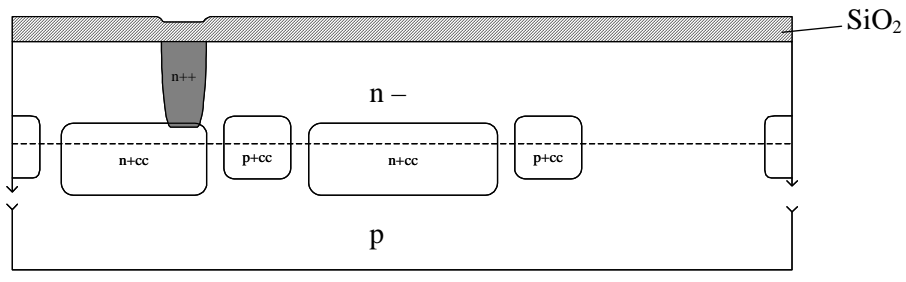
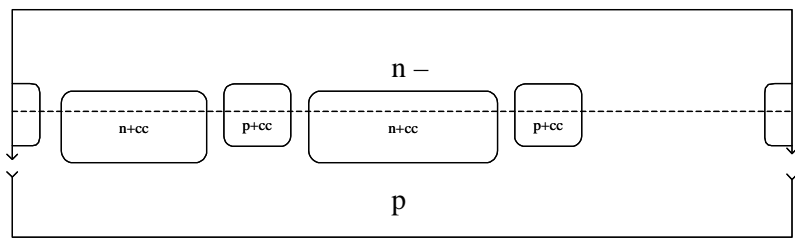
- фотолитография « p^+ -скрытый слой», ионное легирование бором, отжиг p^+ -скрытого слоя в окислительной среде (рис. 1.42, в).

- удаление слоя SiO_2 химическим травлением, наращивание эпитаксиального слоя n -типа (рис. 1.42, г).

- термическое окисление, фотолитография «Глубокий коллектор», травление SiO_2 до Si , диффузия фосфора (загонка), разгонка фосфора в окислительной среде (рисунок 1.42, д).

- фотолитография «Разделение», травление SiO_2 до Si , диффузия бора (загонка), разгонка бора в окислительной среде (рис. 1.42, е), контроль качества разделения измерением ВАХ.





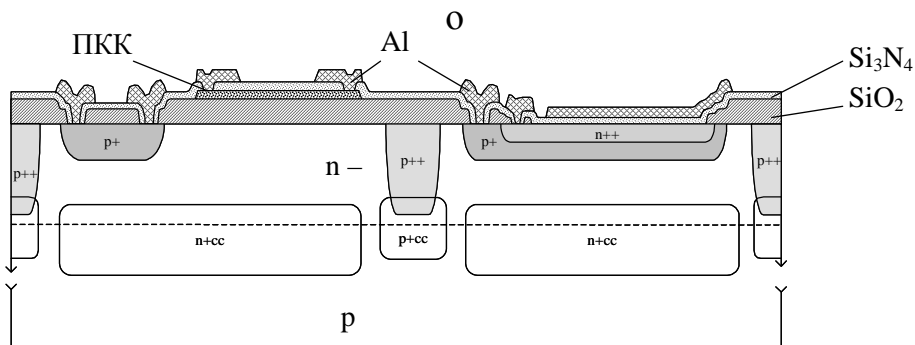
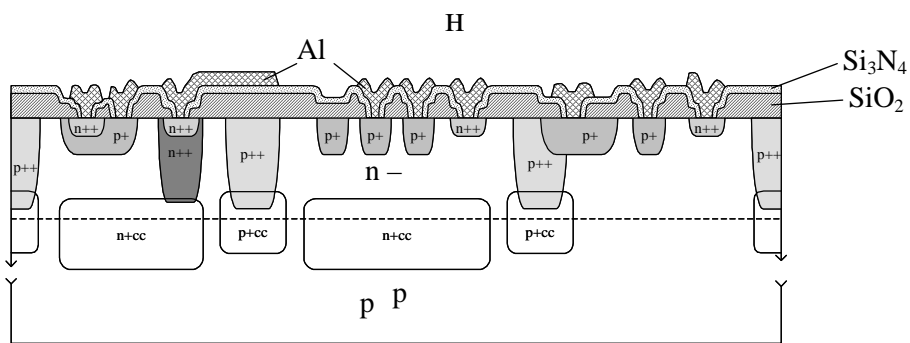
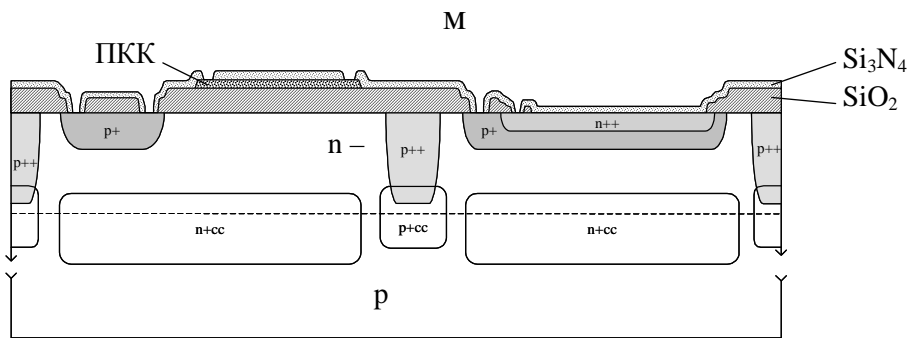
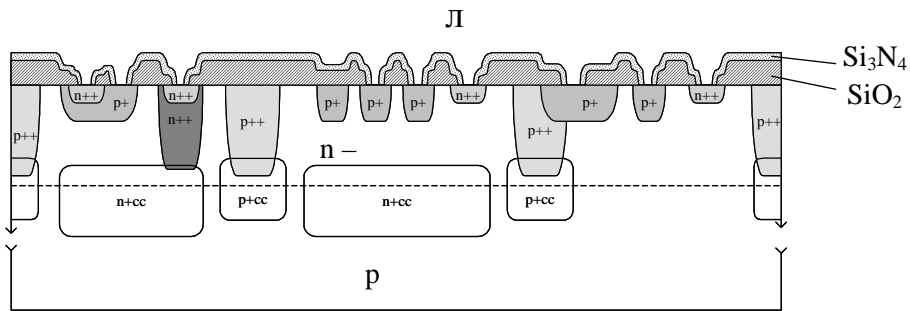
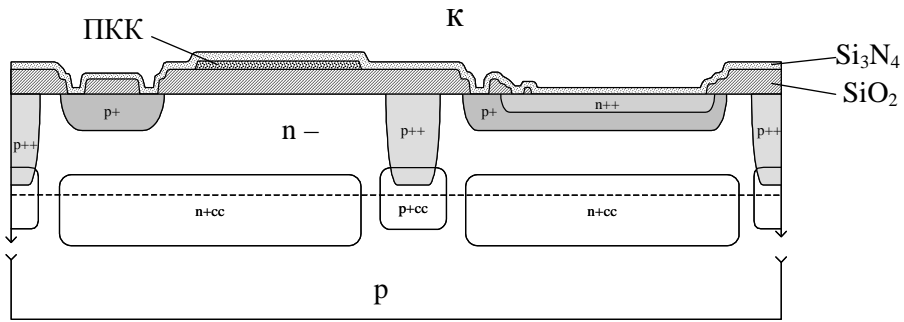
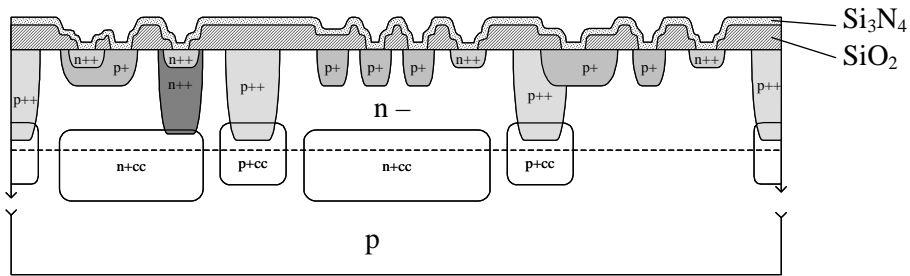


Рис. 1.42. Структура биполярной ИМС на различных стадиях изготовления: а – исходная подложка; б – формирование n^+ – скрытого слоя; в – формирование p^+ – скрытого слоя; г – нанесение эпитаксиального слоя; д – формирование глубокого коллектора; е – формирование p^+ – разделения; ж – формирование базы; и – формирование эмиттера; з – формирование резисторов из ПКК; к, л – осаждение Si_3N_4 ; м, н – формирование контактов; о, п – формирование металлического слоя

– фотолитография «База», травление SiO_2 до Si , ионное легирование бором и разгонка бора в окислительной среде (рис. 1.42, ж), контроль ВАХ.

– фотолитография «Эмиттер», диффузия фосфора (загонка), разгонка фосфора в окислительной среде (рис. 1.42, з), контроль ВАХ.

– осаждение слоя ПКК, ионное легирование фосфором, отжиг, фотолитография «Резистор», плазмохимическое травление (ПХТ) слоя ПКК (рис. 1.42, и).

– окисление, фотолитография «Дополнительные контакты», травление SiO_2 до Si (вскрытие окон к диффузионным областям и под конденсатор), осаждение слоя Si_3N_4 (область активных элементов структуры показана на рис. 1.42, к, область пассивных элементов – на рис. 1.42, л).

– фотолитография «Контакты», ПХТ слоя Si_3N_4 (область активных элементов – рис. 1.42, м, пассивных – рис. 1.42, н).

– напыление плёнки сплава $Al-(1\%)Si$, выполняется фотолитография «Металл», травление металла (область активных элементов – рис. 1.42, о, пассивных – рис. 1.42, п).

– осаждение НТФСС, фотолитография «Пассивация» и травление НТФСС (область активных элементов – рис. 1.40, область пассивных – рис. 1.41).

На заключительных стадиях изготовления осуществляют контроль вольт–амперной характеристики (ВАХ) тестовых элементов схемы и функциональный контроль изготовленных кристаллов ИМС.

1.10. Процесс изготовления КМОП ИМС

МОП – транзистор представляет собой две сильнолегированные области (исток и сток) одного типа проводимости, сформированные подложке противоположного типа проводимости. Данные области перекрываются и металлическим или поликремниевым затвором, расположенным на тонком ($25 \div 80$ нм) слое диэлектрика. Напряжение, прикладываемое к затвору, регулирует проводимость канала между истоком и стоком. В зависимости от типа проводимости канала различают n –канальные и p –канальные МОП – транзисторы МОП – транзисторы (рис. 1.43, а, б). Кроме того, структуры, канал которых при отсутствии напряжения на затворе открыт, называют

МОП – транзисторами с встроенным каналом (рис. 1.43, а, б). Если для создания канала к затвору должно быть приложено напряжение, то такие структуры называют МОП – транзисторами с индуцированным каналом (рис. 1.43, в, г).

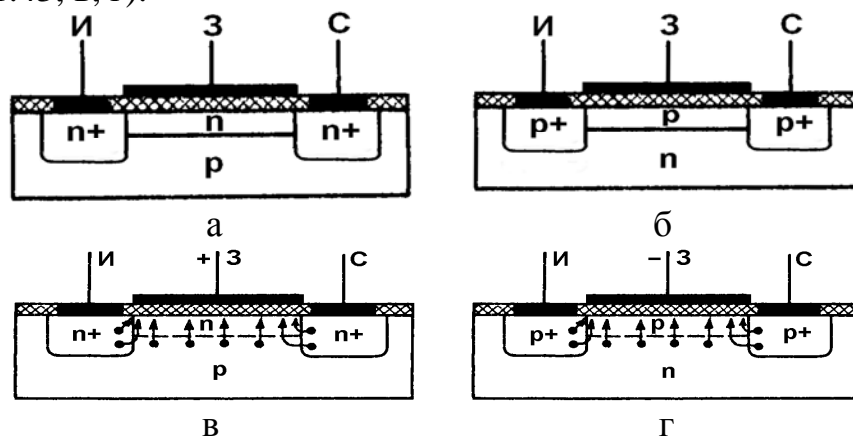


Рис. 1.43. МОП – транзисторы: а, б – с встроенным каналом; в, г – с индуцированным каналом

Основным параметром МОП–транзисторов является пороговое напряжение, т.е. напряжение, при котором концентрация основных и неосновных носителей в канале будут одинаковыми. Величина порогового напряжения определяется концентрацией примеси в кремнии, свойствами окисла (толщиной и плотностью зарядовых состояний в окисле), а также работой выхода материала затвора. Как правило, требуемое значение порогового напряжения получают ионным легированием канала.

Наиболее широко в технологии ИМС нашли применение КМОП–структуры, т.е структуры, содержащие на одной подложке как *n*–канальные, так и *p*–канальные МОП – транзисторы со встроенными каналами. Схемы такого типа имеют ряд достоинств, таких как, малая потребляемая мощность, высокая помехозащищенность, широкий рабочий диапазон напряжений (обычно 1,5÷25 В), широкий диапазон рабочих температур.

Работа КМОП – структуры может быть пояснена на примере КМОП–инвертора (рис. 1.44). Затворы *n* и *p*–канальных транзисторов соединены между собой и представляют собой вход инвертора. Соединенные стоки обоих транзисторов являются выходом инвертора. Заметный ток протекает через эту КМОП–ячейку только тогда, когда оба транзистора включены одновременно, т.е в ходе переключения из одного состояния в другое. Поэтому такой инвертор потребляет очень малую мощность и это является наиболее важным преимуществом КМОП–микросхем.

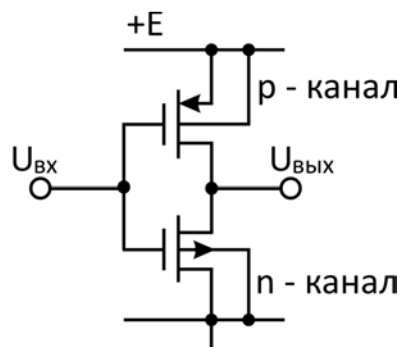


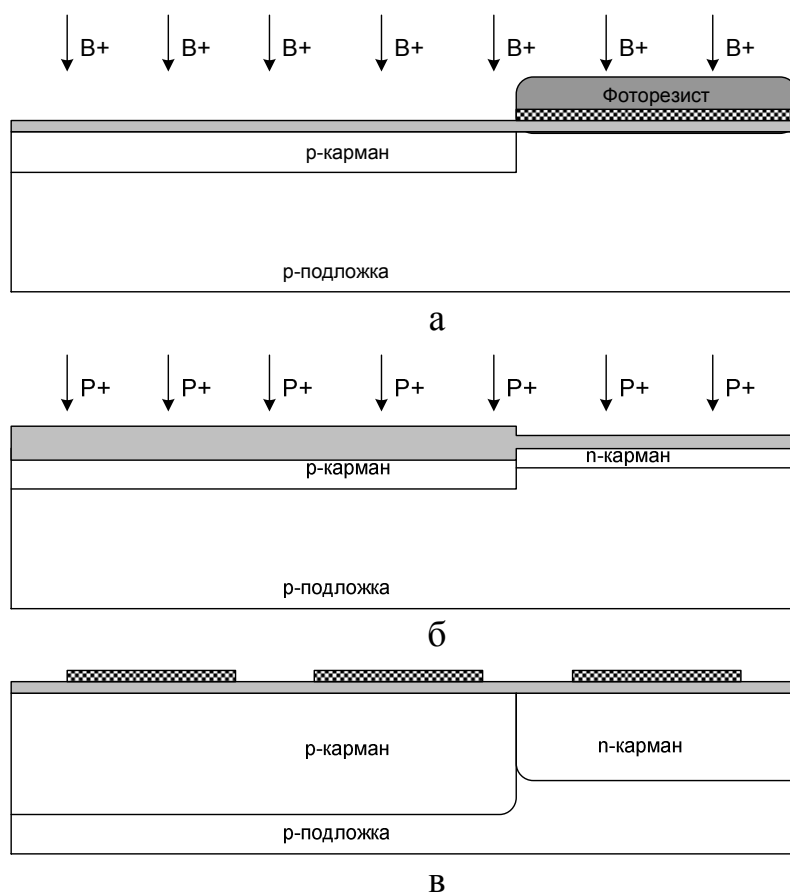
Рис. 1.44 Электрическая схема КМОП – инвертора

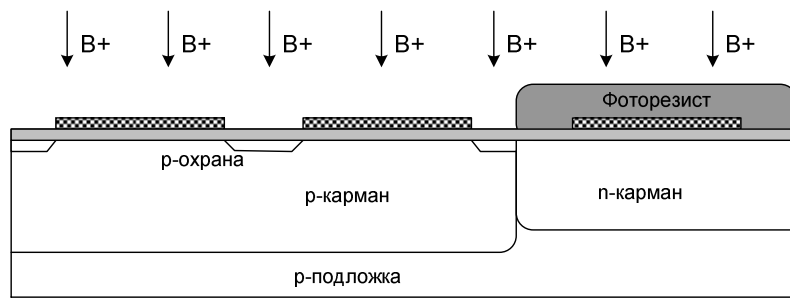
При формировании транзисторов обоих типов в составе одной КМОП–ИМС p -канальный транзистор могут формировать в подложке n -типа, а n -канальный транзистор – в специально сформированной области p -типа, называемой карманом. Однако для уменьшения ширины затвора, а, значит, и размеров элементов КМОП–ИМС схемы её формируют по двухкарманной технологии (p -канальные транзисторы формируют в n -кармане, а n -канальные – в p -кармане). Для двухкарманной технологии можно использовать как подложку n -типа (КЭФ4,5 (100)), так и подложку p -типа (КДБ–12 (100)). Основные стадии формирования КМОП–ИМС по двухкарманной технологии представлены на рис. 1.45, а – н.

Формирование КМОП ИМС осуществляют в следующей последовательности:

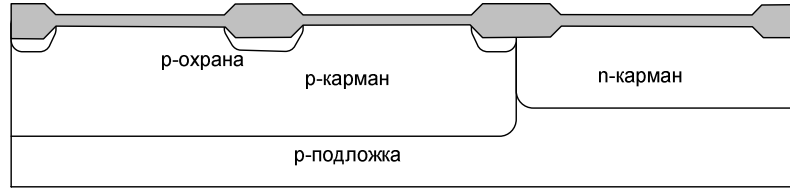
– формирование партии пластин КДБ12 [100], химическая обработка, термическое окисление до толщины SiO_2 от 250 до 425 Å, осаждение слоя Si_3N_4 толщиной 0,12 мкм, фотолитография «Р – карман», ПХТ слоя Si_3N_4 , ионная имплантация бора (рис. 1.45, а);

– удаление фоторезиста, химическая обработка пластин, термическое окисление, удаление Si_3N_4 , ионная имплантация фосфора (рис. 1.45, б);

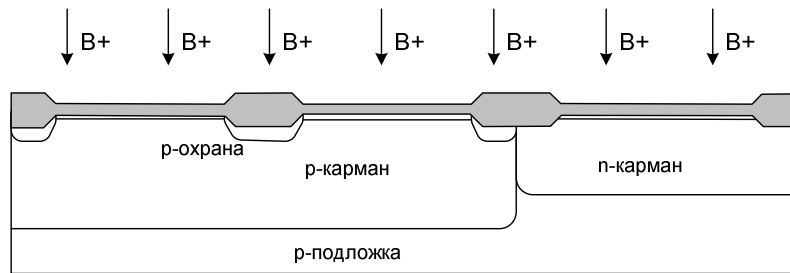




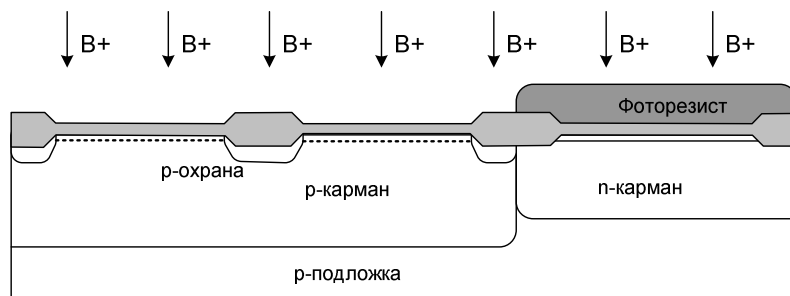
Г



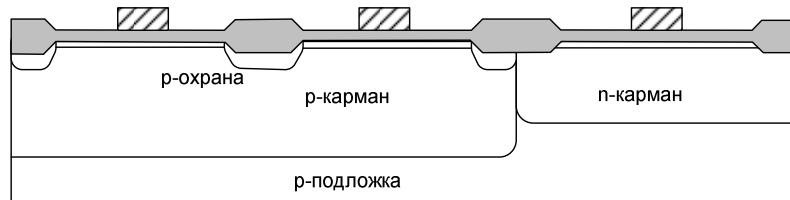
Д



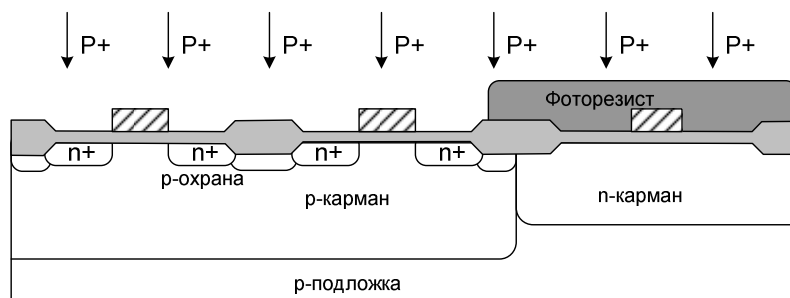
е



Ж



З



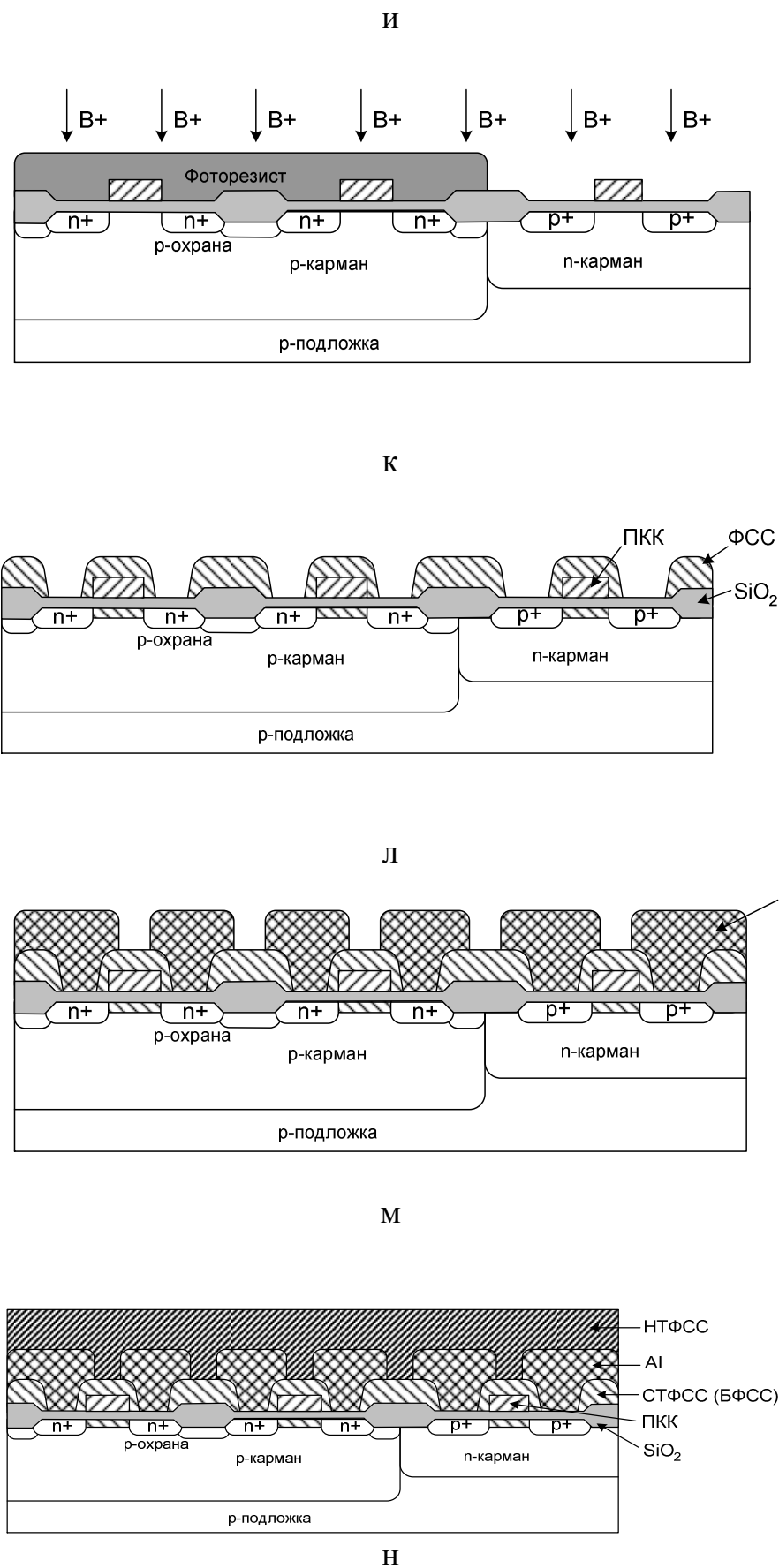


Рис. 1.45. Структура КМОП ИМС на различных стадиях изготовления: а – формирование p –

кармана; б – формирование n – кармана; в – разгонка карманов, формирование разделения; г – формирование p^- – охраны; д – формирование локального оксида; е – общее подлегирование бором; ж – подлегирование канала; з – формирование затвора; и – формирование n^+ – истоков; к – формирование p^+ – истоков; л – формирование контактов; м – формирование металлизации; н – формирование пассивации

– удаление оксида, разгонка карманов на глубину от 4 до 8 мкм, осаждение Si_3N_4 толщиной 0,12 мкм, фотолитография «Изоляция», ПХТ Si_3N_4 (рис. 1.45, в);

– фотолитография « p^+ – охрана», ионная имплантация бора (рис. 1.45 г);

– локальное окисление до толщины SiO_2 1 мкм, удаление слоя Si_3N_4 , удаление поднитридного оксида, термическое окисление для формирования предварительного оксида толщиной 0,12 мкм (рис. 1.45, д);

– ионная имплантация бора (общее подлегирование) для установления требуемой величины порогового напряжения p –канального транзистора (рис. 1.45, е);

– фотолитография «подлегирование p –кармана», ионная имплантация бора для установления необходимой величины порогового напряжения n –канального транзистора (рис. 1.45, ж);

– удаление предварительного оксида, химическая обработка, окисление под затвор (толщина подзатворного оксида обычно составляет от 250 до 1000 Å), осаждение слоя ПКК толщиной от 0,4 до 0,5 мкм, легирование ПКК диффузией фосфора для получения поверхностного сопротивления от 10 до 30 Ом/ , фотолитография «Затвор», анизотропное ПХТ ПКК (рис. 1.45, з);

– фотолитография « n^+ –истоки», ионная имплантация фосфора (рис. 1.45, и);

– фотолитография « p^+ –истоки», и ионная имплантация бора (рис. 1.45, к);

– осаждение межслойного диэлектрика (ФСС или БФСС) толщиной 0,4 – 0,8 мкм, фотолитография «Контакты», травление межслойного диэлектрика (рис. 1.45, л);

– формирование металлического слоя магнетронным распылением сплава алюминий – кремний (1 %) толщиной 1,1 мкм, фотолитография «Металлизация», проводят травление металлизации (рис. 1.45, м);

– осаждение пассивирующего слоя НТФСС толщиной от 0,8 до 1,2 мкм, фотолитография «Пассивация», травление НТФСС для вскрытия контактных площадок (рис. 1.45, н), измерение ВАХ, функциональный контроль кристаллов на пластине.

1.11. Технологический маршрут изготовления мощных диодов Шоттки

Диодами Шоттки называют структуры, использующие выпрямляющие свойства контакта металл – полупроводник. По сравнению с обычными $p-n$ – переходами диоды Шоттки отличаются рядом преимуществ: высокое быстродействие, обусловленное переносом заряда только электронами, а также меньшее падение напряжения при прямом смещении, обуславливающее меньшие потери мощности. По данным причинам диоды Шоттки нашли широкое распространение, как в качестве быстродействующих элементов цифровых интегральных микросхем, так и в качестве выпрямительных структур.

Для получения диода Шоттки с заданными характеристиками (падение напряжения при прямом смещении, максимальная температура эксплуатации) необходимо подобрать пару металл – полупроводник с требуемой высотой потенциального барьера. Кроме того, максимальное обратное напряжение определяется концентрацией примесей в полупроводнике. Как правило, выпрямительные диоды Шоттки формируют на основе контактов тугоплавких металлов (ванадий, хром, молибден) с кремнием n -типа проводимости. Для исключения краевых утечек и улучшения обратных характеристик по периметру контакта располагают охранное кольцо p -типа проводимости (рис. 1.46).

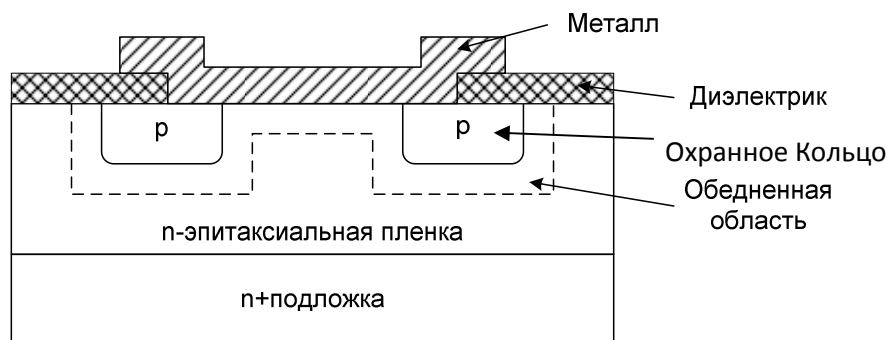
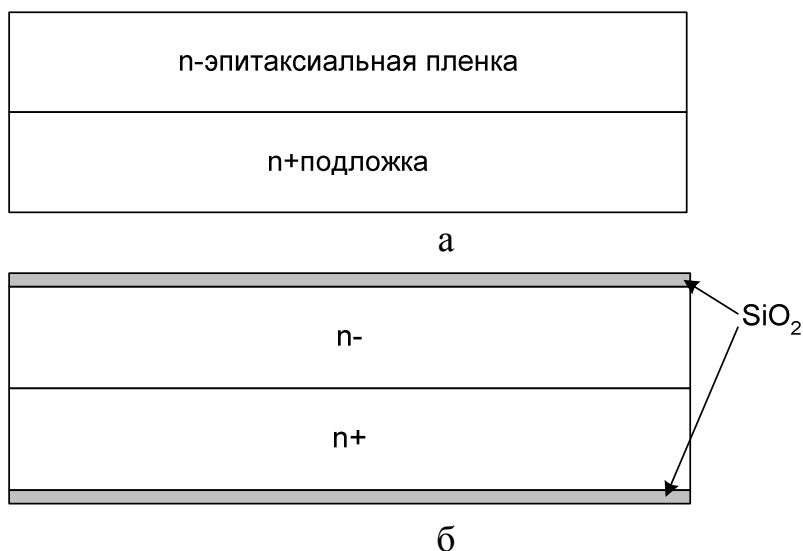


Рис. 1.46 Структура диода Шоттки с охранном кольцом p -типа проводимости

Основные стадии формирования структуры кремниевого диода Шоттки с молибденовым барьером приведены на рис. 1.47, а – ж.



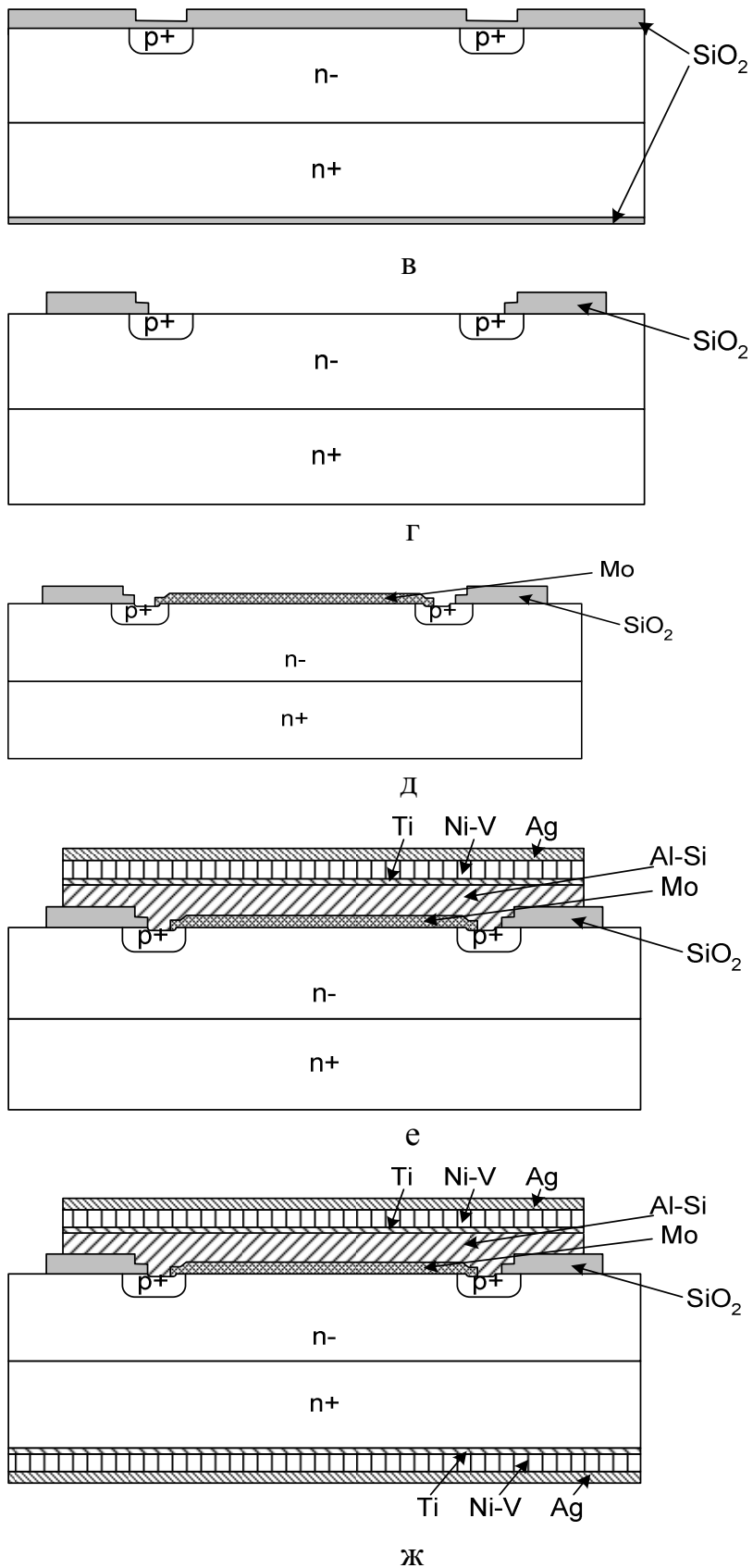


Рис. 1.47. Структура диода Шоттки на различных стадиях изготовления: а – формирование партии пластин; б – термическое окисление; в – фотолитография и формирование охранного кольца; г – травление диоксида кремния под нанесение молибдена; д – формирование контакта; е – формирование многослойного анода; ж –

формирование многослойного анода

Формирование диода Шоттки с обратным напряжением 45 В осуществляют в следующей последовательности:

– формирования партии пластин с эпитаксиальной структурой 4,5 КЭФ 0,6/460 КЭМ 0,003(111) (рис. 1.47, а).

– химическая обработка, термическое окисление до получения толщины слоя SiO_2 0,4 мкм (рис. 1.47, б).

– фотолитография «Охранное кольцо», травление SiO_2 , ионное легирование бором, разгонка бора до глубины p - n -перехода 1,0 мкм и поверхностного сопротивления 1000 Ом/□ (рис. 1.47. в).

– фотолитография «Контакт», травление SiO_2 (рис. 1.47, г).

– нанесение плёнки молибдена толщиной 0,3 мкм магнетронным распылением, фотолитография «Металл-1», травление плёнки молибдена (рис. 1.47, д).

– последовательное нанесение слоёв алюминия, титана, сплава никель-ванадий, серебра магнетронным распылением, фотолитография «Металл-2», травление многослойной структуры Al/Ti/Ni-V/Ag (рис. 1.47, е).

– утонение пластин шлифовкой обратной стороны связанным абразивом до остаточной толщины 300 мкм, последовательное нанесение слоёв титана, сплава никель-ванадий, серебра магнетронным распылением на обратную сторону кремниевой пластины (рис. 1.47, ж).

1.12. Технологический маршрут изготовления MOSFET-транзисторов

MOSFET – транзисторы представляют собой МОП-транзисторы сформированные двойной диффузией. В этих транзисторах сток ориентирован в вертикальном направлении, а электроды истока и затвора располагаются вдоль горизонтальной плоскости (1.48).

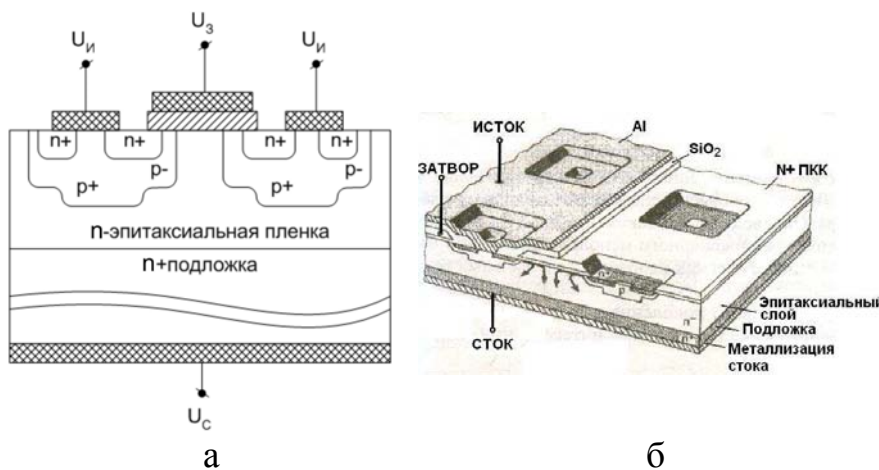
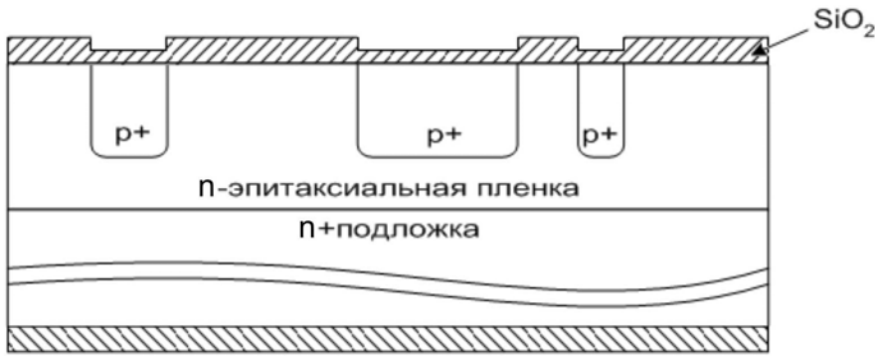


Рис. 1.48. Структура MOSFET – транзистора с n -каналом и вертикальным стоком: а – поперечное сечение; б – вид в плане

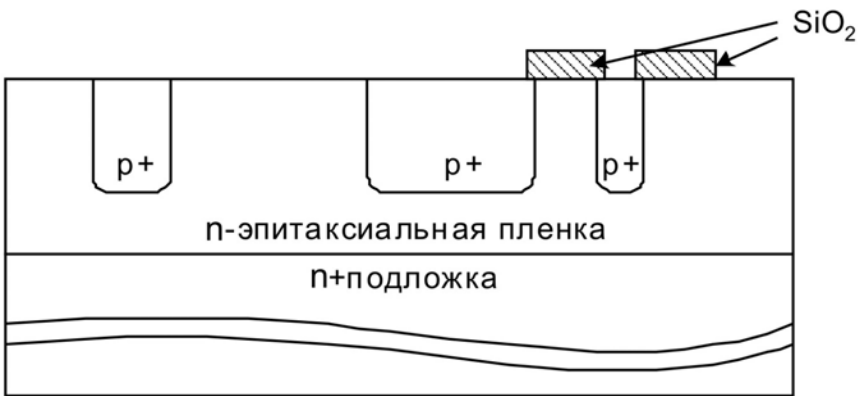
При напряжении на затворе меньше порогового транзистор находится в запертом состоянии. При превышении порогового напряжения на поверхности p - области, образуется канал n -типа, и транзистор оказывается

открытым. Для полного использования площади, структуру MOSFET-транзисторов выполняют в виде множества ячеек квадратной либо шестиугольной формы.

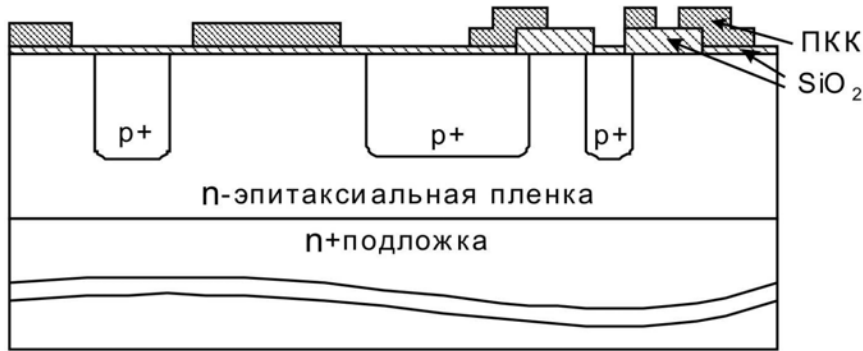
Основные этапы формирования структуры MOSFET-транзистора приведены на рис. 1.49, а – з.



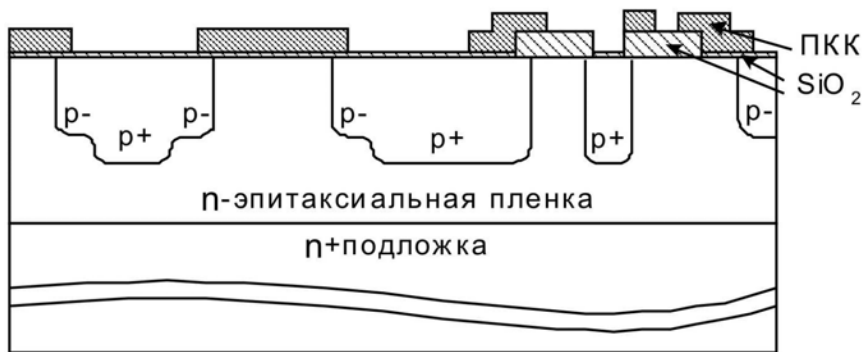
а



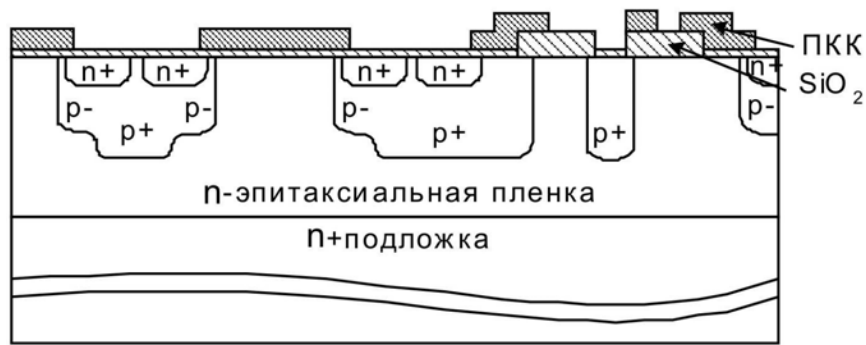
б



в



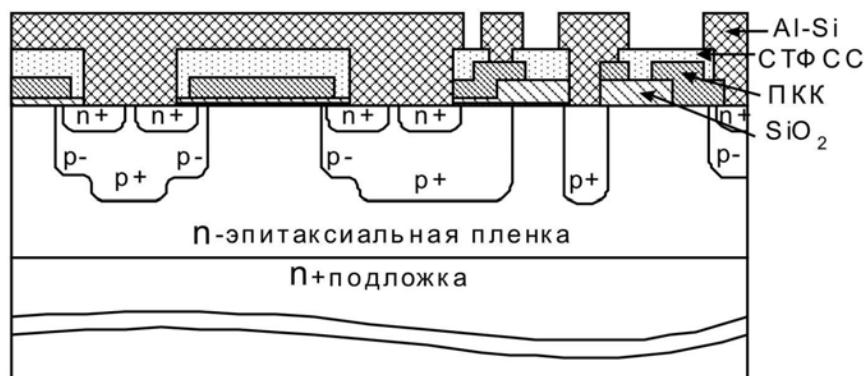
г



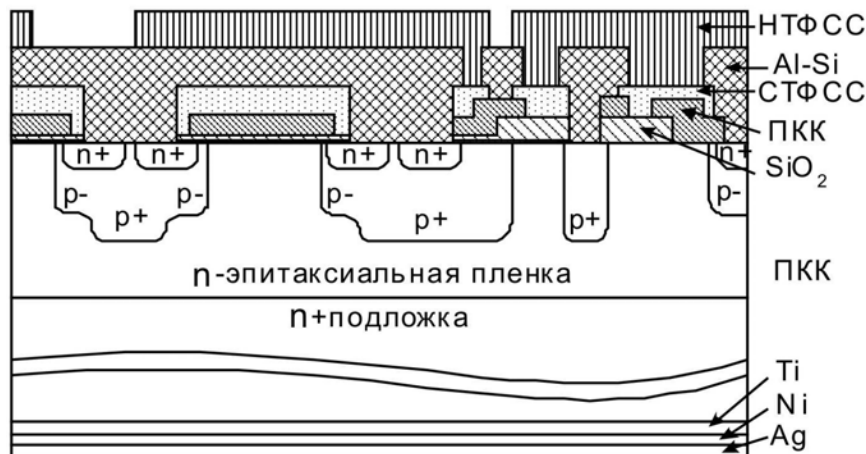
д



е



ж



з

Рис. 1.49. Структура MOSFET – транзистора на различных стадиях изготовления: а – формирование p^+ – областей; б – формирование защитного оксида; в – формирование затвора; г – формирование канала; д – формирование истоков; е – формирование контактов;

- ж – формирование металлизации истоков;
- з – формирование пассивирующих слоев стока

Формирование MOSFET – транзистора с обратным напряжением 200 В осуществляют в следующей последовательности:

- формирования партии пластин с эпитаксиальной структурой 28 КЭФ 5,5/460 КЭС 0,01 (100), химическая обработка пластин, термическое окисление, фотолитография «*p+* – ячейка», травление SiO₂, ионное легирование бором, разгонка бора (рис. 1.49, а);
- термическое окисление, фотолитография «Активная область», травление SiO₂ (рис. 1.49, б);
- окисление под затвор, нанесение поликристаллического кремния (ПКК), диффузия фосфора (легирование ПКК), фотолитография «Затвор», плазмохимическое травление (ПХТ) ПКК (рис. 1.49, в);
- ионное легирование бором, разгонка бора (рис. 1.49, г);
- фотолитография «Истоки», ионное легирование фосфором, разгонка фосфора (рис. 1.49, д);
- осаждение среднетемпературного фосфоросиликатного стекла (СТФСС), фотолитография «Контакты», травление STFCC (рис. 1.49, е);
- нанесение алюминия, фотолитография «Металл» (рис. 1.49, ж);
- осаждение низкотемпературного фосфоросиликатного стекла (НТФСС), фотолитография «Пассивация», травление НТФСС, утонение пластин шлифованием обратной стороны, формирование стока последовательным нанесением слоёв титана, сплава никель–ванадий, серебра (рис. 1.49, з).

1.14. Технологический маршрут изготовления мощных тиристоров

Тиристор представляет собой полупроводниковый переключатель с двумя устойчивыми состояниями, установление которых зависит от механизма регенеративной обратной связи в *p-n-p-n* – структуре. Тиристор – имеет три электрода: анод, катод и управляющий электрод. В открытом состоянии сопротивление тиристора мало, что соответствует участку малого падения напряжения на вольтамперной характеристике прибора (рис. 1.50). В закрытом состоянии сопротивление тиристора велико, что соответствует участку малого тока через прибор на вольтамперной характеристике.

Анодное напряжение – напряжение между основными электродами – анодом и катодом.

Напряжение пробоя – значение анодного напряжения в момент пробоя.

Удерживающий ток – минимальный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии.

Ток включения – основной ток в точке включения тиристора.

$U_{\text{ПЕР}}$, $I_{\text{ПЕР}}$, $U_{\text{УД}}$, $I_{\text{УД}}$ – координаты точки переключения и удержания.

Точка переключения (1) характеризуется высоким напряжением и малым током. Точка удержания (2) характеризуется низким напряжением и

большим значением тока. На рис. 1.51 представлено поперечное сечение тиристора.

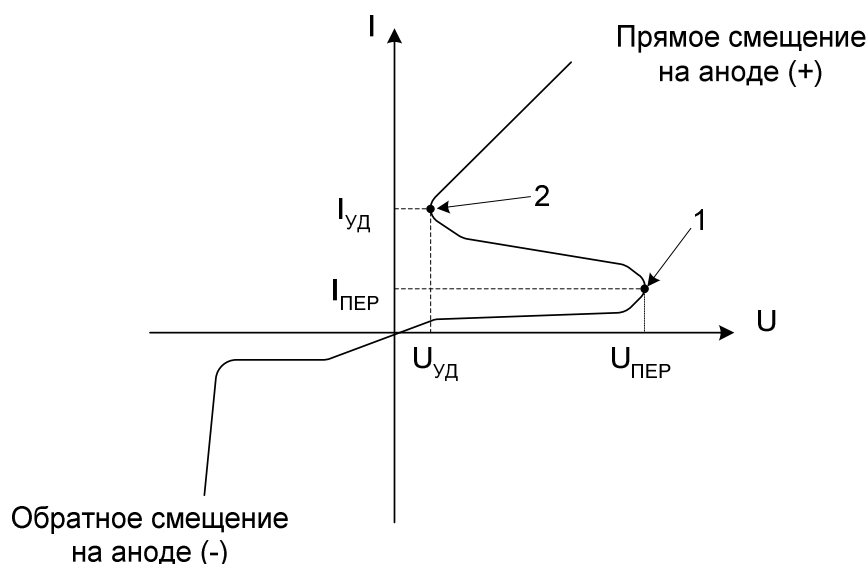


Рис. 1.50. Вольтамперная характеристика для $p-n-p-n$ – структуры

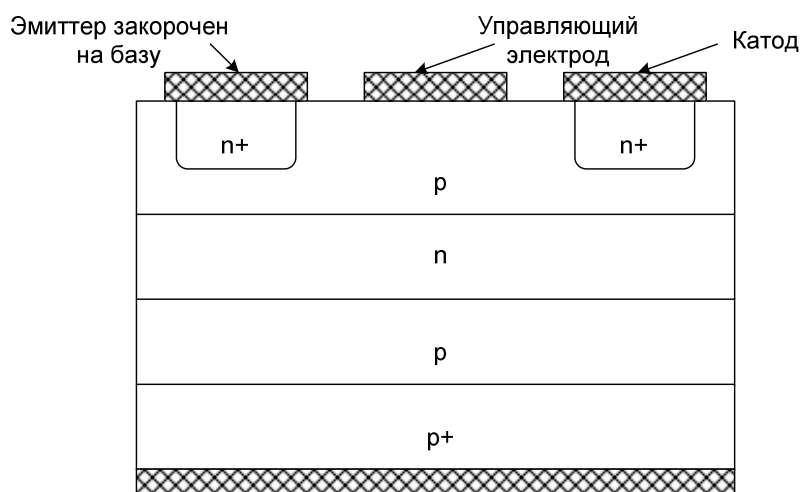


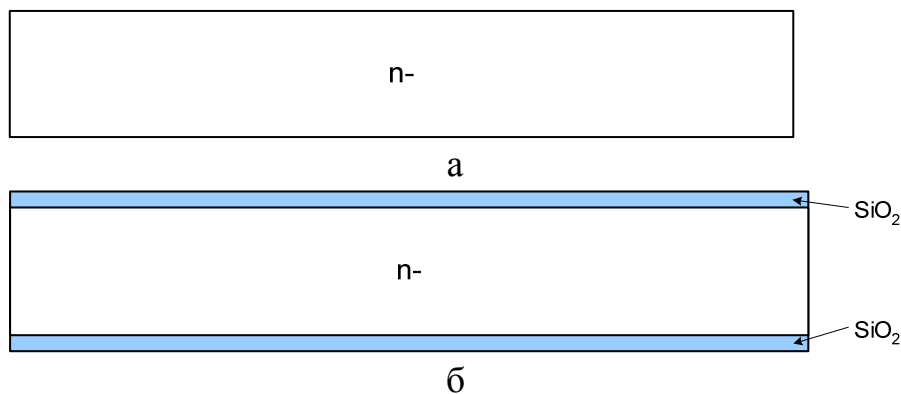
Рис. 1.51. Поперечное сечение тиристора

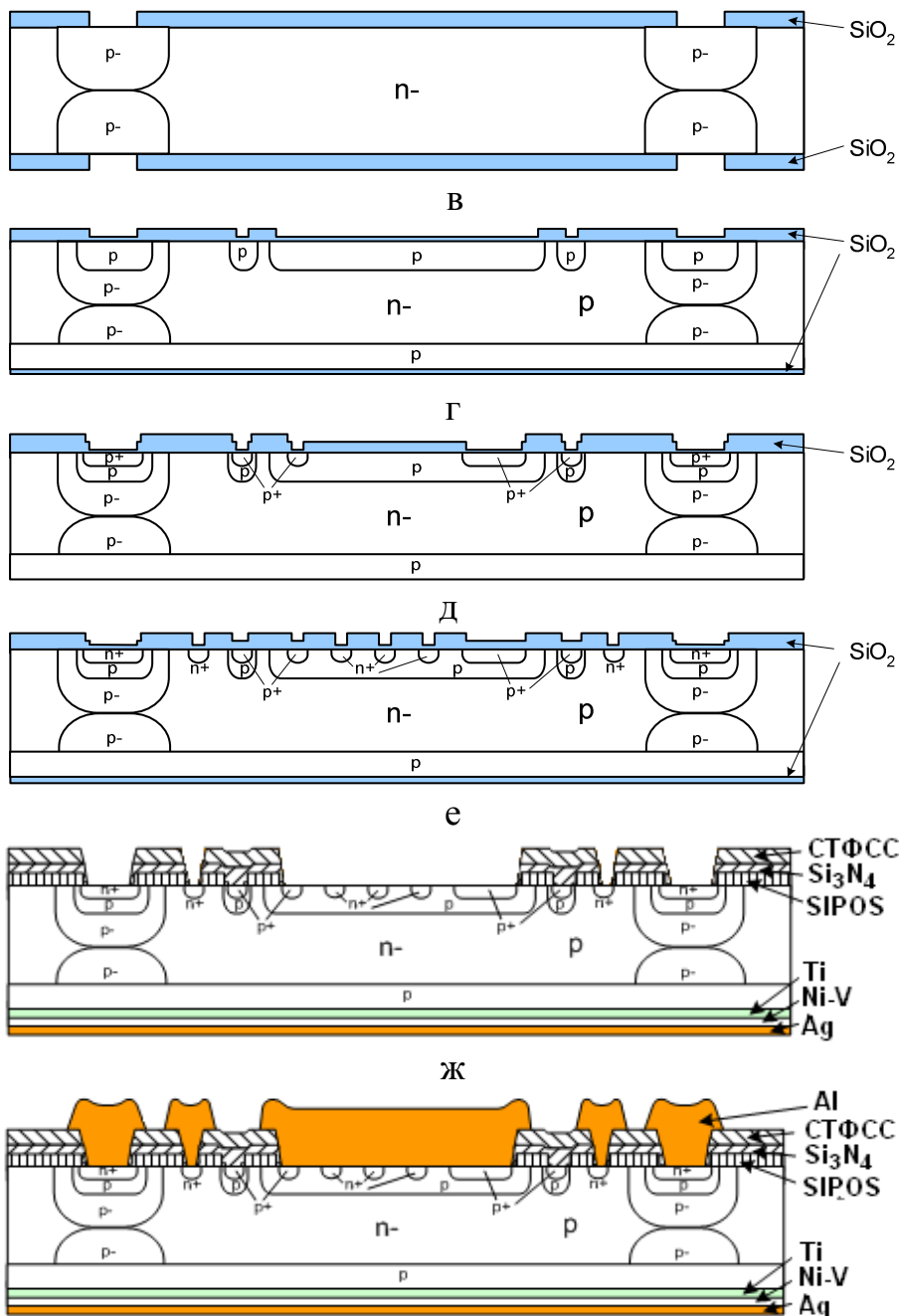
Как видно из рисунка, металлический контакт к катоду закорачивает катод по периметру с p -базой. Такой закороченный эмиттер улучшает работу прибора при повышенной температуре и резком изменении анодного напряжения. Когда эмиттер шунтирован, ток смещения течет не через эмиттер, а через элементы шунтирования. Эффективность эмиттера при этом уменьшается и неконтролируемое переключение тиристора в проводящее состояние при больших температурах или напряжениях не происходит. Обычно эмиттер конструируют с выходами в него p -базы под общий металлический контакт.

При подаче положительного смещения на управляющий электрод катод начинает инжектировать электроны области, расположенные в непосредственной близости от контакта электрода управления. Эти электроны захватываются коллекторным переходом, выбрасываются в n -базу и создают небольшое положительное смещение на анодном переходе. Дырки

начинают течь в направлении к коллекторному переходу, достигая p -базы, при этом они увеличивают инжекцию электронов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока величина тока не достигает значения величины тока удержания, при котором прибор включается.

Так как тиристоры применяются для коммутации достаточно высоких напряжений (до 5000 В и выше) при их изготовлении используется ряд конструктивно–технологических решений, позволяющих повысить пробивные напряжения планарных p - n – переходов. В частности, используются дополнительные разделительные диффузионные кольца. Этот дополнительный p - n – переход, расположенный рядом с основным (базой) и изготавливаемый одновременно с ней позволяет изменить кривизну обедненного слоя и выступает как делитель напряжения. Для уменьшения токов утечки обратно–смещенного перехода поверхность кремния пассивируется пленками поликристаллического кремния, легированного кислородом (SIPOS). При обратном смещении p - n – перехода протекает слабый ток благодаря очень малой проводимости такой пленки. Поэтому структура ведет себя подобно полевой обкладке с омическим сопротивлением, нейтрализующим влияние как кривизны p - n перехода, так и поверхностного заряда. Для предотвращения образования инверсных каналов под влиянием положительного заряда оксида обычно активную структуру тиристора окружают n +охранными кольцами, формируемыми одновременно с созданием n +–эмиттеров. Кроме того, для того, чтобы исключить выход базовой области на границу разделения кристаллов, кристалл тиристора окружают сквозной областью разделения p -типа. Необходимость создания такой сквозной области разделения определяет особенности технологии и конструкции изготовления планарных тиристоров. Для обеспечения сквозной диффузии примеси p -типа используют высокие ($T=1300^{\circ}\text{C}$) температуры и продолжительные (до 200 часов) времена разгонки примеси. Диффузию проводят с двух сторон и это требует использования в техпроцессе технологии двухсторонней фотолитографии. Для формирования тиристорных структур используют сравнительно тонкие подложки толщиной от 280 до 350 мкм для максимального сокращения времени сквозной диффузии. Основные стадии формирования тиристора представлены на рис. 1.52, а – з.





3

Рис. 1.52. Структура планарного тиристора на различных стадиях формирования: а – формирование партии пластин; б – окисление; в – формирование областей разделения; г – формирование базы; д – подлегирование базы; е – формирование эмиттера; ж – формирование пассивирующих слоев, з – формирование металлических слоев на лицевой и обратной стороне пластины.

Формирование планарного тиристора с обратным напряжением 800 В осуществляют в следующей последовательности:

- формирование партии пластин монокристаллического кремния КЭФ–35 (111) толщиной от 320 до 350 мкм (рис. 1.52, а).
- термическое окисление (рис. 1.52, б).
- фотолитография «Разделение» (двухсторонняя), травление SiO_2 , диффузия бора (загонка), разгонка бора (рис. 1.52, в).
- термическое окисление, фотолитография «База», травление SiO_2 , ионное легирование бором (двухстороннее), разгонка бора (рис. 1.52, г).

– фотолитография «Подлеги́рование», травление SiO_2 , диффузия бора, разгонка бора (рис. 1.52, д).

– фотолитография «Эмиттер», травление SiO_2 , диффузия фосфора (рис. 1.52, е).

– удаление SiO_2 , осаждение слоя полуизолирующего ПКК легированного кислородом (SIPOS), фотолитография «Контакты–1», плазмохимическое травление (ПХТ) слоя SIPOS, последовательное осаждение слоёв Si_3N_4 и СТФСС, фотолитография «Контакты–2», плазмохимическое травление (ПХТ) слоёв Si_3N_4 и СТФСС.

– нанесение плёнки алюминия на планарную сторону, фотолитография «Металлизация», травление алюминия, последовательное нанесение слоёв титана, сплава никель–ванадий, серебра на обратную сторону пластины (рис. 1.52, ж).

Глава 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПОДЛОЖКИ, ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ, РАЗНОВИДНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

2.1. Основные характеристики полупроводниковых подложек

Изделия интегральной электроники формируют на пластинах (подложках) монокристаллического кремния, а также германия, арсенида галлия, сапфира и др. Однако в настоящее время основным материалом для большинства применений является кремний. Кремниевая подложка представляет собой тонкий диск, различного диаметра: 75мм, 100мм, 150мм и более, со скругленным по периферии краем, с одним или несколькими срезами (рис. 2.1).

Основной (или базовый) срез подложки предназначен для базирования (ориентации) пластин в технологическом оборудовании. Длина базового среза строго регламентируется и выполняется в определенном кристаллографическом направлении. В последующем параллельно базовому срезу будет располагаться одна из сторон кристалла ИМС.

Скругление края по периферии подложки производится с целью предотвращения появления сколов и трещин. Кроме того, скругленный край позволяет уменьшить влияние дефектов на некоторых технологических операциях, таких как утолщение («валик») при нанесении фоторезиста и «корона» при эпитаксиальном наращивании.

Дополнительные срезы служат для визуального определения ориентации, типа электропроводности и удельного сопротивления кремниевых пластин и наносятся относительно базового под углом 45, 90 или 180° (рис. 2.2).

Требования к качеству полупроводниковых подложек можно условно разделить на две группы:

- а) требования к геометрическим параметрам;
- б) требования к качеству поверхности.

К основным геометрическим параметрам подложек относятся: диаметр, толщина, прогиб, плоскостность, величина основного и дополнительных базовых срезов. Требования к данным параметрам для различного диаметра пластин представлены в табл. 2.1.

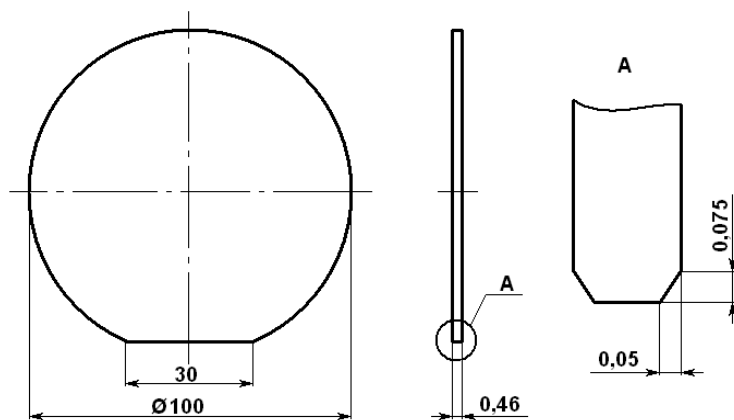


Рис. 2.1. Кремниевая подложка

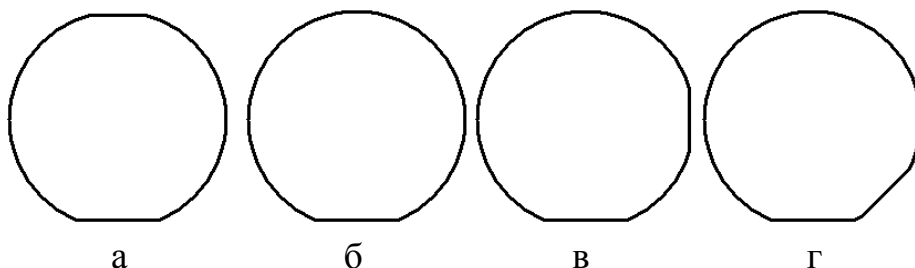


Рис. 2.2 Расположение основного и дополнительного срезов на кремниевых подложках различных типов: а) КЭФ 4,5 (100), б) КЭФ 4,5 (111), в) КДБ 10 (111), г) КДБ 10 (100)

В настоящее время ИМС изготавливают на кремниевых подложках диаметром: 100, 150, 200 и 300 мм. В перспективе также ожидается переход на диаметр подложек 450 мм. Выбор диаметра подложек в первую очередь зависит от сложности технологического процесса и имеющегося парка технологического оборудования. Допуск на диаметр подложек критичен при поштучной обработке, особенно в установках с автоматической загрузкой–выгрузкой.

Таблица 2.1. Геометрические параметры полированных пластин (подложек)

Параметр	Диаметр подложки				
	100 мм	150 мм	200 мм	300 мм	450 мм
Допуск на диаметр, мм	±0,5	±0,5	±0,5	±0,2	±0,1
Толщина, мкм	460–525	650–700	700–750	750–800	900–950
Отклонение толщины, мкм	±20	±15	±15	±10	±10
Локальная неплоскостность, мкм	1,0–2,0	0,5–1,0	0,2–0,5	0,2–0,5	0,2–0,5
Прогиб, мкм	<40	<60	<65	<100	–

Длина базового среза, мм	30–35	55–60	–	–	–
--------------------------	-------	-------	---	---	---

Минимальная толщина определяется требованиями механической прочности, жесткости, и термомеханической стойкости подложек. Допуски на отклонение толщины и локальной неплоскостности обеспечивают воспроизводимость ширины линий фотолитографического рисунка. Поскольку увеличение диаметра подложек происходит одновременно с уменьшением размеров элементов ИМС, то требования к стабильности геометрических параметров, как правило, также ужесточаются с увеличением диаметра пластин (см. табл. 2.1).

Качество поверхности подложек определяется следующими параметрами:

- а) шероховатостью поверхности;
- б) глубиной нарушенного слоя;
- в) минимальной дефектностью.

Состояние поверхности полупроводниковых подложек оказывает существенное влияние на электрические параметры элементов ИМС, и, соответственно, на правильность функционирования всей ИМС в целом. Критическим размером дефекта считают 0,1 от минимального размера элемента. Если размер дефекта превышает 0,3 от минимального размера элемента, то это, как правило, приводит к критическому (катастрофическому) отказу ИМС. Для большинства применений рабочая сторона полупроводниковых подложек изготавливается зеркально гладкой с параметром шероховатости Rz не более 0,05 мкм, нарушенный слой должен отсутствовать. На нерабочей стороне допускается высота микронеровностей от 0,08 мкм (для полированной поверхности) до 0,5 мкм (для шлифовано-травленной), а глубина нарушенного слоя менее 3,0 мкм.

Также жесткие требования предъявляются и к числу дефектов на поверхности подложки. Различают следующие виды дефектов:

- загрязнения по площади или точечные дефекты;
- трещина длиной более 0,25 мкм;
- «гусиная лапка» (линия длиной более 0,25 мм);
- кратер (раковина);
- краевой скол размером более 0,25 мм;
- канавка (продолговатое образование шириной более 0,13 мм и длиной более 0,76 мм);
- бугорок (размером более 0,25 мм);
- впадина;
- бороздатость;
- царапина (линия, имеющая отношение длины к ширине более чем 5:1);
- дымка (помутнение поверхности);
- «апельсиновая корка» (шероховатая поверхность);
- следы пыли.

К дефектности полупроводниковых подложек предъявляют следующие требования. На рабочей поверхности не допускается наличие дымки, трещин, кратеров, следов пыли, «апельсиновой корки», канавок, углублений и загрязнений. Допускается наличие царапин в количестве не более трех штук и

суммарной длиной не более четверти диаметра подложки. Максимальное количество частиц на поверхности не должно превышать 16 – для подложек диаметром 100 мм и 36 – для подложек диаметром 150 мм. На нерабочей стороне пластин также не допускается наличие загрязнений, следов от пыли размером более 5 мкм, сколов и трещин.

Таким образом, состояние поверхности подложек определяется:

- качеством (бездефектностью) исходного материала,
- качеством подготовки поверхности подложек,
- эффективностью очистки подложек от загрязнений.

2.2. Физико–химические основы подготовки гладких поверхностей подложек

Характерными особенностями механических свойств полупроводниковых материалов являются высокая твёрдость и их хрупкость. Поэтому для их обработки не пригодны традиционные методы, такие как точение, фрезерование, сверление, штамповка. Практически единственным доступным методом является механическая обработка данных материалов с применением связанных или свободных абразивов.

Механизм обработки свободным абразивом заключается в следующем (рис. 2.3). При перемещении обрабатывающего инструмента 2 относительно полупроводникового материала наиболее крупные зёрна абразива 3 ударяют по его поверхности и создают конические трещины 4. Зёрна абразива 3 вовлекаются в работу, перемещаясь и переворачиваясь в пространстве между инструментом 2 и обрабатываемым материалом 1. За счёт вращения зёрен разных размеров действие обрабатывающего инструмента имеет ударно–вибрационный характер, а обработка происходит в основном вследствие образования ударных трещин. При пересечении конических ударных трещин образуются выколы 5, которые отрываются от обрабатываемой поверхности и удаляются вместе с отработанной абразивной суспензией 6.

Абразивная суспензия представляет собой жидкость с взвешенными в ней частицами абразива. Жидкость в суспензии выполняет следующие функции:

- распределение зерен абразива по поверхности обрабатывающего инструмента;
- удаление разрушенных зерен и частиц полупроводника;
- снижение трения и отвод теплоты;
- смягчение ударно–вибрационных усилий;
- ускорение удаления материала за счет расклинивающего действия в микротрещинах.

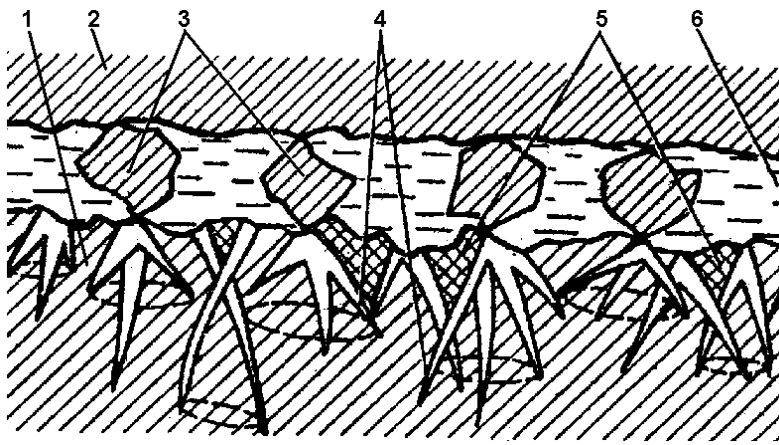


Рис. 2.3. Схема обработки свободным абразивом: 1 – полупроводниковый материал; 2 – обрабатывающий инструмент; 3 – зерна абразива; 4 – конические трещины; 5 – выколы; 6 – абразивная суспензия

При любой абразивной обработке формируется нарушенный слой (рис. 2.4). Толщины рельефного d_1 и трещиноватого d_2 слоёв зависят от твёрдости и размера абразивных зёрен. Установлены эмпирические зависимости, согласно которым $d_1=K_1D$, $d_2=D$, где D – средний диаметр зерна абразива. Значения коэффициентов K_1 и K_2 в значительной степени зависят от условий обработки даже для одного и того же типа абразива. В среднем для кремния значения данных коэффициентов находятся в пределах от 0,5 до 1,5. Достаточно стабильно наблюдается и другая эмпирическая зависимость $d_2=4d_1$.

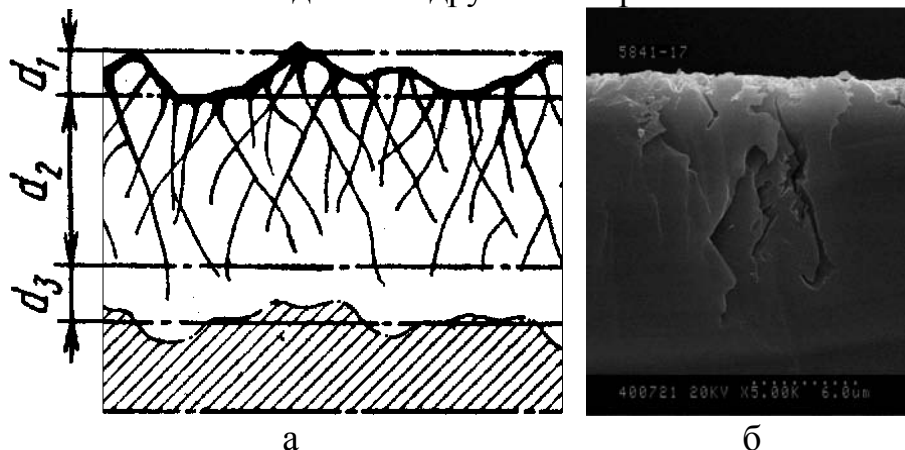


Рис. 2.4. Структура (а) и РЭМ – изображение (б) нарушенного слоя в кремниевой подложке: d_1 – рельефный слой; d_2 – трещиноватый слой; d_3 – напряжённый слой

На рис. 2.5 представлена зависимость суммарной толщины нарушенного слоя от размера зерен абразива. Как видно из рис. 2.5, кроме вышеперечисленных факторов, на глубину нарушенного слоя существенное влияние оказывает кристаллографическая ориентация полупроводникового материала.

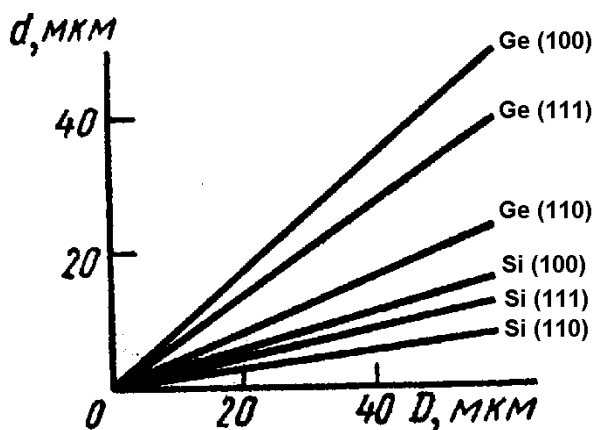


Рис. 2.5. Зависимость суммарной толщины нарушенного слоя от размера зерен абразива для германия и кремния различных кристаллографических ориентаций

При обработке связанным абразивом зерна закреплены в материале обрабатываемого инструмента (рис. 2.6). Основным типом усилий в данном случае является срез. Зерно абразива при вдавливании в поверхность полупроводника образует царапину на поверхности и трещину в глубине материала. При царапании зерно движется толчками, и царапины формируют произвольную сетку. При пересечении множества царапин и трещин происходит удаление частиц материала. По сравнению с обработкой свободным абразивом при обработке связанным абразивом достигается примерно одинаковый класс чистоты поверхности. Однако обработка связанным абразивом характеризуется большей производительностью и меньшей толщиной нарушенного слоя.

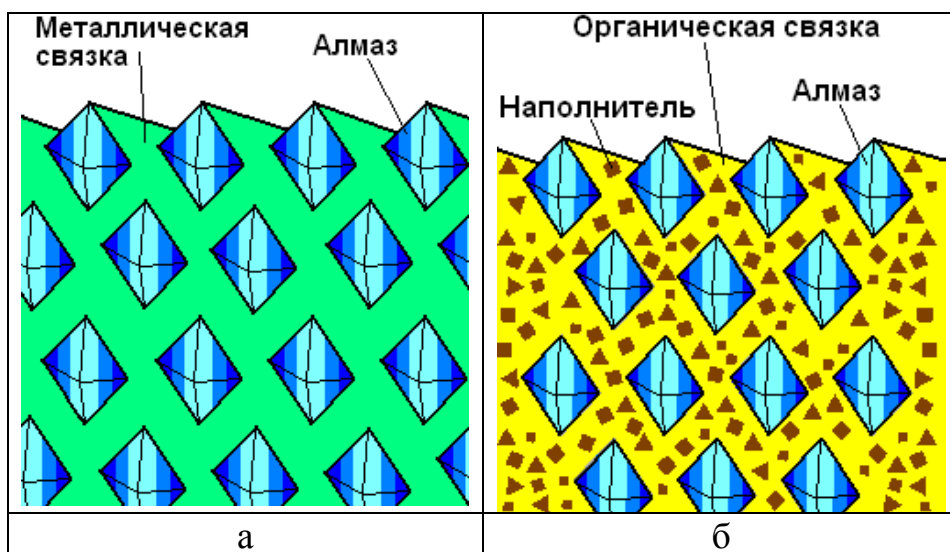


Рис. 2.6. Связанный абразив: а) металлической связкой; б) органической связкой

Наиболее часто для обработки связанным абразивом используют стальной или никелевый инструмент (металлическая связка), поверхностный слой которого на глубину до 4 мм насыщен алмазным зерном (рис. 2.6, а). При обработке таким инструментом возникают практически только срезающие усилия. Кроме металлов в качестве связки может использоваться керамика или органические материалы (органические смолы, резина, шеллак) (рис. 2.6, б).

Изготовление полупроводниковых подложек производят по следующей схеме:

- резка слитка монокристаллического полупроводникового материала;
- двухсторонняя шлифовка подложек;
- снятие фаски по периметру подложки;
- удаление нарушенного слоя химическим травлением либо двухсторонней полировкой;
- финишная полировка рабочей стороны подложек;
- контроль качества изготовления подложек.

Слиток полупроводникового материала для большинства применений имеет форму цилиндра со сформированными вдоль требуемых кристаллографических направлений основным и дополнительными срезами. Получают слитки, как правило, путём вытягивания из расплава по методу Чохральского с последующей калибровкой (обдиркой) до заданного диаметра путем обточки связанным абразивом (рис. 2.7) и формированием основного и дополнительных срезов алмазным инструментом на плоскошлифовальном станке.

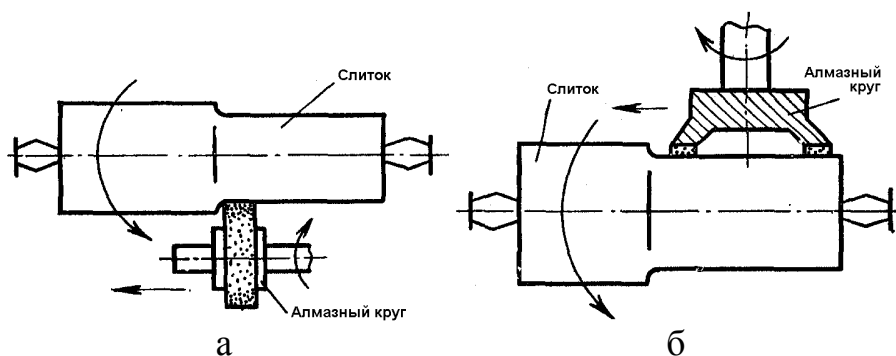


Рис. 2.7. Схема калибровки слитков: а) на круглошлифовальном станке; б) на специализированном круглошлифовальном станке

Процесс резки слитка заключается в следующем. Слиток с ориентированной осью закрепляют базовым срезом к оправке с помощью специальной клеящей мастики. По методу световых фигур или рентгенографическим методом устанавливают ось слитка заданным образом относительно плоскости реза, соответствующей требуемой плоскости получаемых пластин. Резание слитка проводят либо алмазными кругами с внутренней режущей кромкой (АКВР), либо многопроволочной пилой (рис. 2.8). В последнем случае резка может осуществляться как связанным, так и свободным абразивом, подаваемым в зону резки. В настоящее время для разрезания слитков диаметром более 200 мм используют проволочную резку. Это обусловлено тем, что при больших диаметрах слитка пропорционально возрастают размеры АКВР, что значительно осложняет возможность обеспечения точности и жёсткости системы резки без увеличения расхода кремния на одну подложку. Кроме того, системы проволочной резки более производительны.

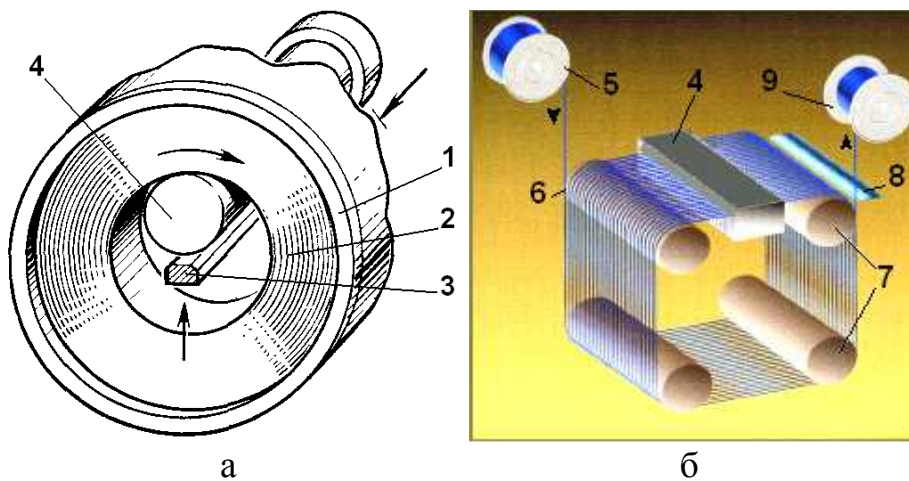


Рис. 2.8. Резка слитков на подложки алмазным диском с внутренней режущей кромкой (а) и проволочной пилой (б): 1 – цилиндрический барабан; 2 – алмазный круг с внутренней режущей кромкой; 3 – оправка; 4 – слиток; 5 – подающий ролик; 6 – тонкая проволока; 7 – направляющие ролики; 8 – форсунки для подачи суспензии; 9 – приемный ролик

После резки слитка подложки характеризуются параметром шероховатости поверхности R_z порядка нескольких мкм, толщиной нарушенного слоя более 10 мкм, а также значительным разбросом толщины. Указанные параметры значительно улучшаются в результате последующего двухстороннего шлифования подложек свободным абразивом с размером зерна абразива от 5 до 15 мкм, в ходе которого с каждой стороны удаляется 20 – 30 мкм. После данной обработки подложки имеют высокую степень плоскопараллельности и разброс геометрических параметров в пределах 2 мкм, а также необходимую для фотолитографических операций плоскостность поверхности. На следующем этапе производят снятие фаски по периметру подложки (рис. 2.9).

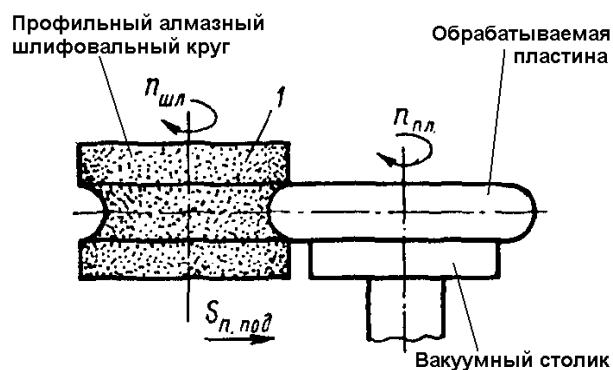


Рис. 2.9. Схема снятия фаски по периметру подложки

После операций механической обработки приповерхностный слой подложек остаётся повреждённым и загрязненным на глубину нарушенного слоя порядка 10 мкм. Поэтому на следующем этапе проводят удаление слоя толщиной порядка 20 мкм химическим травлением в смеси плавиковой, азотной и уксусной кислот либо в водных растворах щелочных растворов КОН или NaOH при температуре 90 °С (кинетика и механизмы травления полупроводников будут рассмотрены в следующей главе). Однако не всегда

возможно обеспечить одинаковую скорость травления по площади, особенно с увеличением размеров подложки. Для сохранения геометрии подложки для удаления нарушенного слоя в ряде случаев используют двухстороннее механическое полирование подложек.

Полированием называют получение зеркально гладкой поверхности путем абразивной обработки подложек мягким полировальным инструментом на основе фетра, велюра или батиста, пропитанных абразивными пастами с крупностью зерен абразива от 3 до 0,25 мкм. Различают три механизма полирования.

Согласно первому механизму, процесс полирования аналогичен шлифованию и рассматривается как супертонкое шлифование. Полирование происходит за счёт снятия микрослоя с поверхности подложки, как в результате среза, так и за счёт скола при перемешивании частиц абразива. Качество обработки определяется соотношением между твёрдостью абразива и полупроводникового материала и зависит также от формы абразивных частиц. В рамках данного механизма нарушенный слой сводится к минимуму, но полностью не удаляется.

Согласно второму механизму под действием абразива наружный микрослой полупроводника приобретает пластичность и способность к перемещению (теория пластической текучести). В результате этого движения рельеф подложки выравнивается. В данном случае форма зерна не играет роли, однако важным остается соотношение прочностных характеристик абразива и обрабатываемого материала. За счёт выравнивания рельефа поверхности отличается и характер нарушенного слоя.

Согласно третьему механизму, основными являются химические процессы на поверхности обрабатываемого материала (химико–механическое полирование). При химико–механическом полировании (ХМП) одновременно протекают две части процесса химическая и механическая. Химическая часть процесса заключается в том, что под воздействием теплоты происходит окисление материала подложки (например, в водных суспензиях с добавкой щелочей окислителем являются ионы гидроксида OH^-). Механическая часть процесса состоит в том, что частицы абразива удаляют механическим путём слой оксида, переводя его в раствор. В водных суспензиях оксидных абразивов (SiO_2 , Cr_2O_3 , CeO , ZnO_2) даже увеличение среднего размера частиц абразива практически не сказывается на качестве обработки поверхности.

Наконец окончательного качества полупроводниковых подложек добиваются на заключительной стадии изготовления путем ХМП рабочей стороны с помощью полирующей суспензии, представляющей собой коллоидный раствор частиц SiO_2 размером порядка 10 нм в водном растворе NaOH (рис. 2.10). Качество получаемой поверхности сложным образом зависит от давления на подложку, скорости вращения, материала полировальника, состава суспензии и pH раствора.

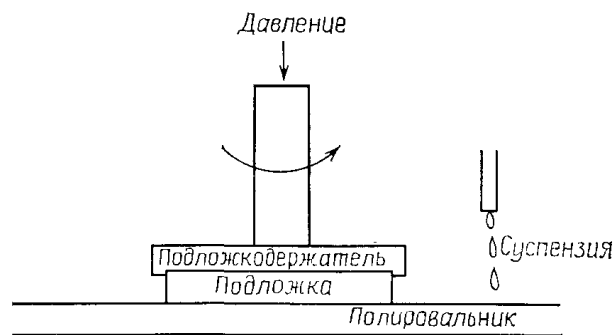


Рис. 2.10. Схема химико–механического полирования подложек

Таким образом, геометрические параметры и качество обработки поверхности подложек определяются рядом технологических операций механической обработки полупроводниковых материалов:

- толщина подложек закладывается на этапе резки слитка;
- разброс толщины и плоскопараллельность – на стадии двухсторонней шлифовки подложек;
- качество обработки поверхности подложек на стадиях травления (или двухсторонней полировки) и химико–механического полирования.

Однако на всех стадиях изготовления подложки подвергаются воздействию различных твердых материалов и жидких сред, которые тем или иным образом производят загрязнение поверхности подложек. А значит, для получения высококачественных подложек, пригодных для изготовления на них ИМС, необходимо выполнять эффективную очистку их поверхности от загрязнений.

2.3. Разновидности загрязнений и их влияние на технологические характеристики полупроводниковых подложек, источники загрязнения поверхности подложек

Методы очистки поверхности подложек зависят от характера загрязнений поверхности. Примеси на поверхности подложки делят на физические и химические загрязнения.

Физические (молекулярные) загрязнения обусловлены физической адсорбцией и слабо связаны с поверхностью полупроводника. Физическая адсорбция загрязнений к поверхности происходит в результате межмолекулярного взаимодействия, обусловленного силами Ван–дер–Ваальса либо в результате электростатической поляризации (кулоновского взаимодействия заряженных частиц). Иногда адсорбированные частицы могут преодолевать силы адсорбции и десорбироваться. Таким образом, физические загрязнения имеют обратимый характер.

Физические загрязнения подразделяются на неорганические и органические. К неорганическим загрязнениям относятся: пыль различного происхождения и абразивные частицы. Органические загрязнения, в свою очередь, подразделяют на полярные и неполярные загрязнения.

К полярным загрязнениям относятся жиры, белки, жирные кислоты, следы поверхностно–активных веществ, остатки синтетических плёнок. Молекулы

данных веществ обладают дипольными моментами и, как правило, ориентированы на поверхности. Ориентация таких молекул приводит к росту плотности их упаковки на поверхности и к сокращению площади загрязнения.

К неполярным загрязнениям относятся минеральные масла, парафин, остатки битумов, вазелины. Из-за малого дипольного момента данные вещества обладают высокой поверхностной энергией и способны покрывать большие площади.

Химические загрязнения связаны с поверхностью подложки силами хемосорбции. При этом образуются прочные ковалентные или ионные связи атомов адсорбированного вещества с поверхностью. Таким образом, химические загрязнения имеют необратимый характер.

Химические загрязнения подразделяются на ионные и атомные. К ионным загрязнениям относятся растворимые в воде соли, кислоты и основания, которые осаждаются на поверхность пластин из очищающих растворов и травителей, а также из окружающей среды.

Атомные загрязнения осаждаются на поверхности подложек в виде микрочастиц из атомов золота, железа, меди, серебра и других химических элементов, присутствующих в реактивах. Данные загрязнения могут покрывать всю поверхность подложки и даже образовывать макроскопические слои.

К химическим загрязнениям также относят остатки оксидных, нитридных или сульфидных плёнок.

Наличие на поверхности неорганических загрязнений приводит к росту дефектности осаждаемых слоёв. Кроме того, данные загрязнения являются маской при ионной имплантации примесей, а также травлении технологических слоёв и приводят к искажению топологического рисунка слоёв ИМС.

Органические загрязнения при термических операциях (например, в процессе эпитаксии или диффузии) разлагаются с образованием атомов углерода, которые являются активными центрами дефектообразования в кристаллической решётке формируемых слоёв и областей. Кроме того, нерастворимые в воде органические жировые загрязнения делают поверхность подложки гидрофобной, плохо смачиваемой водой, что затрудняет удаление химических загрязнений в водных растворах.

Химические загрязнения в виде примесей ионов и атомов металлов оказывают влияние на ряд важнейших электрических параметров приборных структур. Атомы металлов имеют аномально высокие коэффициенты диффузии в полупроводниках и существенно влияют на время жизни неосновных носителей и скорость поверхностной рекомбинации. Это приводит к росту токов утечки р–n–переходов. Ионные примеси способны изменять поверхностный потенциал, что приводит к несанкционированному появлению областей обогащения или обеднения в полупроводниковых структурах. Это, как правило, обуславливает дрейф важнейших электрофизических параметров структур: токов утечки, обратных напряжений, а также пороговых напряжений МОП – структур, что снижает надёжность ИМС.

Основными источниками загрязнений являются:

– абразивные и клеящие материалы, используемые при механической обработке полупроводниковых подложек;

- пыль и аэрозольные частицы, содержащиеся в воздушной среде производственных помещений;
- технологическое оборудование и оснастка, операционная и транспортная тара для подложек;
- технологические среды, органические и неорганические реагенты, промывочная вода;
- одежда, эпителий, косметика, бактерии и вирусы, жировые отпечатки пальцев оператора.

Из вышесказанного следует, что борьба с загрязнениями поверхности полупроводниковых подложек является крайне важной задачей в технологии интегральной электроники, которая должна осуществляться на всех стадиях технологического цикла изготовления ИМС начиная от изготовления подложек. Данную задачу решают в трёх аспектах:

- использование эффективных методов очистки подложек перед выполнением ответственных технологических операций;
- исключение попадания загрязнений на поверхность подложек из воздушной среды производственных помещений путём реализации техпроцесса в чистых производственных помещениях.
- исключение попадания загрязнений на поверхность подложек при выполнении операций в технологических установках путем использования чистых технологических сред и тщательной подготовки технологического оборудования.

2.4. Процессы удаления загрязнений с поверхности твёрдых тел

Методы, применяемые для очистки полупроводниковых подложек должны удовлетворять следующим требованиям:

- инертность по отношению к обрабатываемому материалу;
- пожаробезопасность и минимальная токсичность;
- высокая степень чистоты используемых химреактивов, газов и воды;
- оборудование для очистки должно конструироваться по принципу «бесконечного разбавления».

Методы очистки поверхностей подложек представлены на рис. 2.11. Как видно из рис. 2.11, все методы подразделяются по двум признакам: по физическому состоянию используемых для очистки веществ – на жидкостные и сухие, по механизму процессов – на физические и химические. К физическим методам очистки относят обезжиривание в органических растворителях, смывание загрязнений жидкостью, обработку ионами, обработку в вакууме или инертных средах при высокой температуре.



Рис. 2.11. Методы очистки подложек

К химическим методам очистки относят: растворение загрязнений в очищающих растворах, а также стравливание загрязнений вместе с тонким приповерхностным слоем полупроводникового материала в кислотных и щелочных травителях, в газовой среде либо в химически активной плазме. На практике физические и химические методы очистки дополняют друг друга и трудно разделимы друг от друга.

Основу процессов обезжиривания в органических растворителях составляют процессы замещения адсорбированных молекул примесей молекулами растворителей. В результате десорбции молекулы загрязнений переходят с очищаемой поверхности подложки в приповерхностный слой растворителя и далее равномерно распределяются в его объеме. В качестве растворителей для обезжиривания используют трихлорэтилен, толуол, спирты, бензин, ацетон. Существенным недостатком обработки в органических растворителях является неполное удаление загрязнений вследствие наступления равновесия в процессе очистки и уравнивания скоростей десорбции и адсорбции. Таким образом, наблюдается вторичное загрязнение поверхности из объема растворителя, что особенно характерно для однофазных систем.

Процесс очистки подложек в очищающих растворах основан на химическом взаимодействии компонентов растворов с загрязнениями поверхности. В случае очистки от органических загрязнений происходит их разрушение, окисление до легкорастворимых форм или до образования газообразных веществ и воды. Обработка в щелочных растворах основана на разложении жиров щелочью и переводе их в легкорастворимые мыла. Очистку поверхности от атомов и ионов металлов, а также оксидных, сульфидных и нитридных пленок проводят в кислотных растворах. Удаление атомных и ионных загрязнений с помощью кислот основано на вытеснении атомов и ионов металлов ионами водорода.

Как отмечалось выше, в ряде случаев удаление загрязнений проводят травлением с удалением тонкого приповерхностного слоя очищаемого материала. Процессы травления будут рассмотрены в следующих главах.

Для повышения эффективности очистки используют различные методы интенсификации. При этом ускоряются более медленные стадии процесса (например, подвод свежего реагента в зону обработки, отвод продуктов химических реакций от обрабатываемой поверхности), десорбция атомов или ионов и т.д.

Методы интенсификации подразделяются на физические и химические и комбинированные. К физическим методам интенсификации относят нагрев, кипячение, обработку струёй, гидроциркуляцией, протоком, гидромеханическую отмывку, центрифугирование, обработку ультра- и мегазвуком, плазменную обработку. К химическим методам – очистку поверхностно-активными веществами (ПАВ), комплексообразователями. Комбинированные методы интенсификации объединяют в себе физические и химические методы (обработка горячей струёй, подогрев ультразвуковой ванны, использование травителей в сочетании с использованием ультразвука).

По способу реализации обработка поверхности подложек подразделяется на объёмную химическую и химическую обработку в аэрозолях. Объёмная химическая обработка поверхности подложек реализуется погружением кассет с пластинами в ванну, заполненную технологическим раствором. Для объёмной химической обработки характерны следующие отличительные особенности:

- для каждого технологического раствора, используемого в техпроцессе, должна быть отдельная ванна;
- для каждого технологического раствора устанавливается регламент замены, исходя из количества обработанных в одном объёме раствора пластин и срока годности раствора;
- нагрев технологического раствора осуществляется непосредственно в ванне;
- отмывка пластин от технологического раствора производится в специальных ваннах с проточной деионизованной водой;
- сушка пластин после отмывки осуществляется на специальном оборудовании, чаще всего в центрифуге.

Химическая обработка в аэрозолях реализуется путем обработки пластин в специальной ванне в виде центрифуги, в которую в виде аэрозолей вначале подается технологический раствор или его компоненты, затем деионизованная

вода, а в конце – очищенный азот для высушивания пластин. Для обработки пластин в аэрозолях характерны следующие особенности:

– каждая пластина проходит обработку в новой порции технологического раствора;

– в одной ванне реализуются все стадии процесса химической обработки подложек.

Большинство методов очистки полупроводниковых подложек требует последовательного использования нескольких очищающих растворов. Как правило, очистку поверхности подложек от загрязнений проводят в следующей последовательности:

- 1) удаление органических загрязнений;
- 2) удаление слоёв оксида;
- 3) удаление механических частиц;
- 4) удаление металлических и ионных примесей.

Для реализации данной последовательности необходима следующая очередность применения технологических растворов:

- травитель КАРО;
- раствор плавиковой кислоты;
- перекисно–аммиачный раствор (ПАР);
- перекисно–соляной раствор (ПСР).

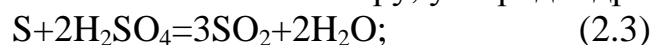
Травитель КАРО представляет собой смесь серной кислоты и перекиси водорода в соотношении 10:1. Он используется при температуре 90 – 150 °С. Взаимодействие концентрированной серной кислоты с перекисью водорода происходит по реакции:



Образующаяся пероксомоносерная кислота при нагревании разлагается с образованием атомарного кислорода:



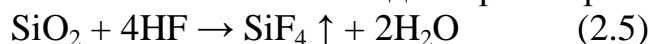
Атомарный кислород интенсивно взаимодействует с органическими веществами, которые в результате эмульгируются или растворяются в травителе. Кроме того, смесь КАРО способна очищать поверхность от неметаллических загрязнений, т.к. при нагревании концентрированная серная кислота может окислять такие неметаллы как серу, углерод и др.:



Основным недостатком очистки пластин в смеси КАРО является загрязнение поверхности подложек механическими частицами.

Для удаления с поверхности кремния тонкого естественного слоя оксида химическим травлением используют, как правило, травители на основе водных растворов плавиковой кислоты ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:10$). Травление SiO_2

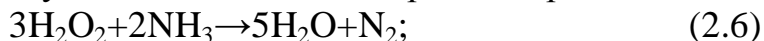
в водном растворе HF происходит по реакции:



Кроме того, обработка в растворе HF эффективна для снижения концентрации металлов на поверхности кремния. Однако при этом наблюдается значительное загрязнение поверхности микрочастицами, что связано с появлением свободных (ненасыщенных) связей на поверхности кремния, повышающих активность поверхности и ее сорбционную

способность. Более того, по данной причине на завершающей стадии обработки может наблюдаться адсорбция атомов тяжёлых металлов и примесей углерода.

Обработка подложек в ПАР ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1,5:7$) при температуре $60 - 80\text{ }^\circ\text{C}$ является наиболее универсальной обработкой, обеспечивающей эффективное удаление с поверхности механических и органических загрязнений, а также десорбцию атомарных и ионных примесей. В щелочной среде в присутствии аммиака идет реакция разложения перекиси водорода:



Выделяющийся атомарный кислород обладает сильными окислительными свойствами, что обеспечивает деструкцию молекул органических загрязнений и перевод их в водорастворимое состояние. Одновременно с этим происходит окисление атомов металлов до ионного состояния. За счёт образования комплексных соединений с аммиаком происходит десорбция с поверхности ионных примесей. Кроме того, за счёт интенсивного перемешивания раствора, обусловленного выделением пузырьков кислорода, и создания щелочной аммиачной среды происходит эффективная очистка поверхности от микрочастиц. Однако при использовании ПАР может наблюдаться загрязнение поверхности кремния примесями алюминия, магния и железа, что в ряде случаев требует дополнительной обработки в кислотных растворах.

Очистку поверхности подложек от металлических примесей производят в перекисно-соляном растворе ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=5:1:1$) при температуре $70 - 90\text{ }^\circ\text{C}$. Действие ПСР основано на образовании хорошо растворимых простых и комплексных солей соляной кислоты с ионными и атомарными загрязнениями на поверхности кремния и диоксида кремния. ПСР эффективен для удаления как щелочных, так и тяжёлых металлов.

2.5. Чистые производственные помещения

В связи с малыми размерами элементов современных ИМС (намного меньше 1 мкм), изготовление ИМС осуществляют в специальных чистых помещениях, к которым предъявляются особо жесткие требования по микроклимату. Под микроклиматом понимают параметры воздушной среды, заключённой в ограниченном объёме (количество загрязняющих частиц в воздухе, внутрикомнатное давление, температуру, влажность).

Загрязняющей частицей является любая аэрозоль (взвесь жидких или твердых частиц в атмосфере). Источниками загрязнений являются: 1) воздушная среда, 2) работающее оборудование, 3) производственный персонал.

Все производственные помещения для производства изделий интегральной электроники имеют определенный класс чистоты. Класс чистоты – основная характеристика чистых помещений, характеризующаяся запыленностью воздуха. Запыленность воздуха – максимальная концентрация аэрозольных частиц определенного размера, находящихся в

единице объема воздуха. Требования к запыленности воздуха чистых помещений различных классов чистоты приведены в табл. 2.2

Таблица 2.2. Допустимое количество частиц в помещениях различных классов чистоты

Класс чистоты	Число частиц в 1 л воздуха				
	$\geq 0,1$ мкм	$\geq 0,2$ мкм	$\geq 0,3$ мкм	$\geq 0,5$ мкм	≥ 5 мкм
1	1,2	0,26	0,105	0,035	0
10	12,3	2,6	1,05	0,35	0
100	–	26,3	10,5	3,5	0
1000	–	–	–	35	0,2
10000	–	–	–	350	2,4
100000	–	–	–	3500	25

Для получения и поддержания в помещении необходимого класса чистоты существуют следующие четыре принципа:

Принцип 1. Частицы не должны вноситься извне.

1. Перед тем, как войти в чистое помещение проводят удаление пыли с помощью воздушного душа. Это необходимо для того, чтобы одежда не несла в чистую комнату загрязнений.

2. Прежде чем внести в чистую комнату какой-либо предмет, его чистят в тамбуре, либо он проходит пропускной бокс.

3. Для предотвращения загрязнения воздуха в чистом помещении поддерживается избыток давления.

4. Чистая комната должна обладать высокой герметичностью.

Принцип 2. В чистых комнатах не допускается появление новых частиц.

1. Для того, чтобы воспрепятствовать распространению пыли от работников, последние носят очищенную одежду, выполненную по специальному фасону из непылящего материала.

2. Производственные линии делают короткими, стараются исключить ненужные движения.

3. Для внутренней отделки чистых помещений выбирают материалы, выделяющие минимальное количество загрязняющих частиц.

4. В чистые помещения ограничивается внос предметов, способных привести к появлению загрязнений.

5. Дважды в смену в чистых помещениях производится влажная уборка технологического оборудования, стен, пола.

Принцип 3. Частицы не должны задерживаться.

1. При строительстве чистых помещений выбирают формы, затрудняющие скопление загрязняющих частиц, внутренняя отделка чистых помещений должна легко поддаваться очистке.

2. Для изготовления чистых помещений применяют антистатические материалы, затрудняющие прилипание взвешенных частиц.

Принцип 4. Появляющиеся частицы не должны рассеиваться по объему чистого помещения.

1. Вблизи источника загрязнения устанавливают приспособления для отсоса генерируемых частиц (вакуумная пылеуборка, вытяжная вентиляция).

2. С помощью высокоэффективных фильтров принимают меры по очистке подводимого воздуха.

3. Воздушные потоки в помещении носят ламинарный характер, а загрязненный воздух удаляют, не позволяя ему рассеиваться.

Комплекс мер и требований, предъявляемых к производственным помещениям, персоналу, работающему в этих помещениях, спецодежде персонала и регламентирующий порядок уборки в помещениях и контроль чистоты называют электронной гигиеной (ЭГ).

Комплекс требований к действиям персонала при ремонте, обслуживании оборудования и при работе с полупроводниковыми пластинами и оснасткой, обеспечивающий минимальный прирост дефектности и исключаящий появление брака называют культурой производства.

Производство изделий интегральной электроники осуществляют в чистых производственных модулях. Чистым производственным модулем называют совокупность чистых комнат, зон обслуживания, а также бытовых комнат, туалетов, раздевалок, подсобных помещений, соединенных чистым коридором (рис. 2.12).

Чистая комната – чистое помещение определенного объема, в котором реализуется какая-либо технологическая операция, оснащено определенным типом оборудования и в котором соблюдены все требования к технологическому микроклимату. Каждая из чистых комнат окружена сервисной зоной (или зоной обслуживания). В чистой комнате размещается технологическое оборудование и персонал. При этом в чистой комнате расположены только пульта управления, а также загрузочно-разгрузочные устройства. Остальные части оборудования расположены в сервисной зоне.

Вход в чистый производственный модуль осуществляется через специальную шлюзовую камеру (узкий коридор шириной 1,2 – 1,5 м в боковых стенках которого расположены патрубки, обеспечивающие обдув очищенным азотом).

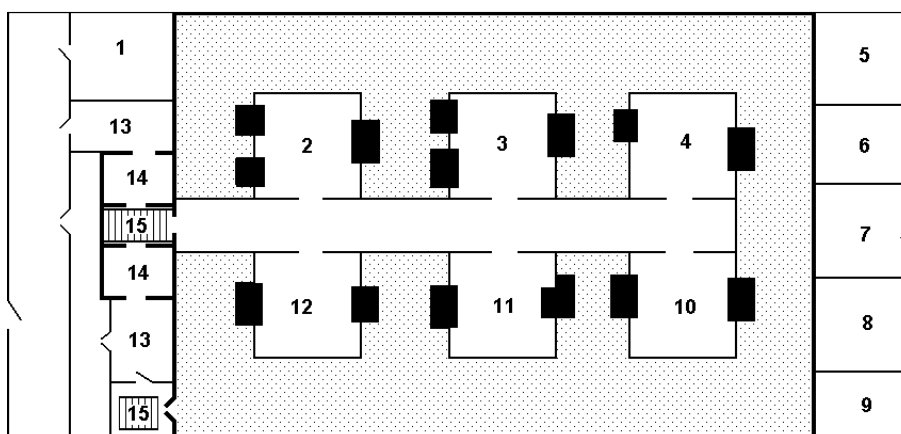


Рис. 2.12. Схема чистого производственного модуля: 1 – бытовые помещения; 2 – участок ионной имплантации; 3 – участок фотолитографии; 4 – участок плазмохимического травления; 5 – участок осушки и очистки газов; 6 – участок стирки технологической

одежды; 7 – участок отмывки кварцевой оснастки; 8 – участок очистки подколпачных устройств; 9 – административные помещения; 10 – участок термодиффузии; 11 – измерительный участок; 12 – участок напыления; 13, 14 – гардероб первичного и вторичного переодевания; 15 – камера – шлюз для обдува персонала

В чистом производственном модуле помещения имеют различный класс чистоты. В проходном коридоре класс чистоты – 100, в сервисной зоне 1000, в чистой комнате – 10, а на рабочем месте – 1.

Чистое рабочее место – рабочее место с уменьшенной запыленностью, характеризуемое подачей фильтрованного воздуха и имеющее низкий класс чистоты.

Попадание из зоны обслуживания в чистое помещение должно быть исключено. При входе в модуль персонал дважды переодевается. Сначала в гардеробе первого переодевания (13) персонал снимает одежду, надевает халат и тапочки. Затем перемещается в гардероб второго переодевания (14) где облачается в защитный костюм (комбинезон с капюшоном, перчатки, бахилы, и лицевую маску, закрывающую рот и нос). После этого через шлюз 15 персонал попадает в чистое производственное помещение.

Чистые комнаты имеют форму удлиненного прямоугольника и чередующиеся через них зоны обслуживания. Ширина коридора около 2,4 м. Размеры зон обслуживания определяются технологическим оборудованием, и варьируются от 1,5 до 6,0 м.

Число чистых комнат определяется сложностью технологического процесса изготовления изделий. С помощью чистого коридора осуществляется связь, как с чистыми комнатами, так и с бытовыми помещениями, а также осуществляется передача изделий (в современных модулях транспортировка партий пластин производится автоматическими транспортными системами).

Потолки чистых помещений представляют собой систему ячеек с фильтрами тонкой очистки (1), через которые сверху подается воздух, и освещающими устройствами, (рис. 2.13). Удаление пыли из чистых помещений достигается за счет рациональной очистки и циркуляции воздуха. Наибольшая чистота достигается при скорости ламинарного потока воздуха 0,25 – 0,45 м/с. Поверхность пола (2) почти целиком занята вытяжными отверстиями. Под полом чистой комнаты имеется пространство для сбора и удаления воздуха. Воздушные потоки направлены от потолка по направлению к полу. Следовательно, если в верхней части помещения пыль отсутствует, то и во всей комнате будет достигаться высокая степень чистоты. Скорость ламинарного потока воздуха в чистой комнате составляет порядка 0,12 м/с, что обеспечивает класс чистоты 100 и даже 10. Однако чистые рабочие места, как правило, оборудуются зонами местного обеспыливания с фильтрами финишной очистки, создающими ламинарный поток воздуха со скоростью 0,45 м/с, что обеспечивает более высокий класс чистоты в рабочей зоне.

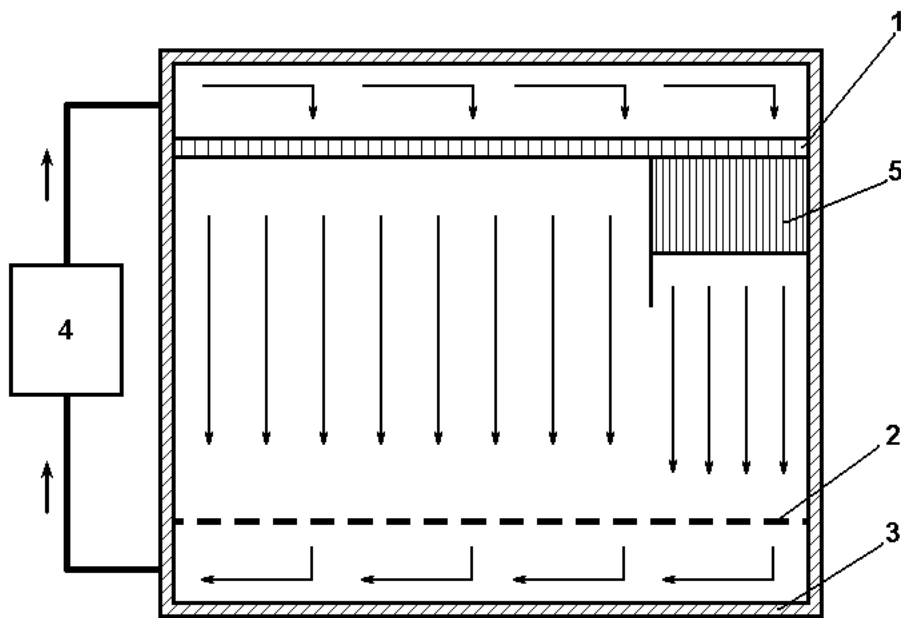


Рис. 2.13. Схема воздухообмена чистой комнаты: 1 – высокоэффективные потолочные фильтры для очистки воздуха; 2 – пол чистой комнаты с отверстиями; 3 – пол производственного помещения; 4 – нагнетатель воздуха; 5 – зона местного обеспыливания с фильтром финишной очистки

2.6. Контроль дефектности технологического процесса

Источниками возникновения дефектов, являющимися последствиями загрязненности в чистых помещениях, являются:

- степень очистки подающегося воздуха;
- технологический и обслуживающий персонал;
- технологическое оборудование;
- технологические материалы.

Одним из самых существенных источников появления загрязнения является технологический и обслуживающий персонал. Поэтому чрезвычайно важным фактором для снижения уровня загрязненности, вносимой персоналом, является строгое соблюдение регламента его поведения (требований ЭГ и культуры производства) и соответствующая подготовка.

Источниками загрязненности, вносимой технологическим оборудованием, являются движущиеся и трущиеся детали, ослабленные резьбовые соединения, следы коррозии. Для снижения влияния данного фактора обязательным является соответствующая подготовка технологического оборудования к работе (ежесменная протирка оборудования и своевременное проведение регламентных работ) и его аттестация на привнесенную загрязненность.

К технологическим материалам относят:

- деионизованную воду;
- реактивы и газы;
- полупроводниковые пластины.

Если используемые технологические среды подвергаются глубокой очистке, а также жёсткому контролю на предмет загрязнений, то полупроводниковые пластины являются источником загрязнений на любой стадии изготовления из-за разрушения кромки, а также в случае боя пластин. Поэтому чрезвычайно важно соблюдать следующие правила при работе с пластинами:

- перегрузка пластин из транспортных кассет в операционные и наоборот должна производиться с помощью специализированного оборудования;
- технологическая оснастка должна обеспечивать лёгкое, без особых усилий размещение пластин в её пазах и их извлечение;
- постоянно должны проводиться мероприятия по уменьшению боя пластин;
- в случае боя пластин на оборудовании должна быть проведена его тщательная уборка;
- в случае падения пластины на пол она должна быть забракована;
- при загрузке пластин в кассету или другую технологическую оснастку пластина не должна издавать звука.

Тем не менее, не смотря на все меры, предпринимаемые для предотвращения появления загрязненности, успешное производство изделий интегральной электроники невозможно без постоянного контроля загрязненности на пластинах. Данный контроль осуществляют путем оценки качества микросхем на всех стадиях изготовления визуально, с помощью оптического или растрового электронного микроскопа, а также с помощью автоматизированных анализаторов поверхности.

Аттестационный и производственный контроль уровня загрязненности.

Целью аттестационного контроля является определение уровня привносимой загрязненности на конкретных технологических операциях. Аттестационный контроль выполняют на контрольных пластинах, в том числе и со сформированными тестовыми структурами, позволяющими производить электрические измерения на наличие загрязнений. Аттестационный контроль производится, как правило, при настройке технологического процесса, а также при вводе в эксплуатацию новых единиц оборудования.

Целью производственного контроля является своевременная отбраковка загрязненных изделий на различных стадиях изготовления и обеспечение требуемого качества изделий путем выявления явных загрязнений, влияющих на процент выхода годных изделий, а также скрытых загрязнений, снижающих надёжность изделий. Контроль может носить как активный, так и пассивный характер. Активный контроль (диагностирующий) даёт информацию о природе загрязнений. Пассивный контроль регистрирует наличие загрязнений по принципу «годен – не годен», не вскрывая механизма его появления.

Контроль загрязненности подразделяют на входной, пооперационный (межоперационный) и финишный. При входном контроле проверяют качество поступающих на данную операцию полупроводниковых материалов, фотошаблонов и промежуточных оригиналов, а также других

материалов: металлов, диэлектриков, органических и неорганических веществ, деталей корпусов.

Пооперационный контроль даёт оценку качества выполнения определённых операций (например, очистки поверхности, эпитаксиального наращивания, окисления, диффузии, нанесения плёнок и т.д.). Данный вид контроля проводят как в ходе выполнения операции, так и по её окончании. Кроме того, контроль плотности загрязнений и дефектов может выполняться с применением дополнительных операций (например, травление пластин для удаления окисных плёнок с последующей обработкой подложки для выявления дефектов упаковки и контроля их плотности). Объектами пооперационного контроля являются не только изготовленные структуры, но и технологические режимы и среды, используемые на данной операции. В случае обнаружения любых изменений плотности загрязнений и дефектов на данной операции должны быть приняты соответствующие меры для коррекции параметров технологического процесса.

Финишный контроль проводят после завершения определенного этапа изготовления ИМС (например, функционального контроля ИМС на подложке). На завершающем этапе производства финишный контроль совпадает с контролем качества годных изделий.

Кроме того, постоянно должны контролироваться процент выход годных изделий и причины отказов микросхем. При снижении процента выхода годных изделий должен проводиться анализ и устраняться причины появления брака. При обнаружении новых видов загрязнений и дефектов, являющихся причиной снижения процента выхода годных изделий и отказов микросхем, должны вводиться методы контроля этих видов брака. Для успешного производства ИМС необходимо постоянно контролировать, регулировать и снижать плотность различных загрязнений и дефектов структуры ИМС.

ГЛАВА 3. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН В ЖИДКИХ СРЕДАХ

3.1. Классификация типов обработки поверхности

Обработку поверхности полупроводниковых пластин подразделяют на очистку и травление. При очистке удаляют только загрязнения поверхности. При травлении происходит удаление поверхностных слоёв пластины либо технологических слоёв. Методы очистки и травления представлены на рис. 2.11. Основные методы очистки поверхности рассмотрены в разделе 2.4. Травлением в жидких средах (или химическим травлением) называется процесс переноса вещества из твёрдой фазы в жидкую, т.е. растворение вещества подложки или технологических слоев химическими реактивами (щелочами, кислотами и их солями), называемыми травителями.

Основными целями процессов химического травления являются:

- удаление с поверхности полупроводниковой подложки механически нарушенного слоя;
- снятие с полупроводниковой подложки слоя исходного материала определённой толщины;
- локальное удаление материала подложки или технологического слоя с определённых участков поверхности;
- создание определённых электрофизических свойств обрабатываемой поверхности подложки;
- выявление структурных дефектов кристаллической решётки полупроводниковой подложки;
- получение мезаструктур.

Известны следующие методы травления полупроводников:

Изотропное травление – растворение полупроводника происходит с одинаковой скоростью травления по всем направлениям монокристаллической подложки. Применяют для удаления нарушенного поверхностного слоя и полирования поверхности.

Анизотропное травление – растворение полупроводника происходит с различной скоростью по разным направлениям монокристаллической подложки. Используют для структурных поверхностных и объёмных дефектов.

Селективное травление – растворение полупроводника происходит с различной скоростью на разных участках поверхности с одной и той же кристаллографической ориентацией (либо с различными скоростями травления слоёв разного химического состава в избирательных травителях). Позволяет выявлять дефекты и несовершенства кристаллической структуры подложек (дислокации, дефекты упаковки, границы зерен и др.), а также p–n–переходы и различные фазовые включения;

Локальное травление – удаление материала происходит лишь со строго ограниченных и заданных участков подложки. Обеспечивает получение элементов требуемой конфигурации и заданного рельефа на поверхности подложек. Позволяет создавать необходимый рисунок микросхемы (создавать заданную конфигурацию технологических слоёв, проводить мезатравление). Для локального химического травления используют изотропные и анизотропные травители.

Послойное травление – равномерное последовательное снятие тонких поверхностных слоёв полупроводника. Применяют для изучения поверхностных и объёмных дефектов кристаллической структуры подложек и эпитаксиальных слоёв. Используют полирующие травители с малой скоростью травления (менее 0,1 мкм/мин).

3.2. Кинетика процесса химического травления

По характеру взаимодействия с веществом химическое травление является реакцией растворения. Различают три типа растворения.

1. Молекулярное растворение. В этом случае химическая формула растворяемого вещества в исходном состоянии и в растворе полностью

идентична. После удаления (испарения) растворителя растворенное вещество может быть выделено в химически неизменном виде.

2. Ионное растворение. В данном случае исходное состояние вещества и его состояние в растворе не идентичны. В растворе происходит растворение ионного кристалла на катионы и анионы, которые окружены сольватационными оболочками (например, полярными молекулами воды), которые обеспечивают устойчивость таких растворов. Однако в случае удаления растворителя растворённое вещество может быть получено в химически неизменном виде.

3. Реактивное растворение. В отличие от первых двух типов растворение сопровождается химическим взаимодействием между растворённым веществом и растворителем, сопровождающееся значительным тепловым эффектом, существенно превышающим выделение теплоты при молекулярном или ионном растворении. Таким образом, в растворе существуют продукты реакции, химически отличные от исходного состояния системы. Удаление остатков растворителя не позволяет получить растворённое вещество в исходном состоянии.

Все процессы травления полупроводниковых материалов являются реактивными. При этом процесс травления может быть представлен в виде пяти стадий.

1. Перенос молекул (ионов) травителя из объёма раствора к поверхности полупроводника. В начальный момент травления за счёт интенсивной реакции вблизи поверхности пластины полупроводника образуется слой, обедненный молекулами травителя. Это приводит к возникновению градиента концентрации травителя и возникновению диффузионного потока этих молекул к поверхности полупроводника.

2. Адсорбция молекул травителя на поверхности полупроводника. На данной стадии молекулы травителя вступают в контакт с поверхностью полупроводника. Этот контакт может являться либо химической адсорбцией, либо физической адсорбцией.

В случае химической адсорбции в зависимости от типа поверхности и адсорбированных компонентов между молекулами травителя и поверхностью полупроводника возникают либо силы обменного взаимодействия, либо силы кулоновского притяжения. В случае физической адсорбции молекулы травителя удерживаются на поверхности силами Ван-дер-Ваальса.

3. Кинетическая стадия процесса. Данная стадия представляет собой собственно химическое взаимодействие адсорбированных молекул травителя с полупроводником. Происходит разрыв химических связей между атомами, расположенными в объёме и поверхностными атомами полупроводника с последующим переходом последних в раствор. Механизмы, ответственные за протекание данной стадии будут отдельно рассмотрены в разделе 3.3.

4. Десорбция продуктов реакции с поверхности полупроводника. В ходе кинетической стадии на поверхности полупроводника накапливаются продукты реакции, которые могут быть химически или физически связаны

с ней. Прежде чем перевести их в раствор, необходимо эти связи разрушить.

5. Удаление продуктов реакции с поверхности полупроводника в объём раствора. За счёт химического взаимодействия полупроводника с травителем вблизи поверхности полупроводника накапливаются продукты реакции, концентрация которых в объёме раствора существенно меньше, чем на границе полупроводник – раствор. Возникает градиент концентрации продуктов травления, обуславливающий возникновение диффузионного потока молекул этих продуктов, направленного от поверхности полупроводника в объём раствора. Данная стадия является аналогичной, но обратной по знаку стадии 1, с той лишь разницей, что происходит диффузионный перенос не молекул травителя к подложке, а молекул, возникших в результате взаимодействия с полупроводником с подложки в объём раствора.

Как видно, весь процесс травления состоит из двух диффузионных стадий, двух адгезионных стадий и одной кинетической стадии. Каждая из этих стадий может являться звеном, ограничивающим скорость процесса травления. В большинстве случаев скорость реакции ограничена либо диффузией молекул травителя или продуктов реакции в растворе, либо скоростью химической реакции на поверхности полупроводника. В зависимости от того, какая стадия является самой медленной, меняется характер и результаты процесса травления.

Если наиболее медленно протекают диффузионные процессы, то скорость процесса травления никак не связана со свойствами поверхности полупроводника. Поэтому травление в данном случае должно протекать изотропно, независимо от кристаллографического направления, а поверхность полупроводника должна быть гладкой. Травители с диффузионным контролем скорости травления являются полирующими, а сам процесс травления – интегральным. Усилить полирующие свойства травителей можно уменьшением скорости протекания в них диффузионных процессов за счёт увеличения вязкости раствора (путём добавки гликолей, глицерина, полиспиртов), либо за счёт уменьшения температуры раствора. Интенсивное перемешивание раствора, наоборот, снимает диффузионное ограничение и ухудшает полирующие свойства травителя.

Если диффузионные процессы протекают настолько быстро, что лимитирующей является кинетическая стадия, то скорость травления будет различной для плоскостей кристаллов с различной плотностью упаковки атомов, а само травление будет анизотропным. Для полупроводников с алмазоподобной кристаллической решёткой (кремний, германий) и решёткой типа сфалерита (полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$), как правило, наблюдается следующее соотношение скоростей травления: $v_{(100)} > v_{(110)} > v_{(111)}$. Если на поверхности подложки имеются дефекты, то в этих местах происходит локальное увеличение скорости травления. «Дефектное» место растравливается с образованием фигуры (ямки) травления, форма которой определяется кристаллографической ориентацией поверхности подложки. Поэтому в данном случае гладкую

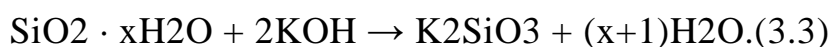
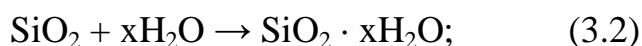
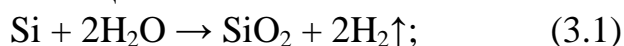
поверхность получить не удаётся. Травители с кинетическим контролем называют дифференциальными, а процесс травления – селективным.

Важно отметить, что с увеличением времени процесса даже селективные травители проявляют тенденцию к выравниванию поверхности. Кроме того, в начальный момент времени процесса травления отсутствует диффузионное ограничение, а значит, все травители работают селективно.

3.3. Механизмы травления полупроводников

При отсутствии электрического поля травление полупроводников в жидких средах может происходить по двум принципиально разным механизмам: химическому и электрохимическому.

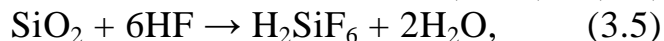
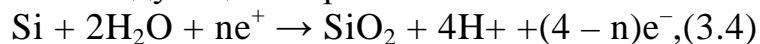
При химическом механизме травления на поверхности полупроводника протекают окислительно–восстановительные реакции, обусловленные непосредственным, чисто химическим взаимодействием молекул травителя с поверхностными атомами. При этом все продукты реакции в виде растворимых комплексов полупроводника образуются в травителе одновременно. Процесс травления полупроводников по данному механизму подчиняется законам химической кинетики гетерогенных реакций. Примером химического механизма может служить травление кремния в щёлочи:



Процесс травления кремния в щёлочи включает в себя реакции окисления кремния до его диоксида и восстановления воды при нагревании до молекулярного водорода (3.1). Наряду с этими процессами в системе происходит гидратация SiO_2 (3.2) и взаимодействие со щёлочью гидратированного SiO_2 с образованием метасиликатов (в данном случае метасиликата калия) (3.3)

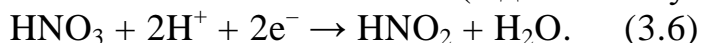
При электрохимическом механизме травления на поверхности полупроводника протекают две сопряжённые реакции: анодного окисления полупроводника и катодного восстановления окислителя. При атомарно гладкой поверхности полупроводника эти реакции могут быть локализованы на одних и тех же участках. На реальной поверхности эти реакции пространственно разделены. Таким образом, поверхность травления представляет собой растр микроанодных и микрокатодных участков. Причём данные реакции локализуются, как правило, в местах кристаллографических или химических неоднородностей (на микровыступах, микровпадинах, в местах локализации загрязнений и т.д.). Электрическая связь между анодами и катодами осуществляется через раствор травителя. Более подробно электрохимический механизм травления полупроводников будет рассмотрен на примере травления кремния в смеси кислот HNO_3 – HF .

При травлении кремния в смеси $\text{HNO}_3 - \text{HF}$ на микроанодах поверхности протекает анодная реакция окисления кремния, а также комплексообразование и перевод в раствор атомов кремния в виде устойчивых комплексных анионов. Схему анодной реакции можно представить следующим образом:



где n – эффективная валентность саморастворения кремния (количество ковалентных связей, удерживающих поверхностный атом), которая в зависимости от условий протекания реакции может изменяться от 2 до 4, e^+ – дырки, e^- – электроны. Анодная реакция сопровождается разрывом ковалентных связей поверхностных атомов, при участии дырок, которые создаются при протекании катодной реакции.

На микрокатодах поверхности протекает катодная реакция восстановления основного окислителя (в данном случае это HNO_3):



Реакция (3.6) протекает в несколько этапов:



Наименее медленной стадией является реакция (3.7), в ходе которой из молекул азотной кислоты регенерируются молекулы диоксида азота NO_2 . Для начала реакции необходимо присутствие в растворе некоторого количества молекул азотистой кислоты HNO_2 . Затем происходит её накопление в растворе согласно реакции (3.9). В ходе реакции (3.8) происходит генерация дырок за счёт захвата электронов из валентной зоны кремния. Эти дырки затем расходуются в анодном процессе и ответственны за отрыв атомов кремния от поверхности.

Скорости анодной и катодной реакций могут существенно различаться. Поэтому в зависимости от самой медленной реакции различают режимы (травители) с катодным или анодным контролем. В случае катодного контроля скорость реакции саморастворения связана только со стадией восстановления, которая определяется интенсивностью доставки молекул окислителя к катодным участкам и не зависит от свойств полупроводника. Таким образом, катодный контроль является полным аналогом диффузионного ограничения реакции. Травители с катодным контролем работают как полирующие.

Анодный процесс связан с отрывом атомов полупроводника в раствор. Поэтому скорость анодной реакции определяется энергией связи поверхностных атомов с решёткой и зависит от плотности упаковки атомов, наличия дефектов, примесей и т.д. Скорость травления при анодном контроле анизотропна. Анодный контроль является аналогом кинетического ограничения. Травители с анодным контролем работают селективно, поэтому подбор их состава в основном определяется свойствами полупроводникового материала.

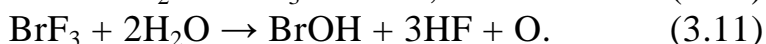
3.4. Особенности жидкостного травления полупроводников и полупроводниковых соединений

В настоящее время разработано много составов травителей различного назначения для жидкостного травления полупроводников, зависящих от свойств полупроводника и условий применения. В основе каждого травителя присутствуют два обязательных компонента: окислитель и растворитель оксида (комплексообразователь).

В качестве окислителей используют минеральные кислоты HNO_3 , H_2SO_4 , пероксиды H_2O_2 , Na_2O_2 , комплексные соли $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, KMnO_4 , NaClO . В качестве комплексообразователей – галоидосодержащие кислоты HF , HCl , гидроксиды KOH , NaOH . Вода в зависимости от условий применения может выступать и в роли окислителя, и роли комплексообразователя.

Кроме основных компонентов в состав травителей могут входить регуляторы скорости травления – замедлители или ускорители. В качестве замедлителя, как правило, используют уксусную кислоту. Действие замедлителя основано на его диссоциации в водном растворе, что приводит к снижению степени диссоциации минеральных кислот, принимающих участие в реакции. При этом само вещество замедлителя участия в реакции не принимает.

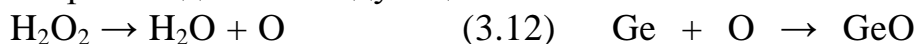
Ускорители в большинстве случаев работают в качестве дополнительных окислителей полупроводника, увеличивая суммарную скорость процесса травления (при условии достаточного количества комплексообразователя). В качестве ускорителей используют тяжёлые галогены (Br_2 , I_2), соответствующие кислоты (HBr , HI) или соли (KBr , NaI). Механизм работы ускорителя поясняется схемой:



Роль дополнительного окислителя выполняет атомарный кислород, образующийся в ходе реакции (3.11).

Кроме того, в состав травителей могут входить модификаторы вязкости (глицерины, гликоли), а также поверхностно-активные вещества.

Особенностью жидкостного травления германия является отсутствие на его поверхности стабильного оксида, что обеспечивает относительную простоту его обработки как в щелочных, так и в кислых средах. Для травления германия могут использоваться травители на основе перекиси водорода, а также на основе системы $\text{HNO}_3 - \text{HF}$. Травление германия в перекисном травителе происходит по следующей схеме:



На первой стадии (3.12) пероксид водорода разлагается с выделением атомарного кислорода. Затем в два этапа происходит окисление германия (3.13). Образовавшийся оксид германия растворяется в воде с образованием метагерманиевой кислоты (3.14). Для ускорения процесса

травления в перекисный травитель может вводиться раствор HF или NaOH.

Травители на основе системы $\text{HNO}_3 - \text{HF}$ широко используются для получения гладкой поверхности пластин германия. Кинетика растворения германия в травителях данного типа полностью подчиняются электрохимическому механизму и подобна кинетике травления кремния (3.4 – 3.9). Наиболее широкое распространение среди травителей на базе данной системы получил следующий состав: 25 мл HNO_3 ; 15 мл HF; 15 мл CH_3COOH ; 0,3 мл Br_2 . Для травления германия также используют йодные травители, в состав которых входят: HNO_3 , HF, CH_3COOH и I_2 . Для селективного травления германия используют травитель $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{AgNO}_3$ (1:2:2).

В отличие от германия на поверхности кремния формируется весьма стабильный оксид SiO_2 , что несколько затрудняет подбор травителя. Как правило, для травления кремния используют щелочные травители на основе KOH или NaOH при их концентрации от 1 до 30 % при температуре от 50 до 100 °C, либо травители на основе системы HF – HNO_3 при различных соотношениях HF к HNO_3 . Как было показано ранее, в первом случае процесс травления подчиняется химическому механизму, во втором – имеет место ярко выраженный электрохимический механизм.

Полупроводниковые соединения типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ с алмазоподобной решёткой характеризуются полярностью структуры и чередованием атомных слоёв, образованных атомами металла и металлоида. Поскольку их химические свойства значительно различаются, то значительно затруднён выбор травителя, одинаково хорошо полирующего металлические и металлоидные плоскости.

Для полирующего травления полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ наиболее стабильные результаты даёт бром–метаноловый травитель с содержанием от 5 до 20 об. % брома в метиловом спирте. В данном травителе бром является интенсивным окислителем, образующим с элементом A^{III} спирторастворимые бромиды, а с элементом B^{V} – газообразные соединения типа бромидов, гидробромидов или бромоксидов с участием метанола. Бром–метаноловый травитель позволяет получать полированные поверхности как на атомных плоскостях A^{III} , так и на плоскостях B^{V} .

Аналогами бром–метанолового травителя является хлор–метаноловый (травление осуществляется за счёт постепенного растворения газообразного хлора при его пропускании через объём метанола с полупроводниковой пластиной), а также бром–этаноловый ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{Br}_2 = 3:1$), дающий особенно хорошие результаты при полировке GaP.

Для полупроводниковых нитридов в качестве полирующего травителя при обработке слоёв GaN, AlN, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ хорошие результаты даёт применение горячих травящих растворов $\text{H}_3\text{PO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$.

Остальные из известных травителей для полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ являются селективными. К ним относятся системы: HCl

– $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}$, $\text{HF} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$, $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6 - \text{KOH} - \text{H}_2\text{O}$ и др.

Полупроводниковые материалы соединений $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ травят в травителях примерно тех же составов, что и соединения $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Однако связи в соединениях $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ имеют в большей степени ионный характер, поэтому достичь эффекта полировки практически не удаётся. Кроме того, для травления соединений $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ широко используют хромовые смеси $\text{CrO}_3 - \text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ и смеси на основе перекиси водорода.

Большие трудности возникают при необходимости травления кристаллов карбида кремния SiC в связи с его высокой химической стойкостью. В растворах минеральных кислот травления SiC не наблюдается даже при высоких температурах. Поэтому все разработанные для данного материала травители применяют в виде расплавов, нагретых до температуры $800 - 1000$ °С. Наиболее распространённые из них: KOH (NaOH) при температуре 900 °С, бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ в интервале температур $800 - 1000$ °С, Na_2O_2 в диапазоне $350 - 900$ °С и др. При травлении SiC в расплаве KOH и KNO_3 (4:1) при температуре $600 - 750$ °С условно можно считать, что нитрат калия выполняет роль окислителя, а гидроксид калия – комплексообразователя, переводящего кремний и углерод соединения в легкорастворимые силикаты и карбонаты. Важным условием является соотношение объёмов расплава полупроводникового соединения, объём расплава по крайней мере, в 10 раз должен быть больше объёма подвергающихся травлению кристаллов. После травления кристаллы извлекаются из тигля и промываются для удаления остывшего расплава де-ионизованной водой.

3.5. Особенности жидкостного травления функциональных слоёв

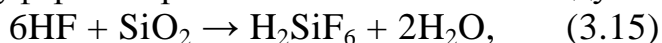
Операции химического травления можно разделить на 2 группы: химическое травление через маску (трафаретное травление) и травление по всей поверхности (открытое травление). Трафаретное травление используют для прорисовки диффузионных масок в слое SiO_2 , удаления материала через окна в диэлектрике при формировании металлических контактов, формирования изолирующих или проводящих областей, удаления вспомогательных технологических слоёв. При выборе травителя необходимо учитывать клин травления, неравномерность края травления, скорость и технологичность процесса. Очевидно, что факторы, влияющие на качество локального травления, можно также перенести на процессы полного травления.

В качестве материалов, наиболее часто подвергаемых травлению «мокрыми» процессами, выступают различные функциональные слои ИМС из диоксида кремния, алюминия и его сплавов, а также вспомогательные технологические слои из нитрида кремния и резиста.

Слои диоксида кремния, полученные термическим окислением кремния либо химическим осаждением из газовой фазы выполняют функции электрических изоляторов в структуре функциональных слоёв ИМС, барьеров для диффузии и ионной имплантации, подзатворного диэлектрика

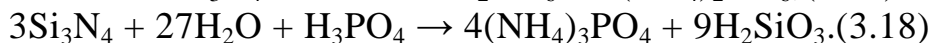
МОП – транзисторов, защитно – пассивирующих покрытий. Для химического травления слоев SiO_2 используют, как правило, травители на основе плавиковой кислоты. Однако в технологии ИМС водные растворы HF используются, как правило, только для процессов открытого травления SiO_2 : полное или частичное стравливание слоя SiO_2 , удаление с поверхности кремния тонкого естественного слоя оксидов кремния непосредственно перед нанесением слоев металлизации (так называемое освежение контактов). Это обусловлено интенсивным газовыделением SiF_4 , приводящим к отслаиванию маски фоторезиста и искажению геометрии функциональных слоев ИМС.

Для локального травления функциональных слоев ИМС через фоторезистивную маску используют так называемые буферные травители, получаемые добавлением в растворы HF фторида аммония NH_4F . Травление слоев SiO_2 в буферном травителе описывается следующими реакциями:

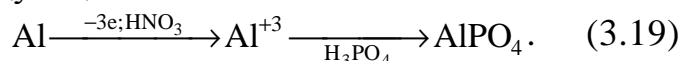


Добавление NH_4F к HF приводит к увеличению скорости травления благодаря образованию бифторид ионов HF_2^- , обладающих более высокой реакционной способностью по сравнению с HF .

Слои нитрида кремния, сформированные химическим осаждением из газовой фазы, в технологии ИМС используют в качестве защитной маски при локальном окислении, межслойного диэлектрика при формировании конденсаторов и защитно – пассивирующего покрытия ИМС. Химическое травление применяют для полного удаления слоев Si_3N_4 после процессов локального окисления. С данной целью используют плавиковую и ортофосфорную кислоты либо их смеси. Химические реакции при удалении нитрида кремния данными травителями описываются следующими уравнениями:



Тонкие пленки алюминия и его сплавов (Al-Si , Al-Si-Cu , Al-Si-Cu-Ti) широко применяются в качестве материалов для слоев, выполняющих функции невыпрямляющих контактов к областям кремния n и p типа, токопроводящих соединений элементов ИМС, а также монтажных площадок. Жидкостное химическое травление алюминиевых слоев осуществляют, как правило, в травителе, состоящем из концентрированной азотной и ортофосфорной кислот, ледяной уксусной кислоты и воды. Процесс травления состоит из двух стадий – формирования Al^{3+} и образования AlPO_4 согласно следующей схеме:



Вода в ортофосфорной кислоте препятствует растворению Al_2O_3 и способствует растворению AlPO_4 . Скорость процесса ограничена скоростью растворения Al_2O_3 в H_3PO_4 . В качестве конечных продуктов реакции выделяется газ, состоящий из смеси H_2 , NO и NO_2 . Пузырьки выделяющегося газа, адсорбированные на поверхности металлической пленки, способны замедлить травление – под ними образуются островки неотравленного металла, которые могут замыкать соседние токопроводящие дорожки. Для

решения данной проблемы могут использоваться такие приемы как: прерывание травления, ультразвуковое перемешивание, добавление ПАВ, вакуумирование кюветы травления.

Удаление, или снятие резиста является завершающей стадией литографического процесса. Жидкофазное удаление резиста может осуществляться составами на основе органических растворителей, а также средствами на основе водных растворов, включающих как кислотные, так и щелочные составы. Выбор метода снятия резиста и параметров процесса определяется исходя из следующих факторов:

1) чувствительности поверхности нижележащего слоя к воздействию растворителя (окисление, коррозия, загрязнение ионами, полное растворение);

2) стоимости удаления;

3) типа резиста;

4) предшествующей последовательности операций формирования слоя резиста, включая характеристики нижележащего слоя, параметры термообработки после экспонирования, задубливания, травления, ионной имплантации.

Для большинства применений в технологии ИМС используются позитивные фоторезисты, представляющие собой полимерную пленку светочувствительного материала. На стадиях формирования активной структуры ИМС в фотолитографическом процессе участвуют химически неактивные слои: монокристаллический кремний, диоксид кремния, нитрид кремния, поликристаллический кремний. Поэтому для снятия фоторезиста в данном случае используют кислотные составы. Кислотные составы для удаления фоторезиста, содержащие сильные кислоты и сильные окислители, преобразуют полимерную пленку фоторезиста в эмульгированную или растворимую форму. Наиболее широкое распространение для снятия фоторезиста получила смесь серной кислоты и перекиси водорода (10:1), травитель КАРО. Механизм удаления фоторезиста в смеси КАРО аналогичен механизму удаления органических загрязнений, описанному в разделе 2.4.

На заключительных стадиях изготовления ИМС (формирование металлических слоев, вскрытие контактных окон в межслойном диэлектрике и пассивирующем покрытии) использование для снятия фоторезиста в кислотных составах неприемлемо. Это обусловило использование органических растворителей для снятия фоторезиста на данных этапах. Как правило, в данных случаях используют процесс снятия фоторезиста в растворе диметилформамида при температуре 130–150 °С.

Следует отметить, что использование органических растворителей для снятия фоторезиста включает в себе ряд недостатков: высокая стоимость растворителей, необходимость сбора и обезвреживания отходов, высокая взрыво- и пожароопасность, токсичность.

К недостаткам жидкостного химического травления относятся:

- капиллярные процессы в тонких щелях и проколах;
- проблемы адгезии фоторезистивных масок и их стойкости к травителям;
- ускоренный характер травления по границам зерен;

– необходимость применения различных травителей для травления многослойных и многоуровневых структур;

– трудность контроля в процессе травления и др.

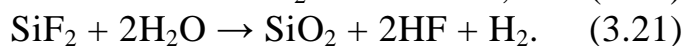
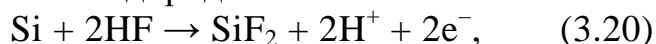
Поэтому наиболее перспективными для травления функциональных слоёв ИМС являются ионные, ионно–плазменные и плазмохимические методы.

3.6. Электрохимическая обработка поверхности

Наряду с химической в технологии полупроводников используют также электрохимическую обработку поверхности. Электрохимическое травление осуществляется при воздействии реагентов и электрического тока согласно следующей методике. Образец, подвергаемый травлению, является анодом. Катод, как правило, выполняется из малоактивного элемента – платины, никеля и др. В качестве электролита используются водные или неводные растворы, содержащие окислители, комплексообразователи и другие добавки. Данный метод травления основан на закономерностях анодного растворения полупроводников.

Механизм анодного растворения был рассмотрен в разделе 3.3. Наличие внешнего источника тока упрощает управление процессом травления без существенного изменения его механизма. Реакция анодного растворения протекает с участием дырок и электронов. Дырки, необходимые для перевода в раствор атомов полупроводника, возникают в основном за счёт генерации на поверхности. Диффузия дырок из объёма в данном случае играет менее существенную роль. Поскольку кинетика анодного растворения определяется поверхностной концентрацией дырок, то любые внешние воздействия, способствующие увеличению их поверхностной концентрации (нагрев, освещение, инжекция дырок через *p–n*–переход), ускоряют процесс анодного растворения.

Для электрохимического травления кремния используют электролиты на основе систем $KF - KCl$, $KF - HCl$, $KF - HNO_3$, $HF - H_2O$. При малых плотностях анодного тока ($20 - 50 \text{ mA/cm}^2$) растворение кремния сопровождается образованием толстой аморфной плёнки фтористых соединений двухвалентного кремния. В состав этой плёнки входит фтористо–кремниевый комплекс SiF_2 , который медленно растворяется в воде с выделением водорода:



При увеличенной плотности анодного тока ($50 - 70 \text{ mA/cm}^2$) процесс анодного окисления ускоряется, а ток, протекающий через электролит, уменьшается. Ускорение процесса окисления лимитируется недостатком ионов фтора, которые диффундируют из объёма электролита. Это, в свою очередь, затрудняет образование плёнки фтористых соединений, и начинается новый электролитический процесс анодного растворения кремния в четырёхвалентной форме. Продуктом реакции в данном процессе является фтористоводородная кислота.

При ещё больших плотностях тока (80 – 150 мА/см²) происходит образование пассивирующей плёнки SiO₂, т.е. начинается процесс анодного окисления, а процесс анодного растворения прекращается.

При обработке полупроводников с широкой запрещенной зоной (GaAs, GaP, SiC и др.) заметные скорости растворения удаётся получить только для соединений *p*-типа. На границе материала *n*-типа с электролитом высота потенциального барьера столь высока, что ток через границу практически не протекает и растворения полупроводника не наблюдается.

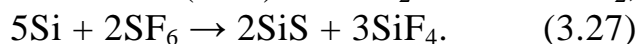
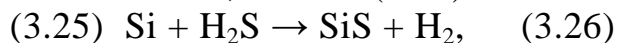
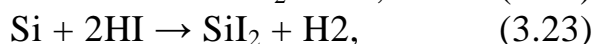
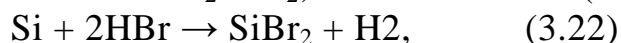
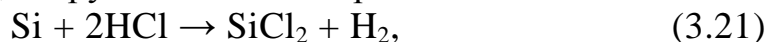
Процесс электрохимического травления характеризуется следующими преимуществами:

- отсутствие завалов по краям пластины;
- высокая плоскопараллельность пластин;
- высокий класс чистоты обработки поверхности.

3.7. Парогазовое травление

Парогазовое травление представляет собой высокотемпературный процесс поверхностной обработки полупроводниковых подложек в среде газового реагента. При этом поверхностные загрязнения, а также часть атомов полупроводника переводятся в легколетучие соединения, уносимые потоком газа носителя. Парогазовое травление обеспечивает максимально достижимую чистоту поверхности полупроводника, а также легко совмещается с такими базовыми процессами как эпитаксия и окисление, поскольку может проводиться в одном реакторе без извлечения подложек в едином технологическом цикле.

Парогазовое травление проводят, как правило, после механической полировки, химического травления и других видов теххимической обработки непосредственно перед проведением процессов эпитаксиального наращивания, окисления и диффузии в кварцевых реакторах в потоке парогазовой или газовой смеси при температурах от 900 до 1250 °С. В качестве реагентов обычно используют галогены F₂, Cl₂, Br₂, галогеноводороды HF, HCl, HBr, HI, сероводород, гексафторид серы, пары воды, и другие активные среды:



Технологические условия проведения процессов парогазового травления для некоторых газовых смесей представлены в табл. 3.1.

Скорость парогазового травления, как правило, слабо зависит от температуры, а химические реакции идут с диффузионным контролем.

Таблица 3.1. Парогазовое травление кремниевых подложек в различных газовых средах

№ п/п	Парогазовая смесь	Концентрация реагента, %	Температура процесса, °С	Скорость травления, мкм/с
1	HCl + H ₂	0,85	1200	0,005
2	H ₂ O + H ₂	0,1	1270	0,001
3	Cl + H ₂	0,2	1000	0,012
4	H ₂ S + H ₂	0,5	1200	0,02
5	SF ₆ + H ₂	0,2	1050	0,003

В промышленной технологии наиболее широкое распространение получило полирующее травление кремния в безводном хлористом водороде с использованием газовой смеси HCl – H₂.

Парогазовое травление арсенида галлия обычно осуществляют в смеси HCl – H₂ или H₂O – H₂ при температуре порядка 750 °С. Продуктами травления в HCl являются GaCl и AsCl₃, при обработке в парах воды – Ga₂O и As₂O₃, которые обладают высокой летучестью.

К недостатку метода парогазового травления относится необходимость проведения процесса при высоких температурах. При этом в результате термической диффузии атомов из газовой среды в объём подложки может происходить ее загрязнение побочными примесями. Кроме того, при травлении полупроводниковых соединений возможна тепловая генерация точечных дефектов – вакансий, особенно в подрешётке легколетучего компонента.

Глава 4. ИОННО–ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

4.1. Классификация процессов ионно–плазменного травления.

Первые применения плазменных методов в технологии кремниевых ИМС относятся к концу 60–х годов, когда начались исследования возможности применения различных видов кислородной плазмы для снятия фоторезиста. В то же время проводились работы по использованию плазмы для травления кремния. Плазменное травление называется также «сухим» травлением. Получение элементов с субмикронными размерами требует селективного удаления отдельных участков будущей микросхемы с помощью процесса травления. Широко используемое жидкостное химическое травление обладает высокой селективностью и скоростью, однако наличие подтравливания не позволяет получить требуемое разрешение. Для технологических процессов изготовления СБИС наиболее перспективными являются методы сухого травления, которые подразделяются на ионное травление (ИТ), ионно–химическое травление (ИХТ) и плазмохимическое травление (ПХТ). На рис. 4.1 приведены процессы ионно–плазменного травления.



Рис. 4.1. Классификация процессов ионно–плазменного травления

При ионном травлении для удаления материала используется кинетическая энергия ионов инертных газов, т.е. имеет место физическое разбиение процесса ионного травления на ионно–плазменное травление, при котором образцы помещаются на отрицательный электрод разрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами, вытягиваемыми из плазмы, и ионно–лучевое травление, в котором образцы являются мишенью, бомбардируемой ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника (АИИ).

При ионно–химическом травлении используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химических реакций с атомами или молекулами материала.

При плазмохимическом травлении для удаления материала используется энергия химических реакций между ионами и радикалами активного газа и атомами (или молекулами) обрабатываемого вещества с образованием летучих стабильных соединений. В зависимости от среды, в которую помещаются образцы, плазмохимическое травление (ПХТ) подразделяется на:

- плазменное травление: образцы помещаются в плазму химически активных газов;
- радикальное травление: образцы помещаются в вакуумную камеру, отделенную от химически активной плазмы перфорированными металлическими экранами, или электрическими или магнитными полями, а травление осуществляется химически активными частицами (свободными атомами и радикалами), поступавшими из плазмы.

Наибольший интерес представляет плазмохимическое травление, т.к. оно обладает селективностью, равномерностью, и скоростью, сравнимыми с жидкостным химическим травлением, но оно не требует очистки поверхностей после обработки, позволяет одновременно травить подложки и удалять фоторезистивные маски, а также может использоваться для любых материалов. Для удаления материала используется энергия химических реакций между ионами и радикалами активного газа и атомами (или молекулами) обрабатываемого вещества с образованием летучих соединений.

Системы ионно–плазменного травления по способу возбуждения и поддержания плазмы подразделяются на системы с самостоятельными разрядами ВЧ и СВЧ тока и системы с искусственным поддержанием разряда с помощью термоэлектронной эмиссии, ВЧ, СВЧ электромагнитных полей.

Ионно–плазменные системы травления можно разделить по числу электродов на двухэлектродные (диодные), трех–электродные (триодные), а

также безэлектродные, в которых генерация плазмы осуществляется электромагнитными полями ВЧ и СВЧ.

Системы с автономными ионными источниками могут быть как с фокусировкой так и без фокусировки ионного пучка, как с компенсацией так и без компенсации объемного заряда ионного пучка.

Контроль скорости удаления материала определяется как правило толщиной пленки непосредственно в процессе ионно–плазменного травления (ИПТ). Контроль необходим так, как этот процесс обладает низкой селективностью и не прекращается на границе раздела между пленкой подвергнутого травлению материала и пленкой подслоя (или подложки). Если процесс ионно-плазменного травления своевременно не остановить, то происходит удаление материала подслоя или подложки, приводящее к ухудшению электрофизических характеристик и браку обрабатываемых микроструктур.

В таблице 4.1. приведены основные характеристики процессов ионно-плазменного травления.

	ИТ	ИХТ	ПХТ
Скорость процесса	низкая	средняя	высокая
Равномерность процесса	низкая	средняя	высокая
Селективность	низкая	средняя	высокая
Анизотропность	высокая	средняя	низкая

Таблица 4.1. Сравнительные характеристики методов ионно–плазменного травления

4.2. Механизмы процесса ионно–плазменного травления.

Ионно–плазменное травление основывается на использовании образующихся в процессе разряда высокоэнергетических (≥ 500 эВ) ионов инертного газа, например Ar^+ . Как правило, глубокое анизотропное травление осуществляют реактивным ионным травлением (РИТ), использующим плазму, полученную разрядом в молекулярных газах. Особенности метода РИТ являются:

1. Асимметричные электроды (отношение площади катода к площади заземленной поверхности намного меньше единицы), что обеспечивает постоянное отрицательное напряжение смещения (обычно 250 – 500 В), примерно равное половине амплитудного значения ВЧ – напряжения;

2. Размещение подложек на запитываемом электроде (катоде);

3. Относительно низкие рабочие давления (0,133 – 13,3 Па).

Каждая из перечисленных особенностей метода обуславливает высокую энергию ионов, бомбардирующих поверхность подложки в процессе

травления. Ионная бомбардировка в процессах РИТ вызывает следующие физические и химические эффекты:

- передачу энергии в подложку;
- разрыв связей кремния с образованием Si (возникновение на подложке активных центров);
- ионизацию кремния с образованием Si^+ ;
- десорбцию продуктов реакции SiF_x ;
- диссоциацию молекул и активацию нейтральных частиц травителя – F, XeF_2 .

В состав оборудования для ионно–плазменного травления материалов входят следующие основные функциональные системы:

- система травления, служащая для проведения обработки пластин и состоящая из рабочей камеры и расположенных внутри нее или присоединенных к ней снаружи электродов, экранов, подложкодержателей и автономных источников стимулирующих воздействий и химически активных частиц (ХАЧ). При использовании в процессе травления ХАЧ рабочая камера обычно называется реактором;

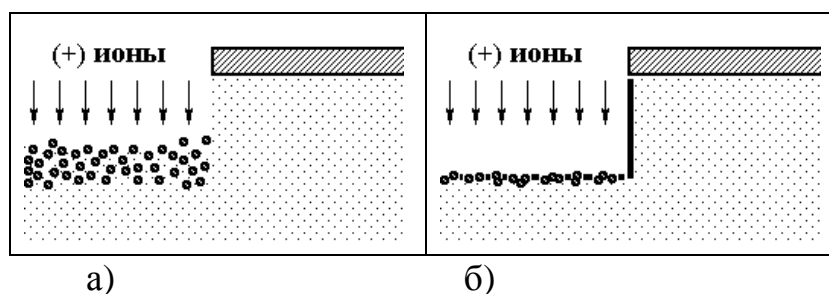


Рис. 4.2. Анизотропия травления, обусловленная:

а – повреждением поверхности, б – наличием поверхностного ингибитора

- газовая система, служащая для подачи требуемого потока газа (пара) или газовой смеси в рабочую камеру и в автономные источники стимулирующих воздействий и ХАЧ и состоящая из нескольких каналов, в состав которых входят фильтры, трубы, испарители, вентили, клапаны, измерители и регуляторы расхода газа, коллекторы и стабилизаторы давления;

- вакуумная система, служащая для обеспечения требуемого давления остаточных и рабочих газов в технологической и шлюзовой камерах, автономных источниках стимулирующих воздействий и ХАЧ и состоящая из вакуумных насосов, трубопроводов, клапанов, измерителей и регуляторов давлений и скоростей откачки, азотной ловушки, системы ее регенерации, фильтров или станций для очистки насосного масла, скрубберов или нейтрализаторов выхлопных газов;

- система возбуждения и поддержания плазмы разряда в рабочей камере, а также других стимулирующих воздействий в автономных источниках, состоящая из генераторов и источников электрических и магнитных полей, кабелей или волноводов, измерителей и регуляторов подводимой мощности, согласующих устройств;

– система загрузки–выгрузки пластин, транспортирования и позиционирования их внутри установки, состоящая из передающей и приемной кассет, устройств загрузки и перемещения пластин, шлюзовой камеры, подложкодержателей и прижимных устройств, датчиков положения пластин на различных позициях;

– система термостатирования испарителей, участков газовых каналов, электродов, подложкодержателей и стенок камер, служащая для измерения и регулирования их температуры и состоящая из термостатов, труб, хладо– и теплоагентов, устройств их перекачки, подачи и распределения, измерителей и регуляторов температуры;

– система контроля момента окончания процесса травления функционального слоя (времени травления), состоящая из индикаторов на основе эмиссионно–спектрального, лазерного интерферометрического или масс–спектрометрического методов, оптических и электронных устройств, а также специализированных микропроцессоров для обработки полученных сигналов по соответствующему алгоритму;

– система управления, служащая для управления перечисленными выше системами контроля режимов их работы и исправности входящих в них устройств и состоящая из управляющей ЭВМ с программным обеспечением с клавиатурой ввода команд и дисплея.

К конструкционным характеристикам оборудования относятся: форма, материалы, размеры и взаимное расположение функциональных узлов и систем в составе установки, а также отдельных элементов в составе этих узлов и систем. На рис. 4.3 представлена схема установки для реактивного ионного травления.

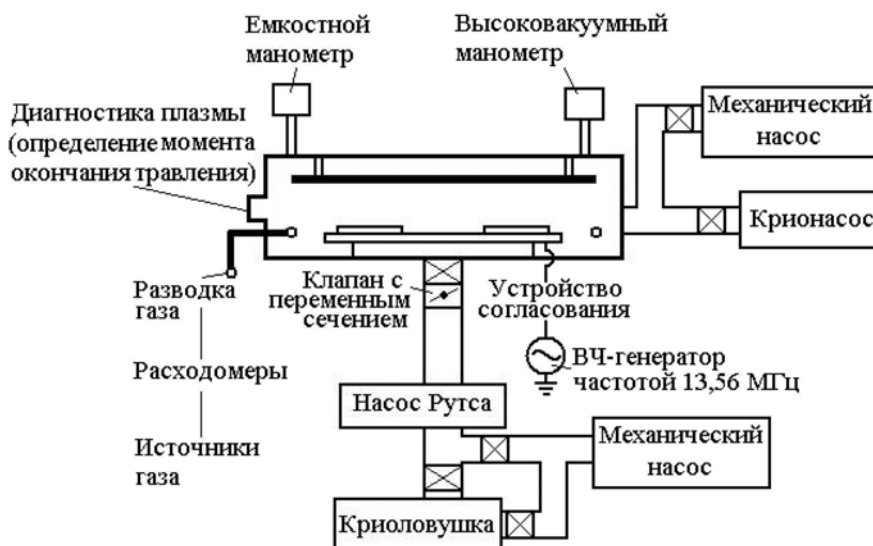


Рис. 4.3. Схема установки для реактивного ионного травления

4.3. Методы плазменного травления

Для плазменного травления кремния, его соединений и некоторых металлов применяют молекулярные газы, содержащие один или более

галогенов в своем составе. Выбор таких газов объясняется тем, что образуемые ими в плазме элементы реагируют с материалами, подвергаемыми травлению, образуя летучие соединения при температурах, достаточно низких, чтобы обеспечить качественный перенос рисунка.

В таблице 4.2 в качестве примера приведены технологические режимы плазмохимического травления (ПХТ) слоев SiO₂ селективные по отношению к монокристаллическому кремнию в ВЧ планарном реакторе с поштучной обработкой пластин.

Таблица 4.2. Технологические режимы ПХТ слоев SiO₂

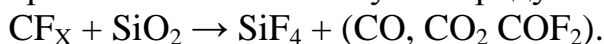
Наименование технологического параметра	Значения параметров на различных стадиях процесса		
	Стабилизация расхода газов	Травление	Охлаждение и продувка реактора
Давление, Па	90	90	90
Мощность, Вт	–	590	–
Расход He, см ³ /мин.	30	30	30
Расход O ₂ , см ³ /мин.	8	8	–
Расход C ₃ F ₈ , см ³ /мин.	90	90	–
Расход CHF ₃ , см ³ /мин.	30	30	–
Время стадии, с.	15	30 – 110*	10

* – время травления устанавливается по результатам контрольного процесса

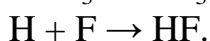
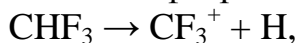
Основным плазмообразующим газом является C₃F₈, который диссоциирует, образуя химически активные радикалов CF_x, а также атомарный фтор:



Радикалы CF_x (главным образом CF₃⁺) взаимодействуют с диоксидом кремния с образованием таких летучих продуктов, как SiF₄, CO, CO₂ COF₂:



Добавка в газовую смесь кислорода способствует лучшему удалению из зоны травления нелетучих углеродсодержащих соединений за счет образования таких газов, как COF₂, CO и CO₂. Добавка CHF₃ при диссоциации образует радикалы CF₃⁺, а также атомарный водород, связывающий атомы фтора:



Поскольку фтор вступает в реакцию с чистым кремнием быстрее, чем радикалы CF₃⁺, то при добавлении в газовую смесь CHF₃ происходит увеличение скорости травления SiO₂ за счет увеличения концентрации радикалов CF₃⁺ и уменьшение скорости травления чистого кремния за счет уменьшения концентрации атомов фтора. Это позволяет обеспечить селективность травления SiO₂ по отношению к Si на уровне 10:1. Добавка в газовую смесь гелия позволяет эффективно охлаждать стенки реактора и пластину во время, и после травления, что необходимо для сохранения геометрии фоторезистивной маски.

В табл. 4.3 приведены технологические режимы ПХТ в ВЧ планарном реакторе с поштучной обработкой пластин слоями Si_3N_4 толщиной 0,1 мкм, полученными химическим осаждением из газовой фазы.

Таблица 4.3. Технологические режимы ПХТ слоев Si_3N_4

Наименование технологического параметра	Значения параметров на различных стадиях процесса		
	Стабилизация расхода газов	Травление	Охлаждение и продувка реактора
Давление, Па	40	40	40
Мощность, Вт	–	150	–
Расход He, см ³ /мин.	100	100	100
Расход SF_6 , см ³ /мин.	150	150	–
Время стадии, с.	15	50	9

В данном примере травление слоев осуществляется атомами фтора, которые освобождаются в плазме гексафторида серы. Поскольку атомы фтора быстрее вступают в реакцию с нитридом кремния, чем с SiO_2 , то данный процесс характеризуется селективностью травления Si_3N_4 по отношению к SiO_2 . Добавка гелия выполняет функцию хладагента. В табл. 4.4. приведен пример ПХТ в ВЧ планарном реакторе алюминиевой пленки толщиной 1,0 мкм.

Непосредственно травление алюминия осуществляется в плазмообразующей смеси $\text{BCl}_3 + \text{Cl}_2$ согласно следующей схеме:

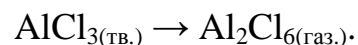
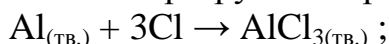
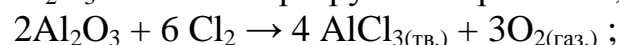


Таблица 4.4. Технологические режимы ПХТ алюминиевых пленок

Наименование технологического параметра	Значения параметров на различных стадиях процесса			
	Стабилизация расхода газов	1–я стадия травления	2–я стадия травления	Охлаждение и продувка реактора
Давление, Па	30	30	30	30
Мощность, Вт	–	250	210	–
Расход He, см ³ /мин.	50	50	50	50
Расход Cl_2 , см ³ /мин.	25	25	25	–
Расход SiCl_4 , см ³ /мин.	25	25	25	–
Расход BCl_3 , см ³ /мин.	40	40	40	–
Время стадии, с.	20	60	120	20

Таким образом, чистый хлор обеспечивает удаление оксида алюминия, который всегда содержится на поверхности пленки алюминия, а также по границам кристаллических зерен. Для улучшения эффективности удаления Al_2O_3 с поверхности пленки процесс травления проводится в две стадии. Различие между стадиями заключается в том, что первые 60 секунд процесса происходят при более высокой мощности. Это обуславливает увеличение ионной составляющей плазмы и дополнительное травление поверхности пленки физическим распылением, характеризующимся малой селективностью травления Al по отношению к Al_2O_3 . Добавка в газовую смесь тетрахлорсилана производится для исключения бокового подтравливания под маску фоторезиста. После разложения в плазме $SiCl_4$ образуются атомы хлора, участвующие в реакции травления Al, а освобожденный кремний осаждается на боковых стенках и дне канавки травления. Осажденный кремний удаляется со дна канавки бомбардировкой положительными ионами, в то время как на боковых стенках этого не происходит из-за малого угла их падения. Таким образом, кремний, осажденный на боковых стенках, блокирует реакцию с алюминием, поскольку не образует в плазме летучих соединений с хлором.

Основным газом для «сухого» удаления резиста в плазме является кислород. При микроволновом возбуждении кислорода образуются различные нейтральные и заряженные частицы: O^3 , O^+ , O^{2+} , O^- , O^{2-} , атомарный кислород и синглетный кислород. Физическая химия процесса сравнима с химией горения, реакция кислорода с поверхностью резиста можно разделить на пять стадий:

- 1) перенос реагента (атомарного кислорода) к поверхности резиста;
- 2) адсорбция реагента;
- 3) реакция на поверхности резиста (окисление);
- 4) десорбция продуктов (CO_2 , CO, H_2O и радикалы);
- 5) перенос продуктов от поверхности резиста в газовую фазу.

Для стабилизации кислородной плазмы в нее обычно добавляют инертный газ. Типовые режимы плазмохимического удаления фоторезиста следующие: давление – 70 Па, мощность возбуждающего генератора – 150 Вт, расход кислорода – $375 \text{ см}^3/\text{мин}$, азота – $125 \text{ см}^3/\text{мин}$.

К недостаткам «сухих» методов удаления материалов функциональных слоев ИС относят:

- 1) осаждение полимеров на поверхности подложек;
- 2) радиационные повреждения, приводящие к образованию дефектов кристаллической структуры и изменению параметров ИС;
- 3) загрязнение поверхности подложек примесями, содержащимися в конструктивных элементах реактора и полимерах, осажденных на его внутренних поверхностях.

4.4. Факторы, определяющие технологические параметры процесса плазменного травления

Плазмохимическое травление обусловлено протеканием реакций газификации между частицами травителя и подложкой. При этом плазма

является инструментом травления. Известно, что плазмохимическое травление кремния осуществляют во фторсодержащей плазме, поскольку атомы фтора само-произвольно реагируют с кремнием как *n*-, так и *p*- типа проводимости, а также с SiO₂ и Si₃N₄, образуя летучие вещества. В качестве источников фтора могут служить молекулы: F₂, CF₄, C₂F₆, C₃F₈, SF₆, SiF₄, NF₃, ClF₃, которые при диссоциации в плазме могут образовывать атомарный фтор а также различные фторсодержащие радикалы. В результате химических реакций с кремнием образуются летучие продукты такие, как SiF₂ и SiF₄. Схема процесса травления кремния атомами фтора представлена на рис. 4.3. В результате протекания реакции происходит разрыв связей и образуется SiF_{2(g)} или возникает связанный кремниевый – фтористый радикал, который после присоединения к нему фтора освобождается в виде газообразного SiF₄.

Однако чисто плазмохимическое травление при отсутствии каких-либо кристаллографических эффектов является изотропным вследствие закругления профиля стенок структуры, радиус которого примерно равен глубине травления. Для получения анизотропии процесса травление стимулируют бомбардировкой положительными ионами. Известны два механизма стимуляции анизотропного травления ионной бомбардировкой.

1. Ионы, бомбардирующие кремний, создают радиационные нарушения в кристаллической решетке, простирающиеся в глубину на несколько монослоев от поверхности. Радиационные повреждения катализируют процесс хемосорбции травителя. Кроме того, химическая реакция с нарушенной областью кристалла протекает с повышенной скоростью, причем глубина и количество радиационных нарушений зависят от энергии ионов (рис. 4.4, а).

2. Определенные газы (например, CHF₃, CClF₃) или смеси газов (CF₄-H₂) распадаются в плазме, образуя элементы с ненасыщенными связями и радикалы, способные к полимеризации. Эти элементы, взаимодействуя с поверхностью, формируют адсорбированный слой, а в некоторых случаях – сплошную пленку. Адсорбированный слой замедляет травление, адсорбируя элементы травителя (рекомбинационный механизм) либо препятствуя доступу частиц травителя к подложке. Ионная бомбардировка поверхности удаляет покрытие из ингибиторов, что вызывает анизотропию травления (рис. 4.4, б).

Следует отметить, что указанные механизмы травления не являются независимыми. Например, процесс химического распыления равнозначен сочетанию распыления с разрывом связи между атомами (образованию радиационных нарушений) и удалению с поверхности ингибитора (слоя из продуктов взаимодействия).

Требования к точности переноса рисунков удовлетворяются при использовании методов сухого травления в газовом разряде при низком давлении (в плазме), обеспечивающих высокую анизотропность травления.

Для глубокого анизотропного травления используют так называемый БОШ-процесс. Процесс представляет собой чередование двух стадий:

- 1) изотропного плазмо-химического травления;
- 2) осаждения полимера.

К достоинствам этого процесса можно отнести высокую скорость травления (до 20 мкм/мин); возможность управления степенью анизотропности; высокую воспроизводимость процесса.

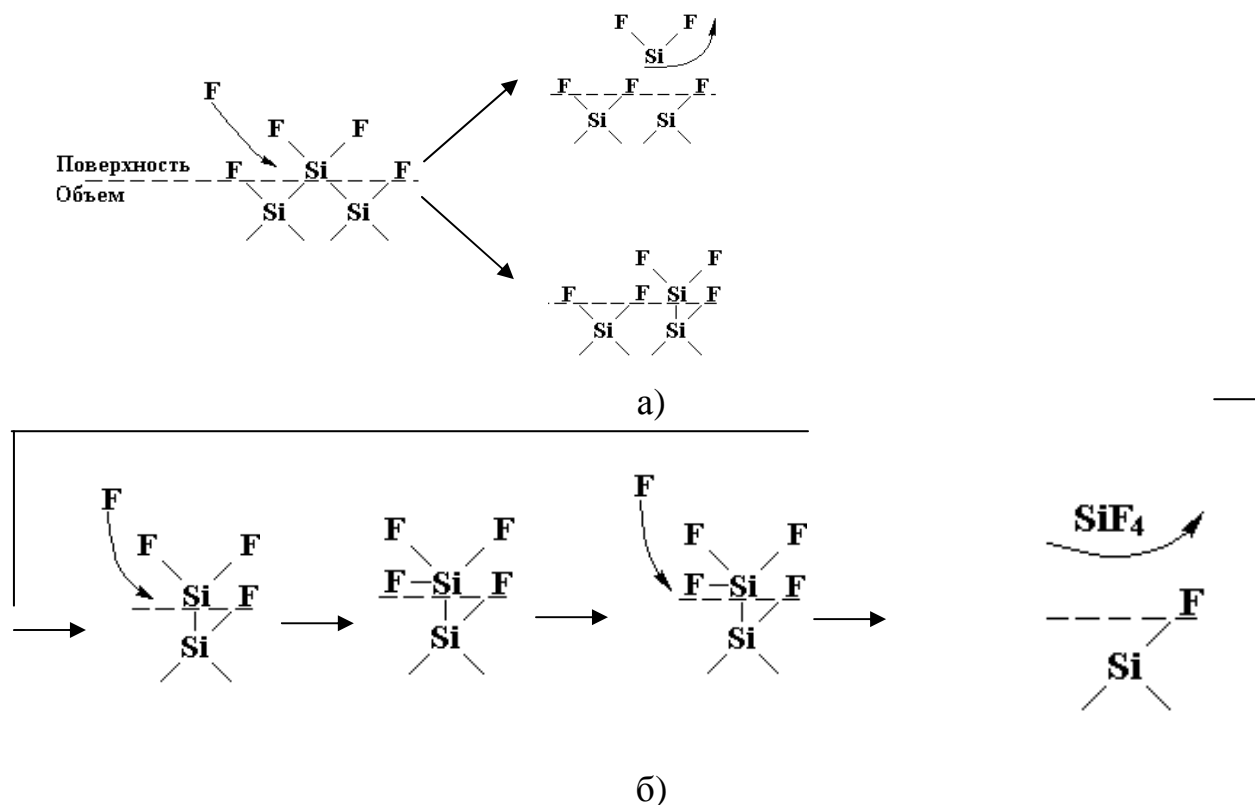


Рис. 4.4. Схема процесса травления кремния атомами фтора

Скорость, селективность и анизотропия травления определяются различными параметрами, включая состав и давление рабочего газа, температуру подложки, частоту и плотность мощности приложенного электрического поля. Эти параметры необходимо строго контролировать для качественного воспроизводства процессов травления.

Улучшение селективности и контроля профиля травления становится особенно важным по мере дальнейшего уменьшения размеров элементов ИМС.

Глава 5. ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

5.1. Эпитаксиальные процессы

Термином «эпитаксия» обозначают процесс кристаллографически ориентированного наращивания монокристаллического слоя на монокристаллической подложке, при котором новая фаза закономерно продолжает кристаллическую решётку подложки. Процесс происходит от двух греческих слов: эпи – «на» и таксис – «располагать в порядке».

По природе взаимодействий «подложка – растущая кристаллическая фаза» эпитаксиальные процессы можно разделить на следующие типы:

- автоэпитаксия;

- гетероэпитаксия;
- хемоэпитаксия;

Автоэпитаксия (гомозэпитаксия) – процесс ориентированного наращивания кристаллического вещества, одинакового по структуре и не отличающегося химически (или отличающегося незначительно) от вещества подложки. Отличие может заключаться в типе примесей и различном уровне легирования подложки и наращиваемого слоя.

Гетероэпитаксия – процесс ориентированного наращивания вещества, отличающегося по химическому составу от вещества подложки. Этот процесс происходит с образованием переходного слоя, протяженность которого может быть значительной. Путём образования гетероэпитаксиальных слоев в полупроводниках возможно формирование гетеропереходов, способных выполнять многочисленные функции как в дискретных приборах, так и в ИМС.

Хемоэпитаксия – процесс ориентированного наращивания, в результате которого образование новой кристаллической фазы – хемоэпитаксиального слоя – происходит за счет химического взаимодействия (например, реактивной диффузии) вещества подложки с веществом, используемым в качестве элемента реактивной диффузии. Полученный слой по химическому составу отличается как от подложки, так и от исходной фазы, но закономерно продолжает кристаллическую структуру подложки. Как правило, толщина хемоэпитаксиального слоя невелика. При образовании таких слоев может быть сформирован гетеропереход или невыпрямляющий контакт.

Реотаксия [от греч. реос – «скользить»] – ориентированное наращивание кристаллического слоя в условиях, близких к равновесным, на подложке как механическом носителе. Подложка может быть стеклообразной, аморфной или иметь структуру, отличную от структуры формирующейся кристаллической фазы. Упорядочение формирующегося слоя происходит за счет высокой подвижности исходных структурных образований кластеров, попадающих на подложку из внешней среды.

По химическому состоянию вещества в период переноса от внешнего источника к подложке (фактически по химическому составу исходной фазы) эпитаксиальные процессы подразделяют на:

- прямые;
- не прямые.

В прямых процессах вещество переносится к подложке без промежуточных реакций. То есть, химический состав вещества источника, его состав в процессе переноса и состав эпитаксиального слоя одинаковы. Примерами таких процессов могут служить: вакуумное испарение, сублимация, молекулярная эпитаксия.

В не прямых процессах при переносе вещества от источника к подложке происходят химические превращения: пиролиз, восстановление, окисление, диспропорционирование, различные стадии химического синтеза и др. Таким образом, состав промежуточной фазы отличается и от состава источника, и от состава растущего эпитаксиального слоя. Такие процессы наиболее распространены.

По агрегатному состоянию исходной фазы все эпитаксиальные процессы делятся на четыре типа:

- эпитаксия из газовой фазы;
- эпитаксия в жидкой фазе;
- эпитаксия в системе пар – жидкость – кристалл;
- эпитаксия при твердофазном взаимодействии.

Газофазная (парофазная) эпитаксия. В прямых процессах данного типа осаждаемое вещество в исходной среде находится в виде атомного или молекулярного пара (молекулярных пучков) в вакууме или инертной атмосфере. В непрямых процессах осаждаемое вещество или его компоненты содержатся в исходной среде в виде пара (или газообразных) химических соединений или их смесей с газовыми химически активными реагентами и газами – носителями.

Эпитаксия в жидкой фазе. В данном случае осаждаемое вещество находится в виде раствора (раствора – расплава). Перенос вещества к подложке осуществляется при распаде пересыщенного раствора диффузионным путем, иногда при участии конвективного обмена в жидкой фазе.

Эпитаксия в системе пар – жидкость – кристалл. В данном случае рост эпитаксиального слоя происходит путём переноса осаждаемого вещества из газовой фазы через тонкую пленку промежуточной стабильной или метастабильной жидкой фазы.

Эпитаксия при твердофазном взаимодействии. Данный метод представляет собой перекристаллизацию вещества в поверхностном слое твердой фазы или его синтез в поверхностном слое с последующей перекристаллизацией. Частным случаем эпитаксии в твердой фазе является перекристаллизация стеклообразной фазы на поверхности монокристалла за счет фазового перехода 2 рода. Для синтеза тонких слоев химических соединений вблизи поверхности твердого тела иногда используют метод ионной имплантации одного из компонентов соединения с последующей рекристаллизацией в процессе эпитаксиального отжига.

5.2. Кинетика и механизмы процессов эпитаксии

Наиболее распространённым процессом является эпитаксия в газовой фазе, при которой газ-носитель, содержащий компоненты эпитаксиального слоя в виде газообразных соединений взаимодействует с подложкой. Процесс эпитаксии в данном случае включает в себя следующие этапы (рис. 5.1):

Доставку: объёмная транспортировка реагентов к поверхности подложки; диффузия газообразных реагентов к поверхности подложки; адсорбция реагентов на поверхности подложки.

Поверхностные реакции: поверхностные реакции (либо реакции, протекающие в объёме газа над поверхностью); поверхностная диффузия; встраивание диффундирующих элементов в кристаллическую решётку;

Удаление продуктов реакции: десорбция продуктов реакции; диффузия газообразных продуктов реакции в направлении от поверхности; объёмную транспортировку продуктов реакции от зоны взаимодействия.

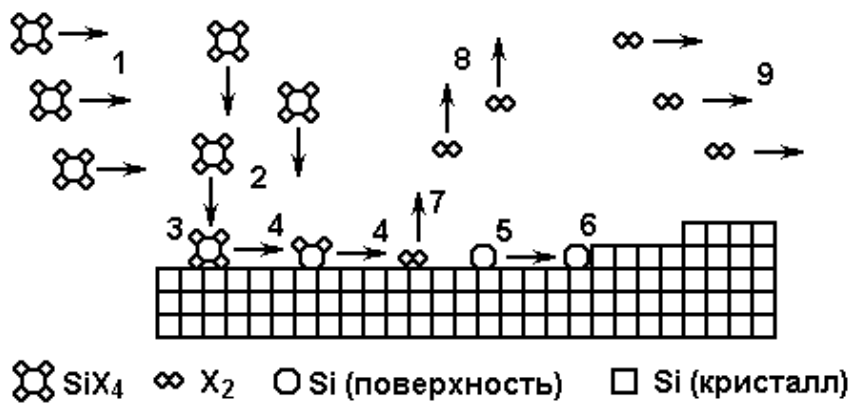


Рис. 5.1. Схема реакций, иллюстрирующих этапы процесса эпитаксиального роста: 1 – объёмная транспортировка реагентов к зоне реакции; 2 – диффузия реагентов к поверхности подложки; 3 – адсорбция реагентов на поверхности подложки; 4 – реакции на поверхности подложки; 5 – поверхностная диффузия; 6 – встраивание диффундирующих элементов в кристаллическую решётку; 7 – десорбция продуктов реакции; 8 – диффузия продуктов реакции в направлении от поверхности; 9 – объёмная транспортировка продуктов от зоны взаимодействия

Необходимым условием для роста на поверхности подложки новой фазы является пресыщение реагирующей фазы осаждаемым компонентом. На начальной стадии роста эпитаксиального слоя на поверхности подложки формируется система зародышей. Активными центрами образования зародышей являются вакансии, инородные адсорбированные атомы, дислокации, моноатомные ступени. С наибольшей вероятностью устойчивые конфигурации атомов осаждаемого вещества формируются у изломов ступеней (рис. 5.2). Далее атомы, молекулы или кластеры реагирующей фазы, осаждаясь на поверхность подложки, мигрируют по ней, закрепляются у зародышей, увеличивают их размер и образуют островковую структуру. Затем островки сливаются в сплошной слой, который растёт даже при незначительном пресыщении реагирующей фазы.

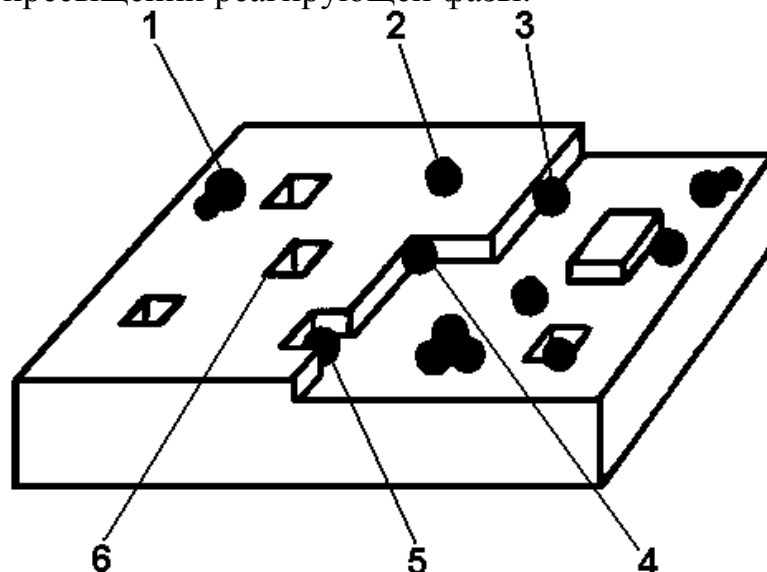


Рис. 5.2. Центры образования зародышей на поверхности подложки: 1 – адсорбированные атомы двухатомного соединения; 2 – адсорбированный атом на поверхности; 3,4,5 - адсорбированные атомы на элементах ступеней; 6 – дефект поверхности

Скорость эпитаксиального роста лимитируется скоростью самой медленной стадии. Если скорость роста ограничивается процессами массопереноса диффузии реагентов к подложке, то эпитаксия происходит с диффузионным контролем. Если же скорость роста ограничивается кинетикой поверхностных процессов (адсорбции, поверхностных реакций, десорбции), то эпитаксиальный рост будет проходить с кинетическим контролем. Лимитирующая стадия будет полностью определяться режимами технологического процесса, поэтому существует вероятность, что процесс будет протекать в переходной области как с диффузионным, так и с кинетическим контролем. Детальное описание процесса эпитаксиального роста включает рассмотрение термодинамики, кинетики химических реакций и механизма течения газового потока в реакторе.

При подаче в реактор потока парогазовой смеси над подложкодержателем и стенками на входе в реактор образуется пограничный слой, толщина которого увеличивается по мере продвижения вдоль реактора (рис. 5.3).

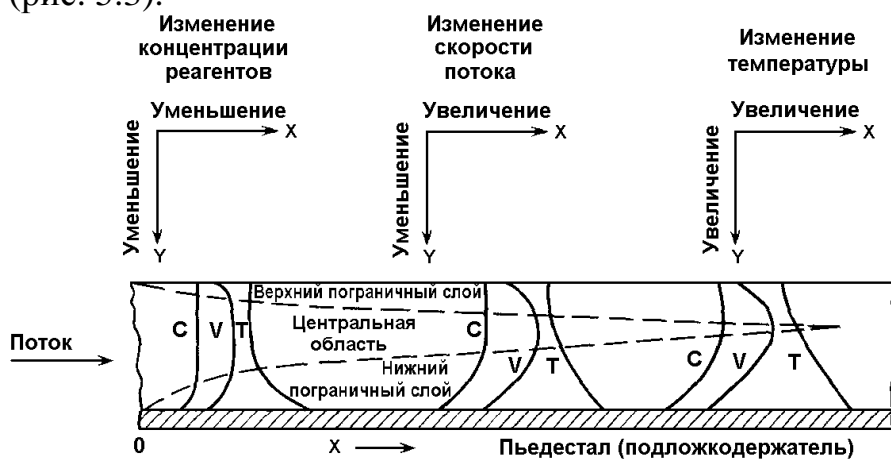


Рис. 5.3. Образование пограничного слоя в эпитаксиальном реакторе: C – распределение концентрации; V – распределение скорости потока; T – распределение температуры

Через пограничный слой исходные реагенты переносятся из газового потока к поверхности подложек, а продукты реакции диффундируют в направлении от поверхности и удаляются основным потоком газа. Таким образом, потоки реагентов, направленные к поверхности подложки и от нее, являются сложной функцией нескольких переменных: температуры, давления в системе, концентрации реагентов, и толщины пограничного слоя.

Совершенство структуры эпитаксиального слоя, а также морфология его поверхности зависят от типа лимитирующей стадии. Наиболее совершенные эпитаксиальные слои с гладкой однородной поверхностью получают в процессах с диффузионным контролем. Слои, полученные в таком процессе,

характеризуются сильно развитой поверхностью и, зачастую, мозаичной структурой.

5.3. Автоэпитаксия кремния

Автоэпитаксиальные слои кремния нашли широкое применение в различных изделиях интегральной электроники, включая интегральные микросхемы и различные дискретные полупроводниковые приборы. Структуры данного типа формируют, как правило, осаждением кремния из газовой фазы в реакторе, изготовленном из стеклообразного кварца на расположенном внутри его пьедестале (подложкодержателе) (рис. 5.4).

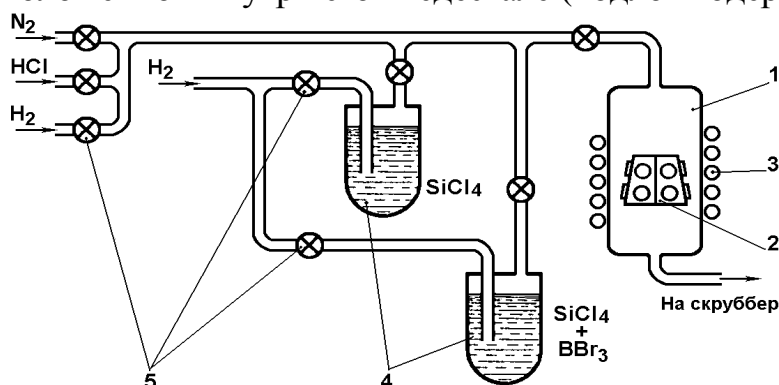
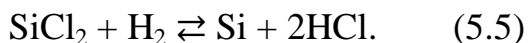
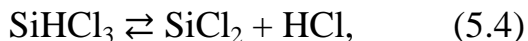
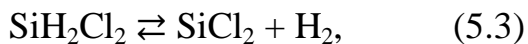


Рис. 5.4. Схема установки автоэпитаксиального наращивания кремния осаждением их газовой фазы: 1 – реактор; 2 – пьедестал; 3 – ВЧ – индуктор; 4 – питатели для жидких реагентов; 5 – запорные вентили

Для автоэпитаксиального наращивания кремния могут использоваться четыре кремнийсодержащих компонента: тетрахлорид кремния (SiCl_4), трихлорсилан (SiHCl_3), дихлорсилан (SiH_2Cl_2) и силан (SiH_4). Наиболее широкое применение в производстве получил процесс автоэпитаксиального выращивания кремния восстановлением водородом тетрахлорида кремния (хлоридный процесс). Основные реакции, протекающие в реакторе при реализации хлоридного процесса, описываются следующими уравнениями:



Все указанные реакции являются обратимыми, поэтому скорость роста сильно зависит от температуры (рис. 5.5). При высоких и низких температурах скорость роста становится отрицательной, т.е. наблюдается процесс газового травления.

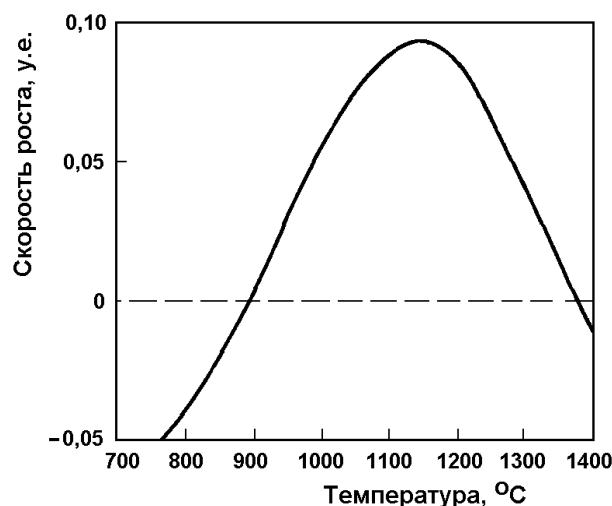


Рис. 5.5. Зависимость скорости автоэпитаксиального роста кремния от температуры при осаждении из газовой фазы

Зависимость скорости роста от температуры для различных кремнийсодержащих соединений представлена на рис. 5.6. В области А процесс характеризуется кинетическим контролем. Область В характеризует ситуацию, когда осаждение происходит под диффузионным контролем. В данном режиме скорость роста линейно зависит от парциального давления кремнийсодержащего соединения в газе-носителе, а незначительное увеличение скорости роста с температурой обусловлено увеличением коэффициентов диффузии реагентов в газовой фазе

Для легирования эпитаксиальных плёнок кремния в газовую смесь намеренно вводят соединения легирующих элементов. При жидкостном легировании в качестве таких соединений выступают галогениды легирующих элементов (PCl_3 , BBr_3 , AsCl_3), добавление которых в парогазовую смесь осуществляют непосредственным смешиванием SiCl_4 с жидкими источниками галогенидов примесей (см. 5.4). Другим способом легирования эпитаксиальных плёнок является газовое легирование, при котором в газовую смесь вводят гидриды легирующих элементов, такие как арсин (AsH_3), фосфин (PH_3) и диборан (B_2H_6). Данные гидриды относительно устойчивы в среде водорода и могут хорошо храниться и дозироваться в виде разбавленных водородом газов. При легировании во время роста осаждаемой эпитаксиальной плёнки на поверхности кремния происходят следующие процессы:

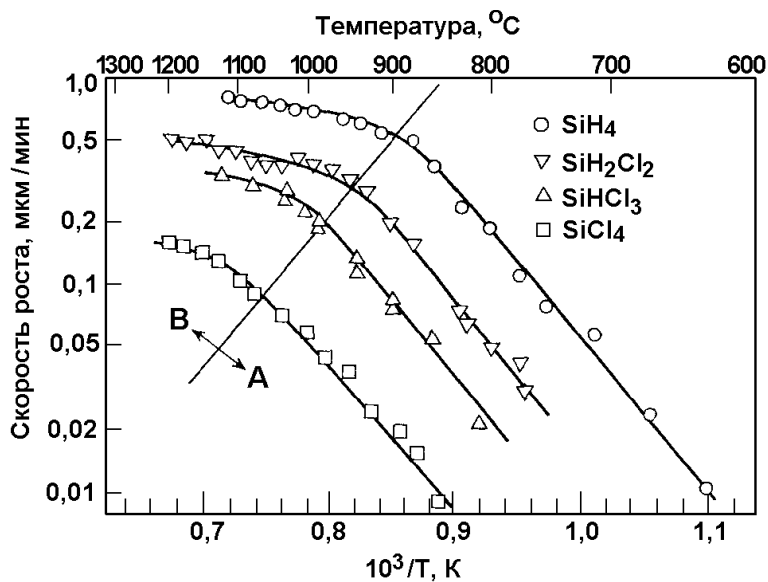


Рис. 5.6. Зависимость скорости роста от температуры для различных кремний содержащих соединений

- адсорбция молекул гидрида примесного элемента на поверхности;
- диссоциация молекул гидрида;
- встраивание атомов примесных элементов в эпитаксиальный слой.

Уровень легирования эпитаксиальной плёнки определяется:

- концентрацией легирующего элемента в газовой смеси;
- скоростью роста эпитаксиальной плёнки;
- температурой процесса эпитаксии.

Типовая зависимость концентрации примеси в эпитаксиальном слое от концентрации легирующего элемента представлена на рис. 5.7.

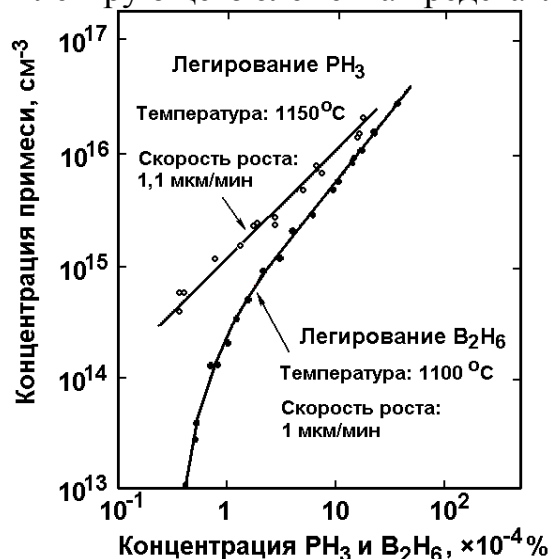


Рис. 5.7. Зависимость концентрации бора и фосфора в эпитаксиальном слое от концентрации диборана (B_2H_6) и фосфина (PH_3) в газовой смеси соответственно

Как видно из рис. 5.7, при умеренном уровне легирования концентрация примеси в эпитаксиальном слое имеет линейную зависимость от концентрации лигатуры. В тоже время в области малых концентраций примеси может наблюдаться нелинейная зависимость, обусловленная частичной компенсацией

легирующей примеси фоновой примесью n -типа, всегда присутствующей в хлорсилановых источниках кремния. Кроме того, в сильнолегированных эпитаксиальных слоях ($> 10^{19} \text{ см}^{-3}$) концентрация примеси также нелинейно зависит от концентрации лигатуры в газовой фазе. Это обусловлено отклонением от режима разбавленного раствора, а также другими эффектами, такими как кластеризация и преципитация легирующей примеси.

Зависимость концентрации примеси в эпитаксиальном слое от скорости его роста представлена на рис. 5.8. Как видно из рис. 5.8, при высоких скоростях роста концентрация примеси линейно убывает с увеличением скорости роста. При низких скоростях роста между твёрдой и газообразной фазами устанавливается равновесие, недостижимое при высоких скоростях роста.



Рис. 5.8. Влияние скорости роста на концентрацию легирующей примеси (As) в эпитаксиальном слое

Зависимость уровня легирования эпитаксиального слоя от температуры представлена на рис. 5.9. Уровень легирования примесью p -типа проводимости возрастает с увеличением температуры, в то время как уровень легирования примесью n -типа проводимости снижается.

Кроме намеренно вводимой примеси в эпитаксиальный слой входят также неконтролируемые примеси из подложки. Данный эффект называют автолегированием. Механизмы автолегирования представлены на рис. 5.10. Примеси могут внедряться в растущий слой как за счёт твердотельной диффузии из объёма исходной подложки, так и за счёт испарения и переноса через газовую фазу с поверхности исходной подложки, других подложек, подложкодержателя и других элементов реакционной камеры.

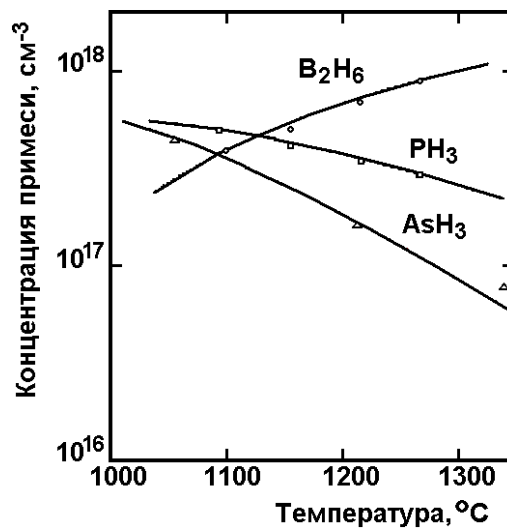


Рис. 5.9. Зависимость уровня легирования эпитаксиального слоя от температуры процесса

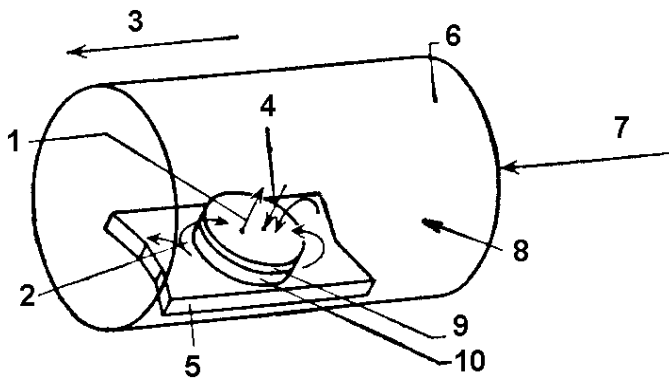


Рис. 5.10. Схематическое изображение вероятных источников примесей при эпитаксиальном росте: 1 – диффузия примесей из подложки; 2 – десорбция примеси с обратной и боковой поверхностей подложки; 3 – направление основного газового потока; 4 – адсорбция примеси на поверхности подложки; 5 – подложкодержатель; 6 – реактор; 7 – специально вводимая легирующая примесь; 8 – примеси, десорбирующиеся с других подложек и других элементов реакционной камеры; 9 – эпитаксиальный слой; 10 – подложка

Автолегирование проявляется в виде увеличения ширины переходной области между эпитаксиальным слоем и подложкой (рис. 5.11). Форма кривой распределения примеси в области А обусловлена вкладом твердотельной диффузии из объёма подложки (рис. 5.11). Профиль легирования в области В в основном определяется переносом примеси через газовую фазу. Первоначально количество испаряемой из подложки примеси превышает количество вводимой в реактор примеси, что приводит к образованию так называемого хвоста автолегирования. Со временем доля автолегирования уменьшается, и профиль распределения примеси становится плоским (рис. 5.11). Размер хвоста автолегирования зависит от вида легирующей примеси и таких параметров технологического процесса как температура и скорость

роста. Автолегирование ограничивает минимальную толщину эпитаксиальных слоёв, которая может быть получена управляемым легированием.

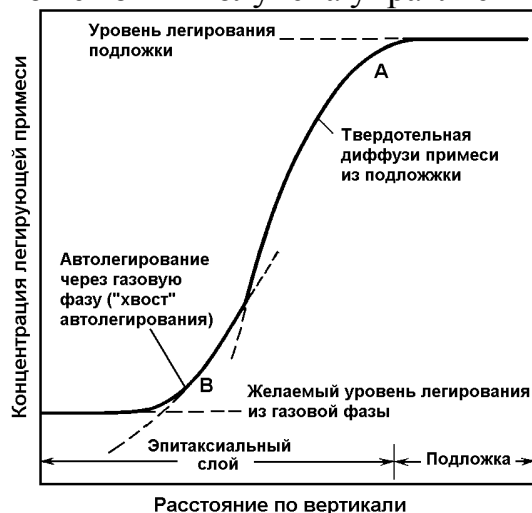


Рис. 5.11. Обобщённый профиль легирования эпитаксиального слоя

Типовой цикл осаждения эпитаксиального слоя представлен на рис. 5.12. После загрузки пластин на подложкодержатель производят продувку реактора азотом для удаления воздуха. Затем пластины нагревают в атмосфере водорода. Перед осаждением проводят отжиг в водороде при температуре 1150 – 1200 °С, а также травление в парах HCl. Далее проводят осаждение эпитаксиального слоя при той же температуре или на 50 – 100 °С ниже. После осаждения эпитаксиального слоя проводят продувку реактора водородом и охлаждение, затем продувку азотом и выгрузку пластин.

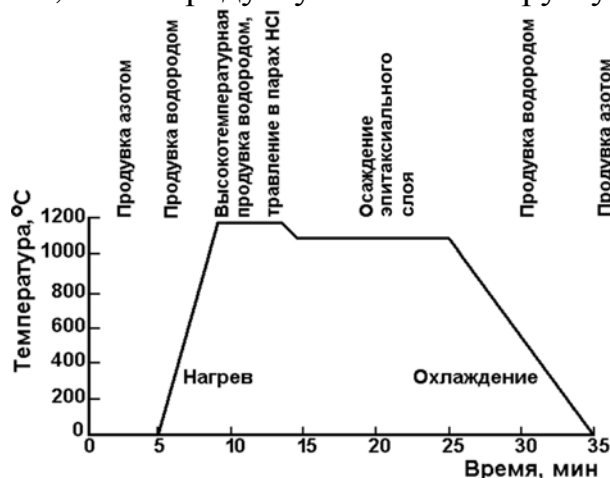


Рис. 5.12. Типовой цикл эпитаксиального осаждения

5.4. Гетероэпитаксия кремния

Гетероэпитаксиальные слои (ГС) кремния нашли применение в структурах кремний на сапфире (КНС), а также в многослойных структурах Si–Ge (т.н. искусственных подложках), применяемых в микро–, опто– и наноэлектронике.

Существует несколько моделей, объясняющих характер сопряжений смежных атомных плоскостей двух веществ. Если параметры решёток различаются несущественно, то говорят о псевдоморфизме – результате приспособления межатомных расстояний наращиваемого ГС к межатомным

расстояниям подложки (рис. 5.13, а). Кроме того, может наблюдаться скачкообразное изменение параметра решётки на границе раздела и появление дислокаций, понижающих возникающие механические напряжения (рис. 5.13, б).

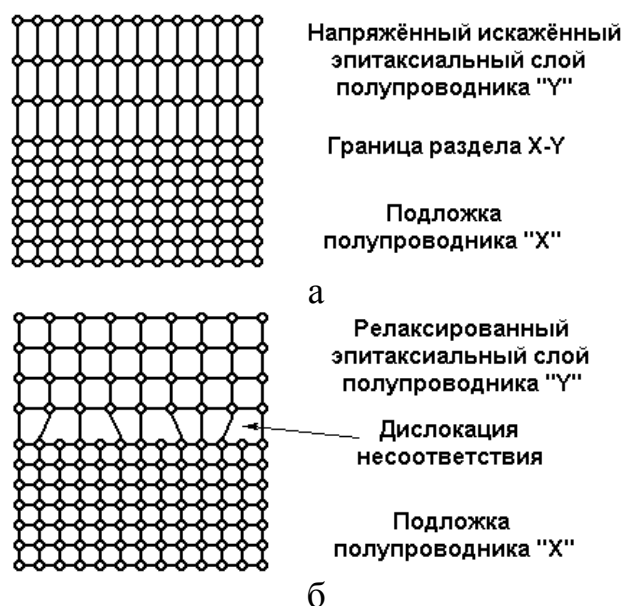
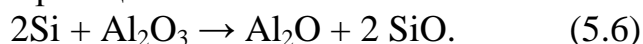


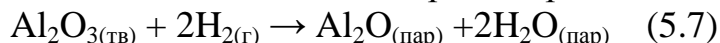
Рис. 5.13. Гетероэпитаксиальные слои с несогласованными решётками: а) псевдоморфный ГС; б) релаксированный ГС

С практической точки зрения важно получать как релаксированные ГС, характеризующиеся высоким структурным совершенством, так и напряжённые псевдоморфные с модифицированной зонной структурой полупроводника, обладающие рядом полезных электрических и оптических свойств.

Гетероэпитаксию кремния на сапфире осуществляют, в основном, силановым методом, поскольку при высоких температурах химические агенты хлоридной системы взаимодействуют с сапфиром. Кроме того, при высоких температурах происходит автолегирование ГС алюминием и кислородом путём их диффузии из подложки через границу раздела, а также через газовую фазу в результате реакции:



Качество ГС кремния на сапфире во многом определяются качеством подложки. После тщательной механической полировки с целью удаления нарушенного слоя (8 – 10 мкм) сапфировые подложки отжигают в вакууме при температуре 1500 – 1600 °С или подвергают травлению в водороде:



В начале эпитаксиального роста кремния на сапфире кремний замещает алюминий в структуре сапфира и образует связь с кислородом. Так формируется первый слой, на который осуществляется дальнейшее наращивание кремния. Ориентация ГС зависит от ориентации подложки и определяется соотношениями, приведенными в табл. 5.1

Таблица 5.1 – Эпитаксиальные соотношения в гетероэпитаксиальных слоях кремния на сапфире

Ориентация плоскостей		Ориентация направлений	
Si	α -Al ₂ O ₃	Si	α -Al ₂ O ₃
(111)	(0001)	[110]	[1120]
(100)	(0112)	[100]	[0111]
(110)	(0120)	[110]	[2201]

5.5. Эпитаксия полупроводниковых соединений A³B⁵ и твёрдых растворов на их основе

Соединения A³B⁵ используют для производства светодиодов, цифровых индикаторов, электролюминесцентных панелей, приборов СВЧ – диапазона, туннельных диодов и диодов Ганна, различных фотоприёмников, твердотельных лазеров. Наиболее перспективные материалы на основе твёрдых растворов A³B⁵ представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Основные материалы для светоизлучающих структур

Цвет излучения	Материал	Технология формирования		Внешний квантовый выход, %
		n – слой	p – слой	
ИК	GaAs	ГФЭ (ЖФЭ)	ГФЭ (ЖФЭ)	4,0
Красный	GaP:(Zn ÷ O)	ЖФЭ	ЖФЭ	1,5
	GaAs _{0,6} P _{0,4}	ГФЭ	Диффузия	0,5
	Ga _{0,7} Al _{0,3} As	ЖФЭ	ЖФЭ	1,3
Оранжевый	Ga _{0,35} As _{0,65} P:N	ГФЭ	Диффузия	0,5
	Ga _{0,7} In _{0,3} P	ГФЭ	Диффузия	0,1
Жёлтый	GaAs _{0,15} P _{0,85} :N	ГФЭ	ЖФЭ	1,3
	GaN:Zn	ГФЭ	–	4,0
	GaP:N ⁺	ГФЭ	Диффузия	0,1
Зелёный	GaP:N	ЖФЭ	ЖФЭ	0,7
	GaN:Zn	ГФЭ	–	3,5
Синий	GaN:Zn	ГФЭ	–	1,5
Фиолетовый	GaN:Mg	ГФЭ	–	0,8

Как видно из табл. 5.2, светоизлучающие структуры на основе соединений типа A³B⁵ и твёрдых растворов на их основе формируют эпитаксией из газовой или жидкой фазы, а также комбинацией эпитаксии и диффузии. Для данных целей также нашёл применение метод молекулярно–лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Эпитаксию из газовой фазы GaAs и твердых растворов на его основе проводят в различных системах реагентов:

- хлоридного типа,
 - хлоридно – гидридного типа,
 - с использованием галлийорганических соединений.
- К преимуществам метода газофазной эпитаксии относятся:
- простота используемого оборудования,
 - возможность управления процессом роста путём изменения скорости потока и концентрации транспортного газа,
 - возможность легирования слоёв различными примесями,
 - возможность получения многослойных структур в непрерывном процессе,
 - сочетание процессов травления подложки и эпитаксии в одном реакторе и в одной системе реагентов.

На рис. 5.14 представлена схема установки эпитаксии GaAs в системе реагентов Ga – AsCl₃ – H₂. Реактор имеет три зоны нагрева. На его вход поступает смесь пара AsCl₃ с водородом, и в зоне I протекает реакция:



В зоне II HCl из зоны I взаимодействует с расплавом галлия:



В зоне III идет реакция синтеза GaAs и рост эпитаксиального слоя:

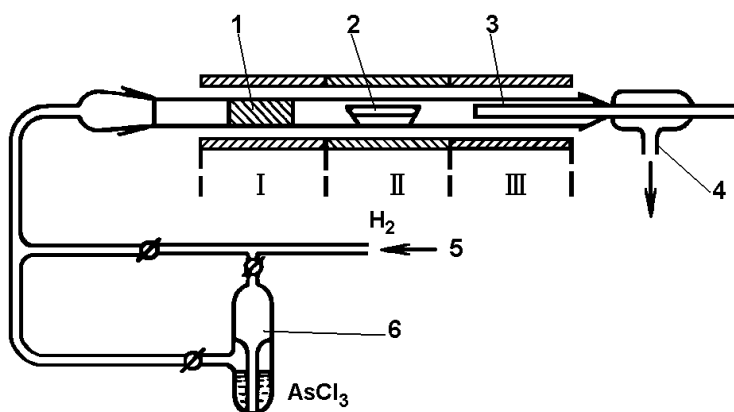
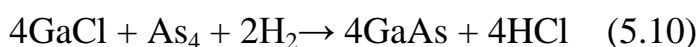
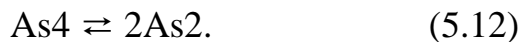


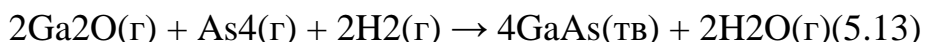
Рис.5.14. Схема установки для нанесения слоёв GaAs в системе Ga–AsCl₃–H₂: 1 – зона мышьяка 425 °С (I); 2 – зона галлия 800 °С (II); 3 – зона подложки 750 – 900 °С (III); 4 – выход продуктов реакции; 5 – вход водорода; 6 – барботер с AsCl₃

Изменение отношения давления пара AsCl₃ и GaCl на входе в зону осаждения эпитаксиального слоя дает возможность осуществлять как режим травления подложки, так и режим эпитаксии с различной скоростью роста.

Для синтеза эпитаксиальных слоёв GaAs используют и другие системы реагентов: GaCl–AsCl₃–H₂, GaCl₃–As–H₂, GaAs–HCl–H₂, GaAs–I₂–H₂, GaAs–H₂O–H₂. Кинетика реакций во многом сходна с системой Ga–AsCl₃–H₂ за исключением последней. В системе GaAs–H₂O–H₂ в зоне источника при температуре 1000 – 1100 °C идёт процесс окисления арсенида галлия:



В зоне осаждения при температуре на 50° ниже температуры источника идет осаждение арсенида галлия с высвобождением воды:



Для осаждения слоёв GaAs также может быть использована хлоридно – гидридная система реагентов GaAs–HCl–AsH₃–H₂. К преимуществам гидридных систем можно отнести:

- возможность получения гидридов практически всех элементов, используемых в полупроводниковой технологии,
- возможность более глубокой очистки гидридов по сравнению с галогенидами,
- более высокое содержание основного элемента в гидриде по сравнению с другими соединениями данного элемента,
- пассивность гидридов к конструкционным материалам, применяемым в оборудовании, в том числе и к металлам.

Ограничением в применении гидридов является их способность к самовозгоранию, взрыву, высокая токсичность. Поэтому их используют в виде сильно разбавленных смесей (концентрация от 1 до 5 %) с водородом или аргоном.

Для осаждения GaAs и твёрдых растворов типа A^{III}B^V могут использоваться органические соединения галлия, используемые в качестве источника металла в сочетании с гидридами металлоидов. Преимуществом таких систем является возможность получения металла в газообразном агрегатном состоянии, что позволяет добиться высокой однородности газовой смеси, улучшить качество формируемых слоёв и упростить устройство оборудования.

Схема установки для эпитаксии из галлийорганических соединений представлена на рис. 5.15. В качестве источника галлия используют алкилогаллоиды, например триметилгаллий (CH₃)₃Ga, триэтилгаллий (C₂H₅)₃Ga или диэтилхлорид галлия (C₂H₅)ClGa, а в качестве источника мышьяка – арсин, разлагающийся в зоне осаждения с образованием пара As₄.

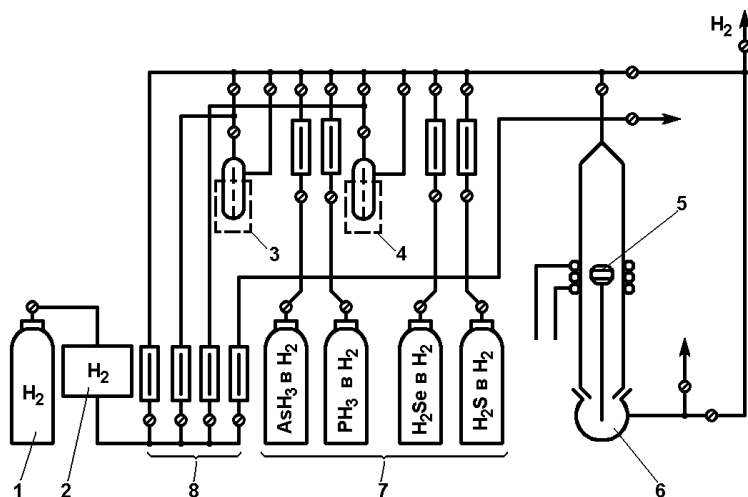
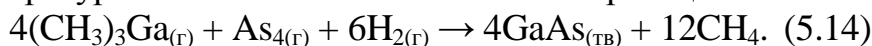


Рис. 5.15. Схема установки эпитаксии арсенида галлия с использованием галлийорганических соединений: 1 – баллон с газом–носителем; 2 – блок очистки газа, 3 – барботёр с галлий–органическим соединением; 4 – источник легирующего цинка (диэтилцинк); 5 – подложка; 6 – кварцевый реактор; 7 – баллоны с гидридами; 8 – ротаметры

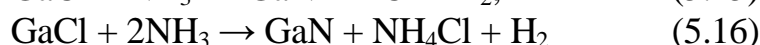
Осаждение арсенида галлия в системе $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}-\text{AsH}_3-\text{H}_2$ проводят при температуре $450 - 700\text{ }^\circ\text{C}$ в соответствии с реакцией:



Данный тип оборудования кроме синтеза GaAs может также использоваться для получения соединений типа GaP и GaN, а также твёрдых растворов типа $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$, $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$, а также других возможных комбинаций, технологически осуществимых при осаждении из газовой фазы

В качестве акцепторной лигатуры для соединений типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ используют диэтилцинк $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Zn}$, являющийся источником цинка, донорной – соответствующие гидриды H_2S и H_2Se , являющиеся соответственно источниками серы и селена. Для изоэлектронного легирования азотом (например, для смещения спектральной характеристики излучателей на базе $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ в коротковолновую область) в газовую смесь добавляют аммиак NH_3 .

Для осаждения эпитаксиальных слоёв GaN используют систему реагентов Ga–HCl– NH_3 –Ar(He). При температуре $800 - 850\text{ }^\circ\text{C}$ происходит хлорирование галлия в соответствии с реакцией (5.9). Затем субхлорид галлия GaCl переносится потоком инертного газа в зону осаждения эпитаксиального слоя, где при температуре $1000 - 1050\text{ }^\circ\text{C}$ происходит реакция с аммиаком, подаваемым непосредственно к подложке по независимому каналу:



Твёрдые растворы типа $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ получают в системе реагентов Ga–Al–HCl– NH_3 –Ar при температуре $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Управление составом твёрдого раствора осуществляют изменением площади взаимодействия HCl и расплава галлия и алюминия в ячеистых кассетах.

Для осаждения эпитаксиальных слоёв нитрида галлия и его твёрдых растворов можно использовать и металлоорганические соединения. Однако по структурным характеристикам и уровню неконтролируемых примесей такие слои уступают слоям, получаемым в хлоридно – гидридном процессе.

В ряде случаев для осаждения слоёв полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ наиболее эффективным является метод жидкофазной эпитаксии. Жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) – это ориентированная кристаллизация монокристаллического слоя полупроводникового материала в расплавленных металлах. Метод ЖФЭ характеризуется следующими преимуществами:

- отсутствует необходимость использования стехиометрических расплавов;
- рост фазы может происходить при любой комбинации температур и составов вблизи линии ликвидуса;
- возможность точного управления размерами слоя;
- низкая дефектность слоёв,
- простота утилизации отходов.

Процесс осаждения эпитаксиальных слоёв из жидкой фазы осуществляется в следующей последовательности:

1) приготовление шихты из веществ наращиваемого слоя и металла–растворителя (в качестве металла–растворителя для соединений галлия выбирают галлий);

2) плавление шихты до образования однородного состава, при этом одновременно производится очистка подложки от плёнки оксидов восстановлением в потоке водорода;

3) нанесение раствора–расплава на поверхность подложки и выдержка при максимальной температуре (около 1050°C), при этом происходит частичное растворение поверхности подложки и удаление примесей с ее поверхности;

4) медленное охлаждение расплава ($1 - 10 \text{ К/мин.}$). При этом раствор из насыщенного переходит в перенасыщенное состояние, и излишки полупроводника кристаллизуются на поверхности пластины, легирование эпитаксиального слоя может осуществляться как из газовой фазы, так и путём включения соответствующих добавок в состав шихты;

5) после достижения требуемой толщины эпитаксиального слоя раствор–расплав удаляют с поверхности подложки и охлаждают подложку.

Толщина эпитаксиального слоя определяется начальной температурой эпитаксии, интервалом и скоростью охлаждения, а также соотношением объёма раствора–расплава и площади поверхности подложки, находящейся в контакте с расплавом.

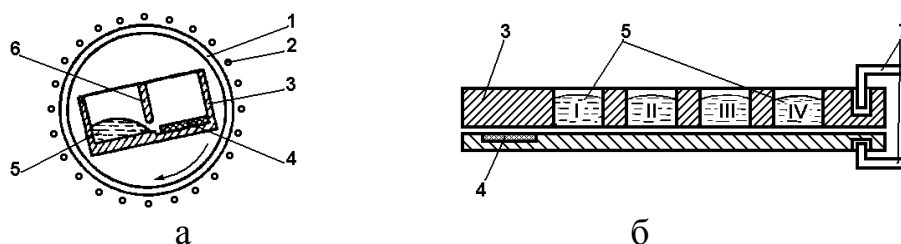


Рис. 5.16. Схема процесса жидкофазной эпитаксии в поворотном контейнере (а) и с использованием

кассеты для получения многослойных структур (б): I – IV растворы – расплавы различного состава; 1 – реактор; 2 – нагреватель; 3 – корпус кассеты; 4 – подложка; 5 – раствор – расплав; 6 – перегородка для удаления оксида с поверхности расплава; 7 – тяга

Эпитаксию из жидкой фазы осуществляют, как правило, в поворотном контейнере, схема которого представлена на рис. 5.16. Внутри кварцевого реактора (1) с нагревателем (2) располагают графитовую кассету (3) в различных областях которой находится подложка (4) и шихта, образующая при плавлении раствор–расплав (5). Нанесение или удаление раствора–расплава (5) осуществляется путем поворота кассеты (3) по часовой стрелке или против часовой стрелки соответственно. Для получения многослойных структур используют кассету с несколькими ячейками (рис. 5.16, б). Смена раствора–расплава осуществляется перед его нанесением путём совмещения положений подложки и соответствующей ячейки посредством тяг (7).

В настоящее время наиболее универсальным методом выращивания тонких слоёв практически любых полупроводников является молекулярно–лучевая эпитаксия (МЛЭ). Метод МЛЭ представляет собой процесс эпитаксиального роста, основанного на взаимодействии одного или нескольких пучков атомов или молекул с кристаллической подложкой в условиях сверхвысокого вакуума.

Качество структур, выращенных МЛЭ, сильно зависит от качества обработки подложек. В отличие от ГФЭ, где очистку подложек осуществляют газовым травлением непосредственно в реакторе, или ЖФЭ, где очистку проводят растворением поверхности подложки, в МЛЭ подготовку поверхности подложек осуществляют следующим образом. Подложки из GaAs сначала кипятят в трихлорэтилене, промывают в ацетоне и метаноле, а затем обрабатывают фильтрованной бумагой, пропитанной бромметанольным полирующим травителем. После промывки в метаноле и деионизованной воде подложку в течение 10 минут травят в смеси $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ (4:1:1) при 60 °С, вновь промывают в деионизованной воде, а затем травят в течение 5 мин в HCl для удаления с поверхности любого оксида или органического вещества. В заключение подложку для пассивации промывают в деионизованной воде и сушат в потоке очищенного азота. После этого подложку с помощью индиевого припоя крепят на молибденовый держатель и немедленно помещают в установку МЛЭ.

Подложки из InP сначала обезжиривают кипячением в трихлорэтилене и ацетоне с последующей промывкой в метаноле и травлением в КОН. Дефекты механической обработки удаляют полировкой подложки фильтровальной бумагой, пропитанной смесью 0,5 % Br_2 –метанол. Затем подложку травят в растворе $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ (4:1:1) в течение 10 минут, после чего в течение 3 минут в смеси 0,5 % Br_2 –метанол, затем в течение 1 минуты подложку пассивируют в воде и сушат очищенным азотом.

Схема реактора для МЛЭ представлена на рис. 5.17. После откачки системы МЛЭ, охлаждения экрана (4) жидким азотом и вывода эффузионных ячеек на заданную температуру начинают нагрев подложки. С поверхности

подложки GaAs кислород полностью десорбируется в интервале температур 580 – 620 °С. Очистку подложек InP от оксидного слоя осуществляют облучением пучком As или P, направленным на подложку, нагретую до температуры 520 °С. При этом поверхность InP полностью очищается от кислорода посредством замены оксида индия на оксид мышьяка As_2O_3 , который десорбируется с нагретой подложки. После этого подложка становится атомарно чистой и пригодной для эпитаксиального роста.

После открытия заслонок (2) соответствующих эффузионных ячеек происходит рост эпитаксиального слоя. Кинетика процесса включает в себя следующие стадии:

- адсорбция соответствующих атомов и молекул;
- миграция по поверхности и диссоциация адсорбированных молекул;
- присоединение атомов к подложке, приводящее к зародышеобразованию и эпитаксиальному росту.

Выращенный тонкий слой имеет кристаллографическую структуру, определяемую структурой подложки. Для получения совершенных эпитаксиальных слоёв важно точно контролировать температуру подложки и скорость поступления веществ из эффузионных ячеек на подложку.

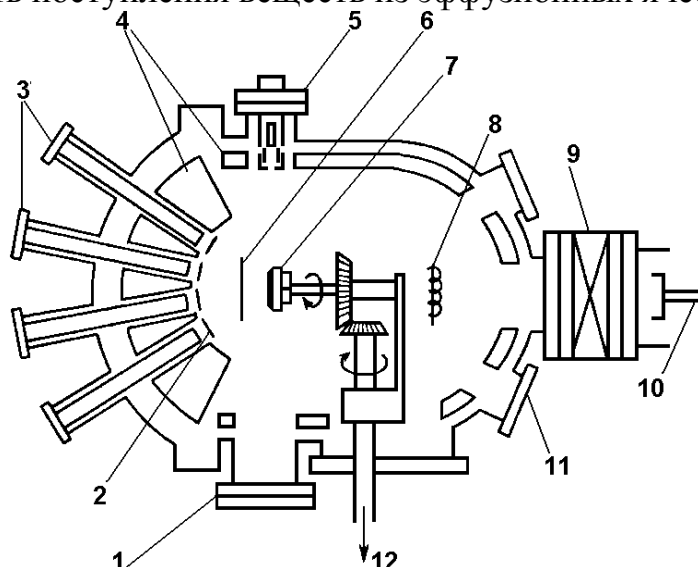


Рис. 5.17. Схема установки МЛЭ: 1 – флуоресцентный экран; 2 – заслонки эффузионных ячеек; 3 – фланцы эффузионных ячеек; 4 – экраны с азотным охлаждением; 5 – электронная пушка дифрактометра; 6 – основная заслонка; 7 – вращающийся подложкодержатель; 8 – ионизационный индикатор; 9 – шлюзовой клапан; 10 – шлюз для смены образцов; 11 – смотровое окно; 12 – ось привода подложкодержателя

Информация о чистоте подложки условиях роста регистрируется методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ), реализованным с помощью электронной пушки (5) и флуоресцентного экрана (1). Кроме того, в современных установках МЛЭ состав и степень легирования растущего слоя контролируют встроенным электронным Оже – спектрометром, а также вторичным ионным масс – спектрометром.

Таким образом, МЛЭ является мощным и гибким методом выращивания кристаллических плёнок. В отличие от методов ГФЭ и ЖФЭ, МЛЭ может обеспечивать исключительно точное управление профилями химического состава и легирования. Поскольку процесс МЛЭ реализуется в сверхвысоком вакууме, то данная технология легко совместима с другими методами полупроводниковой технологии, такими как ионно–лучевое травление, ионная имплантация, распыление и травление в газовом разряде, электронная литография и т.д. Однако для реализации метода МЛЭ требуется достаточно сложное оборудование, что несколько сдерживает его массовое применение.

5.6. Дефекты эпитаксиальных слоёв

Плотность кристаллических дефектов в эпитаксиальных слоях, как правило, выше, чем в подложке. Структурное совершенство эпитаксиальных слоёв определяется степенью очистки газов (реагентов и носителей), состоянием поверхности подложек, кристаллографическими соотношениями и химическими особенностями границ раздела. Наиболее часто встречающиеся дефекты эпитаксиальных слоёв представлены на рис. 5.18. Основными дефектами эпитаксиальных слоёв являются дислокации и дефекты упаковки.

Дислокациями называют дефекты кристаллической структуры, возникающими под воздействием механических напряжений. Различают линейные (краевые) и винтовые дислокации.

Причиной возникновения линейных дислокаций в эпитаксиальных слоях являются термомеханические напряжения, обусловленные градиентами температур, качеством механической обработки подложек, а также совершенством их структуры.

Дислокации несоответствия возникают в гетероэпитаксиальных структурах, а также в гомоэпитаксиальных структурах со скрытыми сильнолегированными областями, где источниками напряжений служат несоответствие постоянных кристаллической решетки подложки и формируемого слоя (рис. 5.13, а).

Для устранения температурных градиентов применяют «мягкие режимы» термообработки, используют специальные конструкции печей, а также нагрев пластин ИК – излучением. Одним из способов уменьшения концентрации дислокаций несоответствия является одновременное введение электрически нейтральной или электрически активной примеси, атомы которой имеют соответствующий радиус для компенсации напряжений.

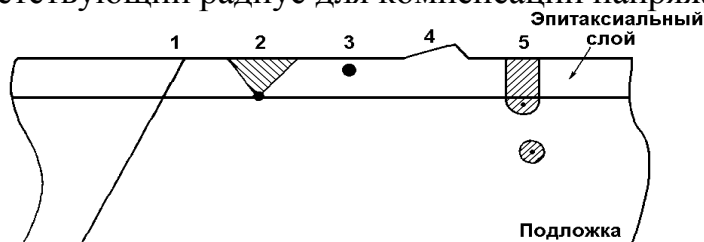


Рис. 5.18. Схематичное изображение различных видов дефектов в эпитаксиальных слоях: 1 – линейные (краевые) дислокации, первоначально

присутствовавшие в подложке и затем проросшие в эпитаксиальный слой; 2 – эпитаксиальные дефекты упаковки, зародившиеся на примесных преципитатах на поверхности подложки; 3 – примесные преципитаты, возникшие во время роста эпитаксиального слоя; 4 – бугорки роста; 5 – дефекты упаковки, образовавшиеся в объеме подложки и пересекающие ее поверхность, проросшие в эпитаксиальный слой

Дефектами упаковки называют планарные кристаллографические дефекты, образующиеся при искажении в упаковке атомных слоев. Большая часть эпитаксиальных дефектов упаковки (ЭДУ) возникает на месте границы раздела подложки с эпитаксиальным слоем. Если на поверхности подложки существует нарушение регулярности, то оно может служить и центром кристаллизации, и причиной нарушения укладки атомов в должном порядке упаковки. Когда сходятся границы правильно и неправильно упакованных участков, образуется разрыв кристаллической структуры. Даже если последующие слои будут идти с правильной упаковкой, то слои атомов над плоскостями, которые начали расти неправильно, будут не согласованы со слоями, образовавшимися над правильными центрами кристаллизации. Источником зарождения ЭДУ могут быть: микродефекты; механические примеси металлов; органические загрязнения; остатки оксидной пленки; наличие загрязнений в атмосфере реактора. Таким образом, причиной появления ЭДУ является неудовлетворительная очистка поверхности подложек и отклонения от оптимальных условий процесса эпитаксиального роста.

Глава 6. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ И МЕТОДЫ ИХ НАНЕСЕНИЯ

6.1. Стабилизация и защита поверхности ИМС и полупроводниковых приборов

В технологии изделий микроэлектроники диэлектрические слои используют для планаризации топологического рельефа поверхности перед нанесением металлических слоев, для изоляции между проводящими слоями, в качестве материалов подзатворных и конденсаторных диэлектриков, в качестве масок при диффузии и ионной имплантации, в качестве источников примеси при диффузии из легированных пленок, для геттерирования примесей, а также для пассивации активной структуры ИМС от примесей, влаги и механических повреждений.

Наряду с прогрессом в литографии и технологии формирования микрорисунка качественное улучшение ИМС невозможно без совершенствования технологии тонких пленок. Преимущества технологии химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ): качественное воспроизведение рельефа, высокая адгезия пленок к нижележащим слоям, селективность процесса осаждения, высокая чистота пленок. ХОГФ – очень

гибкий процесс, позволяющий проводить осаждение элементарных и сложных полупроводников, диэлектрических и проводящих пленок. В основе ХОГФ лежат химические реакции различных типов: окисление, восстановление, реакции пиролиза (термического разложения), аммонолиз и др. Химические и физические условия процесса осаждения могут оказывать влияние на состав и структуру образующейся пленки. Возможности осаждения конкретных материалов зависят от процессов термодинамики, кинетики, наличия газообразных источников для реакции.

Типичные диэлектрические и проводящие пленки и области их применения представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Области применения диэлектрических и проводящих пленок:

Подзатворный диэлектрик	Изоляция	Пассивация	Конденсаторный диэлектрик	Маскирующий слой
SiO ₂ Si ₃ N ₄	SiO ₂ ФСС БФСС АСС БСС	SiO ₂ Si _x N _y ПКЛК Al ₂ O ₃ Si _x N _y H _z	SiO ₂ Si ₃ N ₄ Al ₂ O ₃ TiO ₂ Ta ₂ O ₅	SiO ₂ Si ₃ N ₄

Диэлектрические пленки, применяемые для изоляции СБИС, должны иметь высокие напряжения пробоя, необходимые значения диэлектрической проницаемости для снижения паразитных емкостей, а также высокое сопротивление, низкие диэлектрические потери, низкие удельные механические напряжения и хорошую адгезию при отсутствии пор и микротрещин.

Пленки должны осаждаться при температурах, совместимых с технологическими процессами формирования структурных элементов прибора и с требованиями к характеристикам прибора, с воспроизводимым составом пленок и высокой степенью заполнения вертикальных ступенек. Ряд пленок должен хорошо оплаиваться при нагревании для планаризации топологического рельефа.

Роль тонких пленок постоянно возрастает благодаря расширению сферы применения традиционных материалов, использованию новых тонкопленочных покрытий и выполнению ими новых функций (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Области использования диэлектрических пленок

Область применения	Цель применения
В структурах ИМС	Изоляция элементов ИМС Вертикальная изоляция высоко-температурных проводящих слоев в многослойных структурах на основе

	<p>поликремния; Барьер по отношению к ионам щелочи и влаге; Геттерирование примеси; Планаризация или выравнивание рельефа; Пассивация металла и р–п переходов; Подзатворный диэлектрик; Диэлектрик для накопительного конденсатора; Компенсация остаточных напряжений;</p>
<p>В технологии производства ИМС (временные удаляемые слои)</p>	<p>Маскирующие структуры при окислении; Геттерирующие слои для примесей; Источники твердофазной диффузии; Защитные слои при диффузии и ионной имплантации; Неорганические маски для травления; Фотолитографические маски для травления; Среда планаризации.</p>

6.2. Процессы окисления и свойства диэлектрических слоев

Окисление кремния — физико–химический процесс, применение которого необходимо в ходе всего технологического цикла изготовления современных интегральных микросхем. Для создания надежных высококачественных ИМС требуется не только понимать основные механизмы окисления, но и обладать возможностью формировать высококачественный оксид контролируемым и воспроизводимым образом. Кроме того, чтобы гарантировать надежность ИМС, нужно знать зависимость электрических свойств оксида от технологических параметров процесса окисления. В технологии формирования ИМС оксид кремния используется для нескольких целей. Он служит в качестве маски при ионной имплантации или диффузии легирующей примеси в кремний, для пассивирования поверхности структур, для изоляции элементов компонентов ИМС друг от друга (диэлектрическая изоляция в отличие от изоляции приборов $p-n$ –переходами), выступает в роли одного из основных компонентов в МОП–структурах и обеспечивает электрическую изоляцию в металлических многослойных системах. В настоящее время для формирования оксидных слоев разработаны методы, которые включают термическое окисление, анодирование в растворах электролитов, пиролитическое осаждение (осаждение из газовой фазы) и плазменное анодирование, или окисление. В тех случаях, когда на границе раздела фаз необходимо получить низкую плотность поверхностных состояний, предпочтение отдается методу термического окисления. Однако в связи с тем, что маскирующий оксид впоследствии чаще всего удаляют, условие получения минимальной плотности поверхностных состояний не играет роли при выборе метода формирования маскирующего слоя для процессов диффузии легирующей примеси в кремний. Очевидно, что при необходимости формирования оксидной пленки на поверхности металлического слоя (а это характерно для процессов формирования многослойных металлических слоев), пригодными оказываются только методы газофазного осаждения. Когда на границе раздела фаз необходимо получить низкую плотность поверхностных состояний предпочтительно термическое окисление.

Выбор метода окисления определяется необходимой толщиной и свойствами формируемого оксида. Относительно тонкие оксидные пленки и те оксиды, для которых поставлено условие получения минимального заряда на границе раздела, обычно выращиваются в сухом кислороде. Когда критичным параметром является содержание ионов натрия в пленках оксида, предпочтение отдается методу окисления в системе $HCl-O_2$. При формировании толстых оксидных пленок ($>0,5$ мкм) используют окисление во влажном кислороде (как правило, при нормальном давлении (1 атм.) либо при повышенном давлении (до 25 атм.). Более высокое давление позволяет выращивать толстые оксидные пленки при средних температурах и приемлемых затратах времени. Наиболее распространенный метод окисления при атмосферном давлении реализуется в кварцевых или кремниевых диффузионных трубах, где подложки кремния располагаются в вертикальном положении в пазах специальной подставки (лодочки), сделанной из кварца

или кремния. Типичные температуры окисления лежат в интервале 800–1200 °С и должны поддерживаться в процессе окисления с точностью $\pm 1,0$ °С для обеспечения однородности формируемых пленок. В стандартном технологическом процессе подложки подвергаются очистке, сушке, размещаются в лодочке и автоматически вдвигают в печь, нагретую до температуры 800–900 °С, после чего температура постепенно повышается. Такое повышение температуры необходимо для предотвращения растрескивания подложек. По окончании процесса окисления температура в печи постепенно снижается, и подложки вынимают наружу. Для того чтобы вырастить высококачественный оксид с воспроизводимыми свойствами, необходимо предотвратить попадание пылевидных частиц в рабочую зону печи. Перед помещением подложек в высокотемпературную печь необходимо провести их очистку для уничтожения как органических, так и неорганических загрязнений, появляющихся на предыдущих этапах технологического процесса или во время переноса подложек с одной технологической линии на другую. Процедура химической очистки обычно заключается в удалении органических загрязнений; ее проводят после удаления неорганических ионов и атомов. Обычная процедура очистки выполняется в смеси H_2O — H_2O_2 — NH_4OH , которая обеспечивает удаление органических соединений за счет сольватирующего действия гидроксида аммония и окисляющего действия перекиси водорода. Для удаления атомов тяжелых металлов обычно используют раствор H_2O — H_2O_2 — HCl . Повторное осаждение растворенных ионов тяжелых металлов в этом растворе предотвращается за счет формирования растворимых комплексов. Очистка в таком растворе проводится при температуре 75–85 °С в течение 10–20 мин, после чего следуют охлаждение подложек, их отмывка и сушка в центрифуге. Если такие загрязнения не удалить, то возможно ухудшение электрических характеристик приборов, а также понижение надежности ИМС.

Для достижения однородности и свойств пленки и воспроизводимости параметров рост тонких оксидных пленок должен быть достаточно медленным. Это достигается разнообразными методами, включающими в себя окисление в сухом кислороде с добавлением или без HCl , комплексное окисление при различных температурах и составе окислительной атмосферы, окисление во влажном кислороде, окисление при пониженном давлении. При работе с HCl необходимо соблюдать осторожность, особенно в отношении системы очистки, поскольку HCl способствует коррозии металлических частей оборудования. При проведении этих процессов необходимо также помнить, что небольшое количество паров воды может сильно повлиять на скорость окисления.

Современные диффузионные печи (используемые также и для окисления) управляются с помощью микропроцессоров, которые обеспечивают необходимую последовательность процесса, осуществляют контроль температуры и расхода газов. Вся описанная ранее процедура, от загрузки подложек в лодочку до извлечения их оттуда, полностью программируется. Микропроцессорное управление обеспечивает обратную связь для сравнения величин различных параметров с заданными значениями

этих же параметров и для введения соответствующих изменений. Например, при изменении расхода газового потока температура процесса может изменяться. Путем непосредственного цифрового контроля проводится сравнение этой температуры с заданным значением, и необходимые изменения автоматически вводятся в систему нагрева. Свойства оксидов кремния зависят от экспериментальных условий выращивания оксида. Например, коэффициент преломления пленок оксида, выращенного в сухом кислороде, уменьшается с увеличением температуры, достигая постоянного значения 1,4620 при температуре выше 1190°C. Скорость травления термических оксидов при комнатной температуре в HF (49%) составляет 100 нм/мин и изменяется в зависимости от температуры и концентрации травителя. Кроме того, скорость травления зависит от плотности оксида и, следовательно, от температуры окисления.

Технологические условия выращивания оказывают существенное влияние на свойства оксидных пленок. Например, с понижением температуры окисления получаем более плотный оксид. Для пассивирования ионов натрия, повышения пробивных напряжений в пленках и геттерирования примесей и дефектов в кремнии применяется добавление HCl в окислительную атмосферу.

К свойствам диэлектрических слоев многослойных ИМС предъявляют следующий ряд требований (табл. 6.3):

- 1) требования к электрофизическим свойствам;
- 2) требования к химическим свойствам;
- 3) требования к физическим свойствам;
- 4) требования к технологическим свойствам.

Способность слоя диоксида кремния служить в качестве локального маскирующего покрытия при диффузии атомов легирующей примеси при повышенных температурах — очень полезное свойство для технологии формирования ИМС. Загонка, или осаждение, легирующей примеси путем ионной имплантации, термической диффузии или методами центрифугирования обычно приводит к образованию источника легирующей примеси на поверхности оксидной пленки или вблизи нее. Для того чтобы легирующая примесь не диффундировала через оксидную пленку в маскированных областях и не достигала поверхности кремния, необходимо, чтобы в ходе этапа высокотемпературной разгонки диффузия этой примеси в окисле была достаточно медленной по отношению к диффузии в кремнии. Нужное значение толщины может быть установлено экспериментальным путем при определенных температуре и времени диффузии как толщина оксида, требуемая для предотвращения инверсии типа проводимости слаболегированной подложки кремния. Для надежности в производстве используют пленки, толщина которых несколько увеличена. Чаще всего пленки оксидов, используемые для маскирования традиционных примесей и стандартных технологических процессах формирования ИМС, имеют толщину 0,5—0,7 мкм.

Таблица 6.3. Требуемые свойства диэлектрических слоев

Свойства слоев	Требуемые характеристики
Электро-физические	Высокое напряжение электрического пробоя
	Оптимальная диэлектрическая проницаемость
	Низкий коэффициент угла диэлектрических потерь
	Высокое электрическое удельное сопротивление
Химические	Контролируемость композиционного состава
	Химическая стабильность
	Геттерирование ионов щелочи
	Низкое содержание примесей
	Осаждение при низкой температуре
Физические	Отсутствие пор, микротрещин, дисперсных включений, раковин
	Низкие остаточные напряжения
	Однородная толщина слоев
	Хорошая адгезия к нижележащим слоям
	Барьер против ионов щелочи
	Диффузия водорода
Технологическое	Качественное покрытие ступенек
	Совместимость со структурой ИМС и требованиям к ее характеристикам
	Возможность формирования рисунка с помощью прецизионной фотолитографии и селективного травления
	Возможность оплавления для сглаживания рельефа или планаризации

Граница раздела Si—SiO₂ представляет собой переходную область между кристаллическим кремнием и аморфным кварцевым стеклом как в отношении положения атомов, так и в отношении стехиометрии. Различные по природе заряды и ловушки носителей заряда сопутствуют термически окисленному кремнию, часть из них связана с переходной областью. Заряд на границе раздела может индуцировать заряд противоположной полярности в расположенной под ней областью кремния, оказывая влияние на параметры МОП-приборов и тем самым на процент выхода годных изделий и их надежность. Как предполагается, возникновение этого заряда вызвано

несколькими причинами, среди которых можно назвать структурные дефекты, связанные с процессом окисления, металлические примеси или разрывы химических связей. Отжиг в водороде при низкой температуре (450 °С) приводит к эффективной нейтрализации заряда поверхностных состояний. Плотность этого заряда обычно выражается как число частиц на единицу площади и единицу энергии в запрещенной зоне кремния ($\text{см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$). Для определения заряда поверхностных состояний обычно используют методы, основанные на обработке вольт–фарадных (квазистатических, высоко– или низкочастотных) характеристик и зависимостей проводимости от напряжения. Постоянный заряд в окисле Q_f (обычно положительный) расположен на расстоянии ~ 3 нм от границы раздела Si–SiO₂. Плотность этого заряда находится в диапазоне от 10^{10} – 10^{12} см^{-2} и зависит от режима окисления и условий отжига, а также от ориентации подложки. Возникновение Q_f связано непосредственно с самим процессом окисления. В технологическом плане заряд Q_f связан как с температурой, так и с атмосферой, в которой проводится окисление. В атмосфере кислорода величина этого заряда определяется последней высокотемпературной термообработкой. При быстром охлаждении от высокой температуры получают более малые значения Q_f . Заряд подвижных ионов Q_m связан с присутствием в окисле ионов щелочных металлов, таких, как натрий, калий и литий, отрицательно заряженных ионов и ионов тяжелых металлов. При наличии электрического поля ионы щелочных металлов обладают подвижностью даже при комнатной температуре. Плотность такого заряда лежит в диапазоне 10^{10} см^{-2} – 10^{12} см^{-2} и выше, а его источником являются материалы, используемые в технологическом процессе, химические реактивы, окружающая среда и предметы, контактирующие с подложкой. Поскольку ионы щелочных металлов могут располагаться в разных местах оксида, МОП–конденсаторы подвергаются специальным тестовым испытаниям при повышенной температуре и приложенном электрическом напряжении, а результаты измерений сравниваются со стандартными C–V–характеристиками. Традиционные методы, направленные на уменьшение этого заряда, заключаются в очистке поверхности реакционной трубы хлористым водородом, геттерировании ионов фосфорно–силикатным стеклом и использовании маскирующих слоев, таких, как нитрид кремния.

Правильное понимание механизмов возникновения остаточных напряжений, в системе пленка – подложка имеет важное значение, поскольку высокие значения напряжений могут привести к образованию трещин в пленке и возникновению дефектов в расположенных под пленкой слоях кремния. Основной причиной возникновения остаточных напряжений является разница коэффициентов термического расширения между Si и SiO₂, а также полиморфные превращения в SiO₂. В ходе технологического процесса формирования ИМС в оксидной пленке вытравливаются окна, что приводит к сложному распределению остаточных напряжений на краях оксидной пленки. Здесь на границе разрыва сплошности пленки может возникать чрезвычайно высокий уровень остаточных напряжений. Обычно эти напряжения релаксируют за счет пластической деформации или других механизмов.

6.3. Формирование тонких слоев методом химического осаждения из газовой фазы

Роль тонких пленок для микроэлектроники трудно переоценить. Фундаментальной проблемой, стимулирующей прогресс в области технологии химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) является повышение степени интеграции, и, как следствие, использование трехмерных структур, где наиболее полно реализуются преимущества ХОГФ, такие как: широкий спектр химических реакций; высокая чистота пленок; качественное воспроизведение топологического рельефа; высокая адгезия пленок к нижележащим слоям; отсутствие или уменьшение радиационных повреждений; селективность процесса осаждения. ХОГФ–процессы являются базовой технологией создания диэлектриков и проводников вплоть до 65 нм технологии.

Химическое осаждение из парогазовой фазы представляет собой процесс, при котором вещества, находящиеся в газовой фазе, образуют твердый продукт, вступая в химическую реакцию на поверхности подложки или вблизи нее. ХОГФ позволяет получить практически все функциональные слои, используемые в производстве ИМС. Протекание химических реакций является особенностью, отличающей данные процессы от физических методов осаждения пленки (испарения или напыления). В зависимости от места протекания реакции химического осаждения могут быть гомогенными, гетерогенными или представлять собой сочетание обоих типов. Гомогенные реакции “зарождаются” в газовой фазе и приводят к образованию частиц, что является наиболее значительной проблемой для технологии ХОГФ. Большинство процессов выбирают таким образом, чтобы они протекали на поверхности подложки (гетерогенные реакции), а не в газовой фазе, и обеспечивали осаждение требуемой пленки. Свойства пленок и эффективность их производства путем химического осаждения из парогазовой фазы зависит от достаточно большого количества параметров процесса. Поэтому дальнейшее развитие процессов осаждения связывают с более полным использованием преимуществ метода и поиска оптимального соотношения между параметрами процессов применительно к специфике формируемых ИМС.

Процесс химического осаждения из парогазовой фазы может быть представлен как последовательность кинетических стадий (в частности для гетерогенного процесса):

- 1) массоперенос реагентов к подложке;
- 2) адсорбция реагентов на поверхности подложки;
- 3) химическая реакция на поверхности подложки, включая поверхностную диффузию;
- 4) десорбция газообразного продукта с поверхности подложки;
- 5) массоперенос газообразного продукта в направлении от подложки.

Наиболее медленная из этих стадий определяет общую скорость реакции. В диапазоне более низких температур конкретная реакция химического осаждения зачастую оказывается процессом, контролируемым

поверхностью. Наиболее вероятной стадией, контролирующей скорость, является слабая абсорбция реагентов на поверхности подложки. В диапазоне более высоких температур скорость чаще всего контролируется диффузионными процессами, причем зависимость скорости осаждения от температуры становится более “умеренной”. Наиболее вероятной стадией, определяющей скорость, является диффузия реагентов и продуктов реакции через пограничный слой по направлениям к и от поверхности подложки.

ХОГФ процессы можно подразделять в соответствии с типом энергии, подаваемой для инициирования и поддержания реакции, следующим образом.

1. Термически активируемые реакции в различных диапазонах давления, к числу которых относится подавляющее большинство процессов химического осаждения из парогазовой фазы; тепло подается посредством резистивного нагрева, либо нагрева с использованием высокочастотной индукции. В этом случае эффект достигается за счет придания молекулам реагентов дополнительной кинетической энергии. Нагрев должен быть непрерывным.

2. Реакции с плазменной активацией процесса (PECVD), где тлеющий разряд, высокочастотным (ВЧ) возбуждением при низком давлении обеспечивает большую часть энергии необходимой для активации процесса осаждения. В отличие от термического нагрева технологический эффект достигается при этом за счет потенциальной энергии разрыва связей.

3. Реакции, индуцируемые фотонами — фотохимические и фоточувствительные реакции (PHCVD) в том числе лазерное осаждение (LCVD). Лазерное осаждение открывает возможности перед безмасочным формированием микрорисунка, однако, технологическая база таких процессов находится на этапе разработки. При этом энергия, необходимая для реакции, обеспечивается электромагнитным излучением.

Скорость осаждения и однородность пленок, полученных посредством всех процессов химического осаждения из парогазовой фазы, определяются двумя основными параметрами: скоростью массопереноса газообразных реагентов к поверхности подложки и скоростью реакции реагентов на поверхности подложки.

Наиболее простым термически активным процессом является обычное химическое осаждение из парогазовой фазы при атмосферном давлении. В процессе осаждения при атмосферном давлении эти две скорости обычно имеют одинаковый порядок величины. Недостатком этого процесса является тенденция к гомогенному зародышеобразованию, приводящему к образованию мелких частиц, для предотвращения чего необходимы специальные методы инъекции газа. Преимущество химического осаждения из парогазовой фазы при атмосферном давлении является его простота.

Термически активируемые процессы, протекающие при низком давлении, проводятся в большинстве случаев с использованием резистивного нагрева. Уменьшение давления газа усиливает массоперенос относительно скорости реакции на поверхности подложки. К числу ключевых параметров, оказывающих влияние на однородность пленки по толщине в условиях химического осаждения из парогазовой фазы при низком давлении,

относятся: распределение и величина температуры в реакторе, уровень давления в реакторе и скорости потоков газообразных реагентов. Для того, чтобы получить равномерный профиль для каждой подложки в пределах всего реактора необходим тщательный контроль и регулировка указанных параметров. В случае осаждения при низком давлении однородность пленок по толщине и качество покрытия ступеньки значительно улучшаются по сравнению с таковыми при осаждении при атмосферном давлении. Пленки имеют меньше дефектов, например, таких, как загрязнение мелкими частицами, вследствие изначально более чистых рабочих условий в реакторе с горячими стенками и вертикальным расположением подложек, что сводит к минимуму образование и осаждение мелких частиц, гомогенно “зародившихся” в газовой фазе. Эти аспекты имеют особенно важное значение для технологии СБИС, где требуется очень высокий уровень надежности устройств и максимальный процент выхода годной продукции.

На рис. 6.1 представлен реактор с горячими стенками, работающий при пониженном давлении и используемый для осаждения поликремния, диоксида кремния и нитрида кремния. Такой реактор состоит из кварцевой трубы, нагреваемой в трехзонной печи. Действие механического насоса иногда усиливается использованием вентилятора. Давление в реакционной камере обычно составляет от 30 до 250 Па, температура 300–900 °С, а расход газа 100–1000 см³/мин в пересчете на атмосферное давление. Подложки устанавливаются вертикально, перпендикулярно газовому потоку, в кварцевой лодочке. Одновременно в реакторах такого типа можно обрабатывать от 50 до 200 подложек.

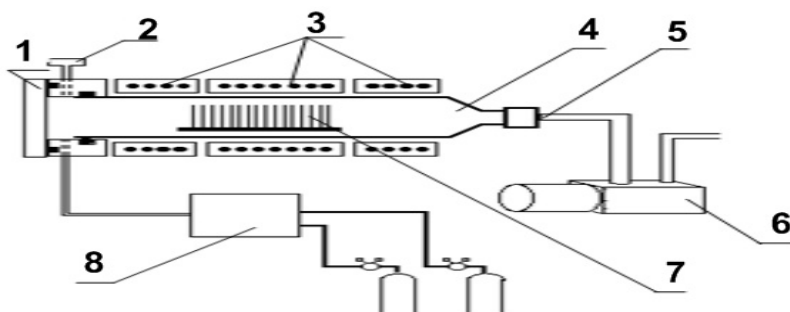


Рис. 6.1. Промышленный реактор нанесения плёнок нитрида кремния, диоксида кремния и поликристаллического кремния

1 – загрузочный люк; 2 – датчик давления; 3 – 3-зонный резистивный нагреватель; 4 – кварцевая труба; 5 – ловушка; 6 – вакуумный насос; 7 – кремниевые пластины; 8 – регулятор расхода газа

Реакторы с горячими стенками, работающие при пониженном давлении, можно легко увеличить (в масштабе) для обработки подложек диаметром 150 мм. Основные преимущества реакторов рассматриваемого типа — высокая однородность пленок по толщине, большой объем загрузки и возможность обрабатывать подложки большого диаметра. К недостаткам относятся низкая скорость процесса осаждения и использование ядовитых, легковоспламеняющихся или способствующих коррозии газов.

В таблице 6.4 представлены сравнительные характеристики слоев SiO₂, полученных ХОГФ при различных условиях. Как видно из таблицы 6.4, наилучшим сочетанием свойств обладают слои диоксида кремния, полученные среднетемпературным ХОГФ, что и обусловило его широкое распространение. Однако температура процесса не позволяет наносить указанные слои после нанесения слоя алюминия. Поэтому для структур с нанесенными алюминиевыми слоями используют низкотемпературное ХОГФ.

Таблица 6.4. Свойства слоев SiO₂, осажденных различными методами

Метод осаждения	Плазмохимическое осаждение из смеси моносилана с закисью азота	Низкотемпературное окисление моносилана кислородом	Осаждение из парогазовой смеси ТЭОС	Высокотемпературное окисление моносилана кислородом
Температура, °С	200	400	750	850
Давление	Пониженное	Атмосферное	Пониженное	Пониженное
Состав	SiO _{1,9} содержат водород	SiO ₂ содержат водород	SiO ₂	SiO ₂
Воспроизведение рельефа	Некачественное	Некачественное	Достаточно качественное	Полностью качественное
Термостабильность	Выделение водорода	Уплотнение пленки	Пленка стабильна	Пленка стабильна
Плотность, г/см ³	2,3	2,1	2,1	2,3
Коэффициент преломления	1,47	1,44	1,46	1,46
Остаточные напряжения, Гпа	30 (сжатие) – 30 (растяжение)	30 (растяжение)	10 (сжатие)	30 (сжатие)
Электрическая прочность, 10 ⁶ В/см	3 – 6	5	5	10
Скорость травления, нм/мин (H ₂ O:HF= 100:1)	40	6	3 (после уплотнения при температуре 950 °С)	3
Совместимость со структурой ИМЧ	Совместим с функциональными слоями ИМС	Совместим с функциональными слоями ИМС	Несовместим после нанесения алюминия	Для формирования спейсеров

6.4. Формирование тонких слоев низкотемпературным плазмохимическим осаждением из газовой фазы

В настоящее время ХОГФ является базовой технологией, при этом широкое распространение получили плазменные процессы осаждения в плазме высокой плотности, быстрое термическое ХОГФ и использование оборудования с поштучной обработкой пластин. Кроме того, появились

новые модифицированные процессы, такие как пульсирующее химическое осаждение (разработанное фирмой Novellus) и, наконец, ХОГФ атомарных слоев (ALD или ALCVD), в которых управление однородностью пленки происходит на уровне ангстрем.

Осаждение, активируемое плазмой, представляет собой сочетание процесса, протекающего в тлеющем разряде, и химического осаждения из газовой фазы при низком давлении. Электрический тлеющий разряд инициируется обычно высокочастотным источником, но может также создаваться источниками переменного тока, постоянного тока либо микроволновыми. В результате воздействия электрического поля на газовую среду происходит образование очень “горячих” электронов, температура которых может превышать температуру атомов и молекул на один или даже на два порядка. Взаимодействие этих высокоэнергетических электронов с молекулами газа приводит к образованию реакционно-способных частиц, которые в обычных условиях могут существовать лишь при очень высоких температурах. Именно это и является одним из достоинств данного метода, позволяющего осаждать пленки при низких температурах (от 200 до 400°C). К числу основных параметров, оказывающих влияние на процесс плазмохимического газофазного осаждения пленок и их однородность, можно отнести: плотность и распределение высокочастотной мощности, состав и распределение газовой фазы, а также общее давление в зоне реакции.

Основное преимущество стимулированных плазмой реакций состоит в том, что они происходят при температурах, значительно меньших, чем в случае чисто термических реакций. В связи с этим появляется возможность осаждать или выращивать пленки на подложках, не обладающих необходимой для термического осаждения стабильностью. Дополнительное достоинство активации плазмой термической реакции состоит в значительном увеличении скорости осаждения и возможности получения пленок уникального состава.

Плазмохимическое осаждение в таких реакторах или в реакторах с параллельным расположением пластин используется также в тех случаях, когда необходима очень низкая температура процесса (100–350°C).

Плазмохимический нитрид кремния (SiN) формируется при гораздо более низких температурах (200–350 °C) и используется как пассивирующий слой и как защитный слой от механических повреждений. Низкая температура осаждения позволяет наносить нитрид кремния поверх алюминиевого или золотого слоев.

Возможности осаждения конкретных материалов зависят от процессов термодинамики, кинетики, наличия газообразных источников для реакции. Существует метод осаждения из газовой фазы, активированной плазмой (PECVD). Реакции с плазменной активацией, в которых тлеющий разряд с ВЧ-возбуждением при низком давлении обеспечивает большую часть энергии, необходимой для активации процесса осаждения. В этом случае, в отличие от нагрева, технологический эффект достигается за счет потенциальной энергии оборванных связей. Однако применение плазмы для активации процесса химического осаждения из газовой фазы приводит к

появлению дополнительных эффектов, влияющих на свойства пленок и характеристики процесса, обусловленные ВЧ–мощностью, напряжением и частотой генератора, геометрией электродов и расстояниями между ними, вместе с эффектами, обусловленными температурой, составом газовой фазы, давлением, расходами газов и геометрией реакторов. Реакции с плазменной активацией подразделяются на два вида: с дискретной подачей реагентов (активированное плазмой атомарное осаждение слоев) и непрерывной подачей реагентов. В свою очередь процессы с непрерывной подачей реагентов могут происходить в плазме с низкой, высокой и сверхвысокой частотой. Существует также осаждение из газовой фазы при активации процесса плазмой высокой плотности.

Повышение степени интеграции функциональной сложности ИМС с одновременным уменьшением горизонтальных и вертикальных размеров элементов при увеличении площади кристалла и диаметра обрабатываемых подложек обуславливает повышение требований к качеству диэлектрических пленок, осаждаемых в плазме низкого давления, по величине привносимой дефектности. Пленки, полученные плазмохимическим осаждением при низких температурах, являются одним из важнейших классов конструктивно–технологических материалов, используемых в производстве современных интегральных микросхем. Для их осаждения широко используются плазмохимические реакторы с горизонтальным расположением пластин в многоэлектродной системе–подложкодержателе и емкостным возбуждением плазмы (рисунок 6.2). Величина привносимой дефектности диэлектрических пленок определяется в первую очередь чистотой технологических сред, описываемой комплексным показателем – классом чистоты производственного помещения или плотностью аэрозольных частиц заданного размера в единице объема газообразной или жидкой технологической среды, конструкциями загрузочной системы и многоэлектродной системы–подложкодержателя и материалом электродов. Можно выделить следующие основные шаги процесса плазмохимического осаждения пленок: загрузку–выгрузку пластин, откачку, продувку реактора, пуск в реактор рабочих газов, обработку пластин в плазме азота, осаждение нитрида кремния в плазме низкого давления, напуск азота до атмосферного давления. При этом используются так называемые «мягкие» режимы откачки и напуска.

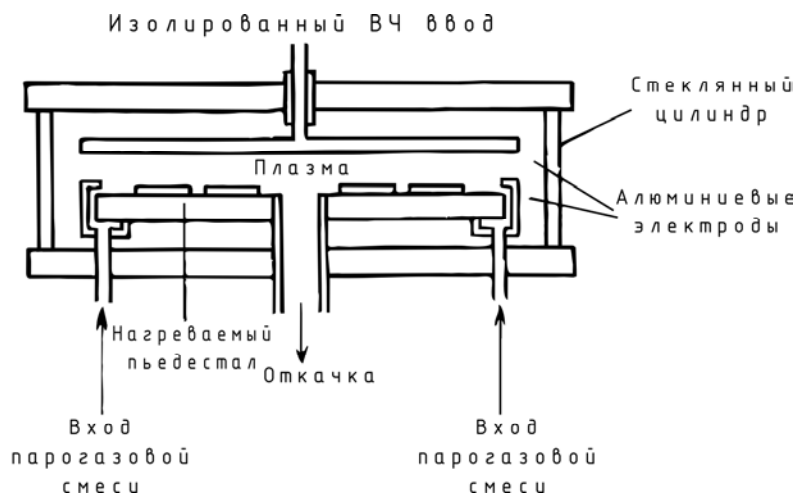


Рис. 6.2. Реактор плазменного осаждения с параллельным расположением электродов

Преимуществом реакторов продольного типа с вертикальным расположением пластин рабочей поверхностью друг к другу (см. рис.6.3) являются большая загрузка пластин и большая стабильность процесса. Однако установки с горизонтальным расположением электродов иногда дополняются устройствами кассетной загрузки, шлюзами и манипуляторами, повышающими производительность оборудования и уменьшающими загрязнение камеры.

Уменьшение размеров активных элементов ИМС с одновременным увеличением диаметра кремниевых пластин обуславливает новые требования к технологическим процессам и оборудованию, в том числе и для плазмохимического осаждения. Основными требованиями являются снижение уровня загрязнений и существенное повышение воспроизводимости свойств наносимых слоев.

Для решения указанных задач было разработано новое поколение технологического оборудования.

В 1987г. фирма Applied Materials внедрила промышленную установку для плазмохимического осаждения нитрида и оксида кремния с поштучной обработкой пластин “Precision-5000 CVD” (рис.6.4). Разработка таких реакторов позволила полностью автоматизировать технологический процесс, проводить обработку пластин большого диаметра, а также осуществить интеграцию технологических процессов, т.е. последовательное выполнение нескольких технологических процессов в автоматическом режиме.

В таком оборудовании загрузка-выгрузка пластин осуществляется при помощи робота-манипулятора. Нагрев подложек осуществляется при помощи галогенных ламп. Подача реагентов в зону реакции производится через электрод с большим количеством отверстий (душ), что позволяет создать равномерное распределение реагентов в зоне реакции и существенно повысить однородность и воспроизводимость толщины и других параметров осаждаемых пленок. Такое оборудование применяется в настоящее время для изготовления ИМС с минимальными размерами активных элементов до 0,35 мкм.

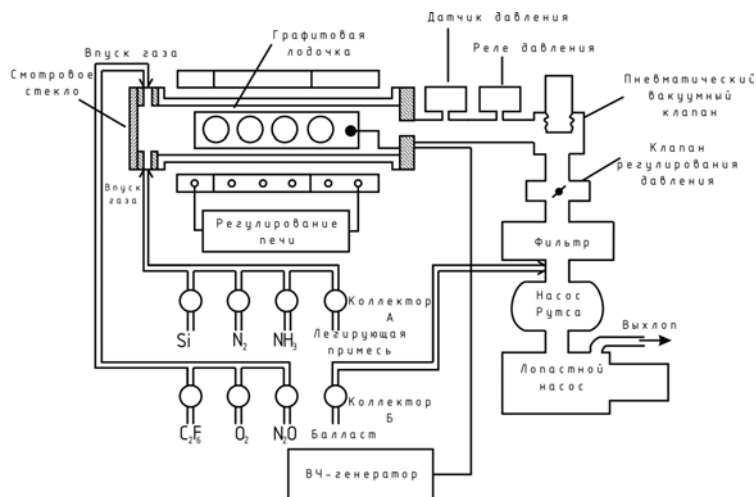


Рис. 6.3. Реактор плазмохимического осаждения для поштучной обработки пластин

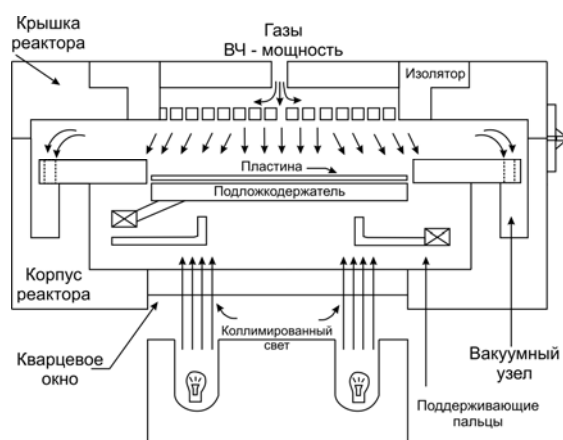


Рис. 6.4. Промышленная установка для плазмо-химического осаждения нитрида и оксида кремния с поштучной обработкой пластин “Precision-5000 CVD”

Благодаря низкой температуре и высокой скорости процесса осаждения, а также обеспечению таких свойств, как адгезия, низкая плотность сквозных дефектов, хорошее перекрытие ступенек рельефа, приемлемые электрические характеристики, пленки нитрида и диоксида кремния, полученные стимулированным плазмой осаждением, хорошо подходят для пассивации металлов с низкой температурой плавления, например алюминия. Они также могут использоваться в качестве планаризирующих покрытий, диэлектрического разделительного слоя в системах с многоуровневыми металлическими слоями, промежуточного слоя в многослойных резистивных масках, применяемых в литографии с высоким разрешением.

6.5 Атомно-слоевое осаждение (ALD)

Атомно-слоевое осаждение – ALD процесс – представляет собой последовательность самоограничивающихся поверхностных реакций при низкой температуре, обеспечивающих осаждение монослойных пленок. Рост таких пленок полностью управляется поверхностью подложки. Это основано на отдельных последовательно выполняемых поверхностных реакциях

между подложкой и каждым прекурсорным химикатом. Таким образом, механизм насыщения делает скорость роста материала прямо пропорциональной количеству реакционных циклов, вместо изменения интенсивности потока реагентов или времени роста. При атомно-слоевом осаждении пленки выращиваются послойно с моноатомной точностью. В настоящее время уже используется оборудование для ALCVD, позволяющее получать пленки диэлектриков, в том числе и многослойных оксидов; прозрачные проводники и полупроводники, нитриды, фториды, соединения II–VI и другие материалы. Кроме того, разрабатываются процессы формирования металлов, таких как тантал и медь.

Методом атомно-слоевого осаждения можно получать: чистые материалы (C, Al, Si, Ti, Fe, Co, Ni, Ge и др.), оксиды, нитриды, соединения углерода с Si, Se, Te и другие соединения.

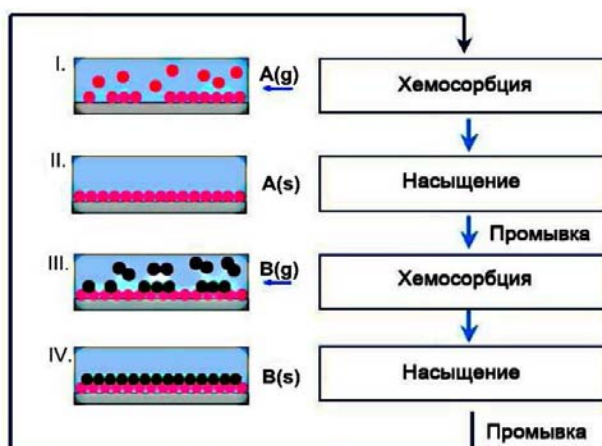


Рис. 6.5. Схема атомно-слоевого осаждения (молекулярная сборка из газовой фазы)

В таблице 6.5 представлены сравнительные характеристики процессов атомно-слоевого осаждения и химического осаждения из газовой фазы.

Таблица 6.5. Сравнение атомно-слоевого осаждения и осаждения из газовой фазы

Атомно-слоевое осаждение	Химическое осаждение из газовой фазы
Дискретный (нм\цикл)	Аналоговый (нм\цикл)
Определяется поверхностью	Определяется параметрами процесса
Прецизионность	Высокая скорость осаждения
Использует отдельные источники для каждого вещества	В качестве источников можно использовать смеси
Существенное влияние газодинамических параметров	Существенная зависимость от параметров процесса

Как видно из рис. 6.6, качество покрытия при атомно-слоевом осаждении обеспечивается гораздо лучше, чем

при использовании метода химического осаждения из газовой фазы.

Недостатком метода атомно-слоевого осаждения является только его дороговизна.

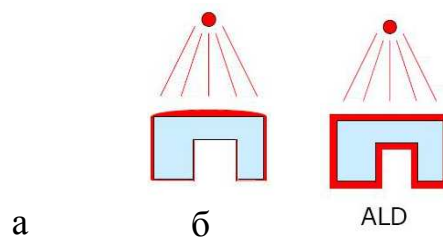


Рис. 6.6. Качество покрытия при осаждении из газовой фазы (а) и атомно–слоевом осаждении (б)

6.6. Пленки, получаемые центрифугованием из растворов кремнийорганических соединений (НЦР – пленки)

В настоящее время, для планаризации многоуровневой металлизированной разводки СБИС и УБИС широко используются пленки, полученные центрифугованием из кремнийорганических пленкообразующих растворов (НЦР–пленки – Spin-On-Glass (SOG)). Состав полученного из раствора слоя практически соответствует оксиду кремния, что позволяет использовать эти слои в качестве составной части межуровневого диэлектрика. При этом свойства таких слоев близки к свойствам плазмо–химического оксида кремния. Кроме того, следует отметить низкую стоимость и энергоемкость используемого при этом оборудования, низкую токсичность используемых реагентов и простоту утилизации продуктов реакции. Для создания планаризирующих пленок используются пленкообразующие растворы, содержащие соединения, разлагающиеся при сравнительно низких температурах. Этими материалами могут быть продукты гидролитической поликонденсации либо органополи-силоксаны, такие как полисилан, полисилоксан, полисилазан и т.д., либо алкоксисиланы или другие кремний-органические соединения, которые при гидролитической поликонденсации образуют силоксановые цепи, склонные к полимеризации. Свойства пленкообразующих растворов и получаемых из них пленок определяются условиями реакции, такими как молярное соотношение реагентов, рН, концентрация раствора и т.д. Для получения требуемого НЦР–оксида формируется золь, который при помощи центрифугования наносится на подложку, образуя гель (полимер). Для получения требуемых свойств золь необходимо контролировать состав реакционной смеси и условия протекания реакции. При высокой скорости образования золь свойства получаемых пленок ухудшаются, поэтому во время образования кремниевой кислоты необходимо контролировать температуру реакционной смеси.

НЦР–раствор может подаваться на пластину двумя методами – стационарным (пластина неподвижна) и динамическим (пластина вращается). Стационарная подача НЦР–материала обычно позволяет достигнуть лучшего качества покрытия на пластинах меньшего диаметра (100 мм и меньше), а динамическая подача дает лучшие результаты на пластинах диаметром 125 мм и больше. Диаметр трубопровода для подачи материала возрастает с увеличением диаметра пластины, так как при этом необходимо подать большее количество материала. Так для пластин

диаметром 100 мм типичный расход материала составляет 1,0–2,0 мл, а для пластин диаметром 150 мм — уже 2,5–4,0 мл.

Типичный процесс нанесения НЦР-пленок состоит из шести циклов. Вначале пластина размещается на столике центрифуги при включенной вытяжной вентиляции. Затем, во втором цикле, на пластину подается необходимое количество НЦР-материала, при этом пластина неподвижна или вращается при скорости около 300 об/мин. Далее, в третьем цикле, при высокой скорости вращения, обычно около 3000 об/мин в течение 5–11 секунд, материал покрывает всю пластину. Более высокая скорость вращения приводит к образованию более тонких пленок, а также к ухудшению однородности толщины и увеличению краевого буртика. Слишком высокая скорость вытяжки из ванны центрифуги приводит к формированию пленок с "лучевым" разбросом. "Лучевой" разброс может быть обусловлен неравномерным испарением растворителя, загрязнением на подложке, а также и механическими вибрациями. В четвертом цикле, при нанесении НЦР-пленок используют чередование вращения и пауз. В пятом цикле скорость вращения пластины уменьшается до 1500 об/мин. На этой скорости проводится отмывка обратной стороны пластины, а при необходимости и удаление краевого буртика. И, наконец, последний цикл – сушка пластины, которая проводится при скорости около 3000 об/мин в течение около 10 секунд. Окончательное формирование пленки осуществляется путем термообработки в диффузионной печи в атмосфере азота (со скоростью потока 2–6 л/мин) или кислорода при температуре 350–450°C. Между сушкой и отжигом пластины должны храниться в сухой среде с влажностью не более 40% или в продуваемом азотом шкафу. Для нанесения НЦР-пленок может быть приспособлена установка нанесения фоторезиста, но для получения наилучших результатов рекомендуется использовать установку, специально разработанную для нанесения НЦР-пленок. Такая установка имеет множество особенностей, обеспечивающих получение однородных и бездефектных пленок.

Сфера применения НЦР-пленок постоянно расширяется. Так НЦР-пленки широко используются для сглаживания рельефа поликремниевой разводки (диэлектрик под первым металлом), для формирования межуровневого диэлектрика (в том числе и диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью), для формирования пассивирующих слоев. В настоящее время НЦР-пленки стали широко использоваться для изоляции узкими полосками. Кроме того, НЦР-пленки используются в «трехслойном» резисте в качестве стоп-слоя и разделительного слоя, предотвращающего взаимное смешивание слоев, а также для обеспечения маскирования планаризирующего слоя. И, наконец, НЦР-пленки активно используются при производстве микроэлектромеханических приборов, при получении антиотражающих покрытий в оптике. Улучшение характеристик пленок, полученных методом центрифугирования, может быть достигнуто также за счет использования перспективных низкотемпературных обработок в плазме азота, паров воды или кислорода. Особое внимание следует уделять совершенствованию методов планаризации и разработке специализированного оборудования для их реализации. Несмотря на

традиционную приверженность многих производителей ИМС к ХОГФ методам формирования диэлектриков, синтез исходных материалов в жидкой фазе методами центрифугирования обладает существенно более высокой гибкостью при создании структур с заданным молекулярным составом. В ближайшее время эти две технологии будут развиваться параллельно, взаимодействуя и конкурируя между собой.

Глава 7. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Свойства материалов, используемых для изготовления металлических слоев, зависят и от условий их нанесения. Для нанесения металлических плёнок можно применять многие методы: термическое испарение материалов в вакууме, катодное распыление, реактивное распыление в среде остаточных молекул реактивного газа, ионно–плазменное распыление, магнетронное распыление и др.

Получение высококачественных и воспроизводимых по электрическим параметрам металлических пленок является одним из важнейших технологических процессов формирования структур как дискретных диодов и транзисторов, так и активных и пассивных элементов ИМС.

Таким образом, от совершенства технологических процессов нанесения тонких пленок металлов в значительной степени зависят надежность и качество изделий микроэлектроники, технологический уровень и экономические показатели их производства.

При нанесении тонких пленок в вакууме используют два метода генерации потока частиц в вакууме: термическое испарение и ионное распыление (рис. 7.1). При первом методе используют испарители с резистивным или электронно–лучевым нагревом, а при втором – системы диодного или магнетронного распыления.



Рис. 7.1. Основные технологические способы испарения материалов в вакууме
7.1. Термическое испарение материалов в вакууме

Метод получения пленок путем испарения вещества в вакууме и последующей его конденсации на подложке, который иногда называют методом термовакуумного испарения, является одним из универсальных методов по-лучения тонких пленок. Он пригоден для получения проводниковых, резистивных, диэлектрических и полупроводниковых пленок. Процесс происходит в условиях глубокого вакуума, чем обусловлена высокая чистота наносимых пленок. Возможность контроля и управления процессом напыления пленок в вакууме обеспечивает воспроизводимость структуры и свойств пленок, получаемых при испарении различных материалов.

Для получения пленок используется вакуумная камера, откачиваемая до давления $p_{\text{ост}}$. Частицы в виде атомов или молекул в вакуумной камере свободно распространяются от испарителя, образуя атомарный (молекулярный) поток пара. Достигая подложки, частицы конденсируются на ней. Свойства получаемой пленки зависят, в том числе, и от температуры подложки. Обычно подложка подогревается с помощью специального нагревателя. Для перекрытия потока пара, поступающего на подложку, служит заслонка. Чтобы исключить запыление стенок камеры, используется ограничивающая труба. Параметрами процесса являются температура испарителя и определяемая ею плотность потока пара, скорость напыления, зависящая как от температуры испарителя, так и от взаимного расположения испарителя и подложки, температура подложки, давление остаточных газов в камере. Распределение испаряемых частиц по скорости и по энергии описывается функцией Максвелла–Больцмана. При этом средняя скорость частиц равна:

$$V_{\text{cp}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (7.1)$$

а средняя кинетическая энергия частиц:

$$E_{\text{к.ср}} = \frac{3}{2}kT, \quad (7.2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура вещества в испарителе, m – масса частицы.

Вакуумные условия в рабочей камере должны обеспечивать формирование чистых пленок испаряемого вещества. Для этого достаточно, в первом приближении, чтобы в пролетном пространстве испаритель–подложка отсутствовало столкновение атомов (молекул) вещества с молекулами остаточного газа. Средняя длина свободного пробега частиц зависит от давления следующим образом:

$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{kT}{p_{\text{r}} p d_{\text{ч}}^2 \sqrt{2}}, \quad (7.3)$$

где p_{r} – давление газа, $d_{\text{ч}}$ – эффективный диаметр частиц, примерно равный сумме радиусов двух сталкивающихся частиц, T – температура газа, равная температуре стенок камеры.

Вероятность для молекулы вещества преодолеть расстояние r_0 от испарителя до подложки без столкновения с молекулами остаточного газа:

$$P = \exp\left(-\frac{r_0}{\lambda_{\text{cp}}}\right). \quad (7.4)$$

Реальный размер r_0 в установках вакуумного напыления не превышает 30 см. Исходя из требования отсутствия столкновений в пролетном пространстве, что соответствует величине $P \geq 0,95$, достаточно, чтобы давление в камере было $p_r \approx 10^{-3}$ Па.

Следует учесть также постоянную бомбардировку подложки и растущей пленки молекулами остаточных газов. Остаточные газы вступают в химическое взаимодействие с атомами напыляемого вещества или адсорбируются, ухудшая адгезию и образуя дефекты в пленке.

Для подавления отрицательного действия остаточных газов следует уменьшать давление в камере и увеличивать скорость напыления. Важными при выборе степени разряжения в рабочей камере являются экономические соображения. Для производственных условий приемлемым является вакуум $1,3 \cdot 10^{-4} \dots 7,0 \cdot 10^{-5}$ Па, который достигается относительно простыми откачными средствами; время откачки составляет 1...1,5 часа. Переход к более высокому вакууму требует значительного увеличения длительности откачки или использования более производительных, но и значительно более дорогих средств откачки.

Кроме остаточной атмосферы загрязнения возможны за счет молекул летучих соединений, имеющих в вакуумной камере. Молекулы других соединений выделяются при прогреве деталей внутрикамерного устройства, при прогреве испаряемого материала; летучие углеводороды поступают из масел вакуумных насосов. Для уменьшения их влияния используется прогрев и обезгаживание внутрикамерного устройства и испарителей, предварительное испарение вещества на заслонку; насосы и камера снабжаются ловушками паров масел, поглотителями активных газов.

Стабилизация вакуумных условий и технологический режим испарения материалов являются необходимыми факторами достижения воспроизводимых структур и свойств напыляемых пленок.

Метод термического испарения давно и успешно используется в различных областях техники, в том числе для создания дискретных полупроводниковых приборов, радиоэлектронных элементов и компонентов интегральных микросхем с хорошо воспроизводимыми электрическими параметрами.

Достоинствами данного метода являются: возможность получения пленочных структур на подложках и ранее сформированных функциональных слоях, изготовленных из различных металлов, диэлектриков и полупроводников, хорошая адгезия напыляемых пленок, разнообразие методов контроля толщины и скорости напыления пленок, наличие соответствующей контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры, малый уровень загрязнений при проведении технологического процесса, возможность варьирования в широких пределах режимами нанесения пленок.

Более высоким температурам подложки и меньшим температурам плавления распыляемых материалов со-ответствует большее значение величины критического радиуса и при прочих равных условиях, более высокое значение критической скорости нанесения. А это значит, что пленки тугоплавких металлов, характеризующихся малыми значениями

критического радиуса зародыша, образуют «электрически сплошную» проводящую структуру в более тонких слоях, поскольку характерная для них высокая плотность зародышей на поверхности подложки при равном количестве конденсированного вещества создает необходимые условия для туннельной и термоэмиссионной проводимости.

Процессы старения тонких пленок в основном сводятся к фазовым физико-химическим и полиморфным превращениям, в результате чего может меняться тип кристаллической решетки пленки, агрегатное состояние неравновесных и метастабильных фаз, приводящее к внутрифазовым макро- и субструктурным изменениям, сопровождающихся изменениями дискретности структуры, взаимной ориентации микрокристаллов, перераспределением точечных, линейных, поверхностных и объемных дефектов структуры. Все эти процессы приводят к изменению физико-химических свойств тонкопленочных структур в направлении сближения их со свойствами массивных образцов и стабилизации свойств.

Следовательно, к основным технологическим параметрам, определяющим структуру и свойства тонкопленочных слоев, получаемых термическим испарением в вакууме, можно отнести:

а) материал подложки и состояние ее поверхности, определяемое характером микронеровностей и видом адсорбированных остаточных газов.

б) физико-химические свойства испаряемого вещества.

в) толщину напыляемой пленки.

г) соотношение между температурой плавления испаряемого материала и температурой подложки при нанесении пленки.

д) скорость нанесения пленки.

е) давление и состав остаточных газов в процессе нанесения и термостабилизации пленки.

ж) режимы термостабилизации пленочных структур.

Термическое напыление пленок производится в установке (рис. 7.1).

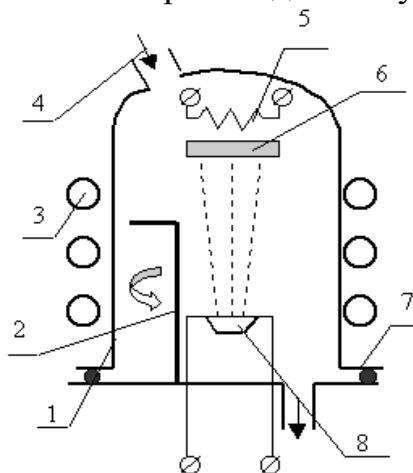


Рис. 7.1. Схема установки для термического напыления пленок

1 – вакуумный колпак из нержавеющей стали; 2 – заслонка; 3 – трубопровод для водяного нагрева или охлаждения колпака; 4 – игольчатый натекаТЕЛЬ для подачи атмосферного воздуха в камеру; 5 – нагреватель подложки; 6 – подложкодержатель; 7 – герметизирующая прокладка из

вакуумной резины; 8 – испаритель с размещённым в нём веществом и нагревателем (резистивным или электронно–лучевым).

Процесс проведения операции термического напыления пленок включает в себя выполнение следующих действий. При поднятом колпаке с подложкодержателя снимают обработанные подложки и устанавливают новые. Колпак опускают и включают систему вакуумных насосов (вначале насос для предварительного разрежения, затем высоковакуумный). Для ускорения десорбции воздуха с внутренних поверхностей и сокращения времени откачки в трубопровод подают горячую проточную воду. По достижении давления внутри камеры порядка 10^{-4} Па (контроль по манометру) включают нагреватели испарителя и подложек. По достижении рабочих температур (контроль с помощью термопар) заслонку отводят в сторону и пары испаряемого вещества достигают подложки, где происходит их конденсация и рост плёнки. Система автоматического контроля за ростом плёнки фиксирует либо толщину плёнки (для диэлектриков плёночных конденсаторов), либо поверхностное сопротивление (для резисторов), либо время напыления (проводники и контакты, защитные покрытия). Вырабатываемый при этом сигнал об окончании напыления после усиления воздействует на соленоид заслонки, перекрывая ею поток испаряемых атомов. Далее отключают нагреватели испарителя и подложек, выключают систему откачки, а в трубопровод подают холодную проточную воду. После остывания подколпачных устройств через натекагель плавно впускают атмосферный воздух. Выравнивание давлений внутри и атмосферного даёт возможность поднять его и начать следующий цикл обработки.

Степень вакуума под колпаком определяет длину свободного пробега испаряемых частиц материала λ . Если расстояние между испарением и подложкой обозначить через h , то прямолинейное движение испаряемых частиц можно обеспечить лишь при λ больше h . Поскольку обычно в вакуумных установках расстояние между испарителем и подложкой составляет 150...200 мм, то из условия λ больше или равно h необходимая степень вакуума составляет $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па (до $6,7 \cdot 10^{-5}$ Па).

Учитывая возможность десорбции молекул газа из элементов конструкции установки при нагреве, обычно напыление большинства материалов проводят при вакууме не ниже $2,7 \cdot 10^{-3}$ Па.

При термическом вакуумном напылении пленок испаряемые материалы нагреваются за счёт прямого или косвенного нагрева. Нагрев испаряемого вещества может быть резистивным, индукционным, электронно–лучевым, электрон-ной бомбардировкой.

Испарители с резистивным нагревом более просты, в них легко осуществляется контроль температуры за счёт тока и потребляемой мощности.

Преимущество индукционного нагрева заключается в возможности установки нагревателя вне вакуумной системы.

Электронный нагрев обеспечивает концентрацию большей мощности, но испарители с электронным нагревом, как правило, характеризуются более низким КПД и высокой стоимостью.

Для испарения тугоплавких материалов применяются в основном испарители с электронным нагревом, которые подразделяются на испарители с горячим катодом и анодной мишенью и испарители с "электронной пушкой".

Нанесение плёнок титана производится с помощью "электронной пушки" на подложку, нагретую до температуры 250...300 °С при вакууме не хуже $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па. Электронно-лучевое испарение титана в высоком вакууме позволяет приблизительно на порядок повысить скорость напыления плёнки по сравнению с катодным распылением.

Термическое испарение вещества в вакууме имеет ряд недостатков и ограничений, главные из которых следующие:

а) напыление плёнок из тугоплавких материалов (W, Mo, SiO₂, Al₂O₃ и др.) требует высоких температур на испарителе, при которых неизбежно «загрязнение» потока материалом испарителя.

б) при испарении сплавов различие в скорости испарения отдельных компонентов приводит к изменению состава плёнки по сравнению с исходным составом материала, помещённого в испаритель.

в) инерционность процесса, требующая введения в рабочую камеру заслонки с электромагнитным приводом.

г) неравномерность толщины плёнки, вынуждающая применять устройства перемещения подложек и корректирующие диафрагмы.

Первые три недостатка обусловлены необходимостью высокотемпературного нагрева вещества, а последний – высоким вакуумом в рабочей камере.

7.2. Краткая характеристика испарителей

Качество пленок, получаемых путем термического испарения в вакууме, в значительной мере зависит от типа и конструкции испарителей. Применяемые для этой цели испарители сильно различаются. Их конструкции определяются свойствами испаряемых материалов, требуемой скоростью испарения, количеством испаряемого вещества за один цикл загрузки, исходной формой вещества (гранулы, порошок, проволока), а также рядом других факторов. Требования к однородности свойств пленок, а также обеспечение производительности и экономичности использования технологического оборудования накладывают жесткие условия на характеристики испарителей. Часто бывает необходимо, чтобы испаритель обеспечивал постоянную скорость осаждения пленки независимо от количества оставшегося в испарителе вещества. Выполнение этого условия исключает влияние изменения скорости напыления в течении каждого отдельного процесса на структуру пленки. При этом также легко получать заданную толщину пленки, прекращая испарение при достижении определенного сопротивления слоя или регулируя продолжительность испарения после того, как установлена постоянная скорость напыления. Во многих случаях от испарителя требуется, чтобы он обеспечивал такое распределение молекулярного потока, при котором достигается максимальная равномерность толщины покрытия на большой площади.

Важным требованием является то, чтобы при работе испарителя не образовывались посторонние легко летучие вещества, способные загрязнить наносимые пленки. Кроме того, испаритель должен обладать достаточной долговечностью, характеризующейся временем, в течение которого он в состоянии обеспечить в заданных пределах режимы испарения.

К материалам, используемым для испарителей подо-гревателя предъявляются следующие требования:

- давление пара материала испарителя при температуре испарения напыляемого вещества должно быть пренебрежимо малым;
- материал испарителя должен хорошо смачиваться расплавленным испаряемым материалом, что необходимо для обеспечения хорошего теплового контакта между ними;
- между материалами испарителя и испаряемым веществом не должно происходить химических реакций, а также не должны образовываться легколетучие соединения этих веществ, так как в противном случае происходит загрязнение наносимых пленок и разрушение испарителей.

Одним из важных факторов, характеризующих процесс нанесения тонких пленок в вакууме, является способ, при котором осаждаемый материал нагревается до температуры испарения или возгонки.

В зависимости от способа нагрева, испарители можно подразделить на резистивные, индукционные и электронные. В резистивных испарителях тепловая энергия для нагрева испаряемого вещества получается за счет выделения джоулева тепла при прохождении тока через нагреватель (резистивный нагрев). Большим преимуществом резистивного нагрева является простота устройств электропитания, а также удобство контроля и регулирования режимов работы испарителя. В индукционных испарителях металл, подлежащий испарению, окружается индуктором, представляющим собой один или несколько медных водоохлаждаемых витков, по которым проходит ток высокой частоты. Созданное этим током переменное магнитное поле вызывает в металле вихревые токи, которые и нагревают его до температуры испарения. При использовании этого метода нагрева в рабочей камере отсутствуют разогретые элементы, такие как нагреватели при резистивном или катод при электронно–лучевом методе нагрева. В процессе испарения металла за счет сил электродинамического воздействия происходит непрерывное перемешивание расплава, что способствует его эффективному обезгаживанию.

При помощи индукционного нагрева возможно осуществить бестигельное испарение металла из капли, находящейся во взвешенном состоянии в электромагнитном поле индуктора. При этом целиком отпадают проблемы, связанные с взаимодействием между испаряемым веществом и испарителем.

К недостаткам индукционного метода нагрева следует отнести относительно высокую стоимость оборудования и низкий электрический К.П.Д, из–за необходимости применения преобразователей частоты, невозможность непосредственного испарения диэлектриков и невозможность в практических условиях изменять частоту генератора и коэффициент

трансформации выходного трансформатора, что приводит к необходимости использования различных индукторов для испарения различных материалов.

Широкое применение для нагрева испаряемых материалов нашел метод электронной бомбардировки. Метод нагрева электронной бомбардировкой имеет ряд преимуществ перед остальными. Так, с помощью электронных пучков можно получить поток энергии с большой концентрацией мощности на сравнительно небольшой поверхности испарителя (до $5,0 \cdot 10^8$ Вт/см²). Точная фокусировка электронного пучка позволяет получить очень высокую температуру, что в свою очередь позволяет испарять даже самые тугоплавкие металлы.

Метод позволяет получить большую чистоту и однородность состава напыляемой пленки, легко регулировать и контролировать как мощность нагрева, так и скорость напыления. Ионизация пара испаряемого вещества позволяет контролировать скорость испарения путем измерения ионного тока в цепи коллектора.

К недостаткам метода следует отнести необходимость высокого напряжения (порядка 10 кВ). Особые требования предъявляются к конструкции и материалу катода. Катод должен обеспечивать высокую плотность эмиссии электронов и сохранять стабильность при работе в относительно плохом вакууме (до $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па), а также должен быть стоек к бомбардировке положительными ионами. Для увеличения срока службы катода, его удаляют на значительное расстояние от зоны плавки, а электронный луч отклоняется на большой угол и пропускается через систему диафрагм.

По конструктивным признакам все испарители подразделяются на следующие основные типы: проволочные, ленточные и тигельные (автотигельные). Проволочные испарители, основное преимущество которых заключается в простоте их устройства, изготавливаются из тугоплавких металлов в виде цилиндрической спирали, конической спирали, спирали V-образной, волнообразной формы и др. Применяемая проволока (диаметром от 0,5 до 1,5 мм) должна иметь по всей длине одинаковое сечение. В противном случае из-за местных перегревов будет нарушаться равномерность нагрева и проволока быстро перегорит.

Для качественного испарения металла с нити необходимо выполнение следующих условий:

- металл должен смачивать нить;
- металл должен иметь достаточное для испарения давление паров при температуре, меньшей температуры плавления нити;
- металл не должен взаимодействовать с нитью и образовывать с ней соединения.

Хорошая смачиваемость приводит к взаимодействию испаряемого материала с материалом испарителя, что приводит к разрушению испарителей. Этим объясняется относительно низкая долговечность проволочных испарителей. Большим недостатком испарителей являются трудности испарения порошкообразных диэлектрических материалов. На рис.7.2. схематически показаны наиболее распространенные конструкции проволочных испарителей. Для испарения небольших количеств металлов применяются U

– образные, V – образные, W – образные, волнообразные и спиральные испарители. Эти виды испарителей хорошо противостоят вибрации, обеспечивают достаточно однородное испарение, и при их использовании легко осуществляется компенсация тепловых деформаций. Испаряемый материал размещается на этих испарителях в виде проволочных навесок. U – образные (рис.7.2, а) и V – образные (рис.7.2,б) испарители часто называют точечными, т.к. они образуют точечную каплю. Однако наиболее интенсивное испарение здесь происходит не из капли, а с прилегающих к изгибу участков. Испаритель (рис. 7.2, в) используется для увеличения площади и интенсивности испарения, т.е. увеличения скорости испарения, что обеспечивает получение большей толщины пленки за заданный промежуток времени. Для увеличения длины испаряемого вещества в виде проволоки используют испарители типа (рис 7.2, г,д,е). Эти испарители (рис 7.2, г,д,е) используются, также как и испарители (рис 7.2, б,в), но только для материалов слабо смачивающих материал испарителя. Проволока, навитая на нагреватель в виде спирали, увеличивает площадь соприкосновения с нагревателем, и тем самым обеспечивается увеличение плотности потока атомов испаряемого материала. Испаритель типа (рис 7.2, ж) используют для распыления материалов, испаряющихся сублимацией, например Mo , при этом испарение идет по всей длине материала. Испаритель (рис. 7.3, з) используется для напыления двухкомпонентного материала (например $NiCr$, где 1 – стержень из тугоплавкого металла (W) и две спирали (2 – Ni , 3 – Cr). Но нагрев надо вести при большом токе, чтобы навеска распылялась быстро, т.к. температуры испарения Ni и Cr различны, а первым пылиться Cr , и только затем Ni , поэтому обеспечить стандартное соотношение $NiCr$ 80:20 по толщине напыляемой пленки затруднительно.

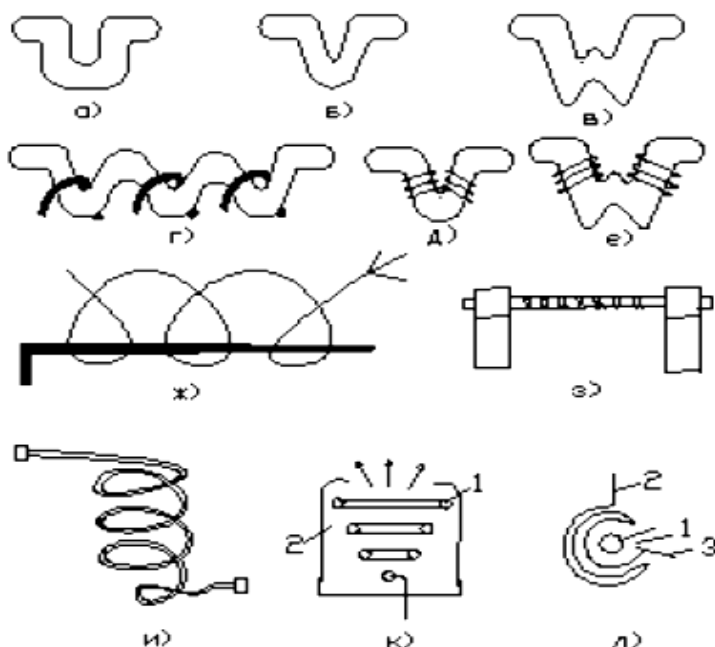


Рис. 7.2. Проволочные испарители.

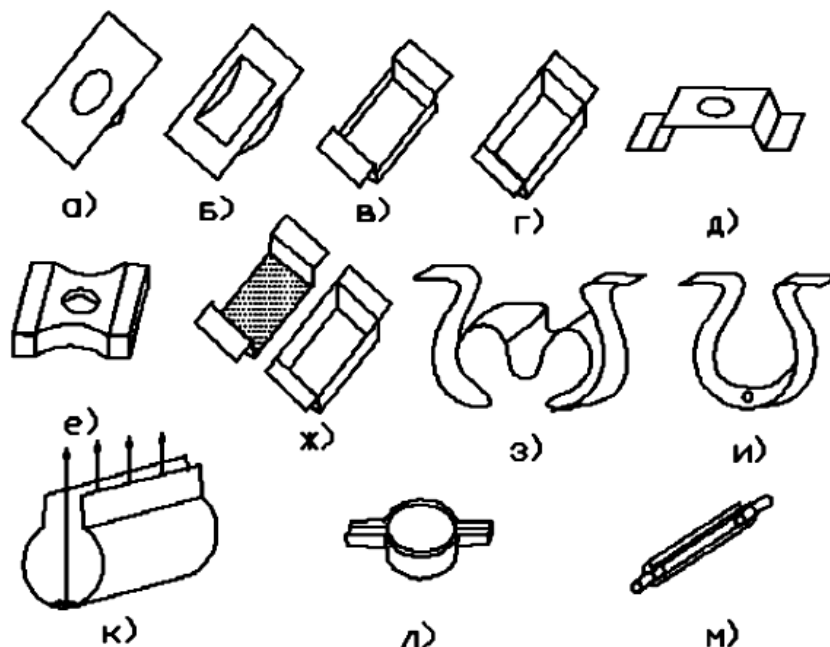


Рис. 7.3. Ленточные испарители.

Для направленного испарения основного материала вверх используются испарители, свитые в виде конической спирали (рис.7.2, и). С конической спирали можно испарять металлы, слабосмачивающие тугоплавкие нагреватели, например серебро и медь. Расстояние между витками должно быть небольшим, чтобы капли расплавленного металла хорошо удерживались на спирали.

Испарители (рис.7.2, к и л) окружены тепловыми экранами 2, которые уменьшают потери на излучение и одновременно создают направленность потока 3 испаряемого материала, находящегося внутри спирали 1 (рис. 7.2, к) или охватывающего нагреваемый стержень (рис. 7.2, л).

Все виды проволочных испарителей могут выполняться как одножильными, так и многожильными. При употреблении многожильных испарителей возможно осуществлять испарение достаточно большого количества вещества, добиться более равномерного распределения испаряемого материала на подложке, распылять металлы, плохо смачивающие нагреватель (например Al); увеличить скорость испарения, а также увеличить срок службы испарителя.

Ленточные испарители представляют собой нагреватели, изготовленные из тонких листов тугоплавких металлов и имеющие специальные углубления в виде желобков, лодочек или коробочек, в которых размещается испаряемый материал. Они применяются для испарения больших количеств вещества, для испарения металлов, плохо смачивающих нагреватель, а также для испарения порошковых материалов и неорганических соединений. Эти испарители, так же как и проволочные, потребляют достаточно большую мощность вследствие больших потерь на излучение. Ленточные испарители обеспечивают большую направленность испарения, при этом их предельно возможная область испарения ограничена телесным углом 2π стеррад. Они обычно изготавливаются из тугоплавких металлов (тантал, молибден, платина).

Наиболее надежными являются испарители открытого типа (рис. 7.3, а–г), представляющие собой ленты с углублениями в средней части для фиксации расплавленного материала. Ленточные испарители, как и все другие, деформируются при высоких температурах, что приводит к нарушению взаимного расположения испарителя и подложки. Термические деформации могут быть минимизированы либо приданием испарителям более сложной формы (рис.7.3, д), либо применением специальных пружин, компенсирующих термическое расширение испарителя. Для того чтобы обеспечить наиболее высокую температуру в средней части испарителя, ему придается форма с расширением по концам (рис.7.3, е). На рис. 7.3, ж показан испаритель с сетчатой крышкой, предназначенной для испарения порошкообразных материалов с вертикально и горизонтально направленным потоком пара. С помощью испарителя (рис 7.3, з) можно одновременно покрывать образцы пленками равной толщины из разных материалов, располагая их у торцов цилиндра нагревателя. Эта конструкция обеспечивает малое загрязнение пленки веществом нагревателя, поскольку покрываемые образцы обращены к торцевым срезам цилиндра нагревателя.

Испаритель значительной протяженности может быть изготовлен в виде цилиндра со щелью по образующей (рис.7.3,к). Внутри такого цилиндра создаются условия теплообмена, подобные таковым у черного тела. Поэтому в них даже вещества с малой теплопроводностью сравнительно быстро приобретают температуру испарителя. В данном испарителе поток атомов может быть сделан более направленным, если изогнуть цилиндр так, чтобы создать узкую глубокую щель. Такой испаритель ограничивает поток атомов в ненужных направлениях, что существенно, например при нанесении покрытий на вращающиеся цилиндры.

Испаритель лодочного типа (рис.7.3, л) предназначается для испарения диэлектриков и металлов в больших количествах. Он не пригоден для испарения хорошо смачивающих нагреватель металлов, которые, растекаясь по нему, значительно снижают его сопротивление, вследствие чего нагреватель может перегореть. Ленточный испаритель трубчатого типа (рис.7.3, м) предназначен для испарения веществ с малой теплопроводностью. Испарители этого типа могут иметь значительную протяженность.

Тигельные испарители могут применяться только для испарения материалов, не вступающих в реакцию с материалом тигля и не образующих с ними соединений. Они изготавливаются из тугоплавких металлов (W, Ta, Mo), из оксидов (Al_2O_3 , BeO, ZrO_2 , ThO_2 и др.) и графита. Для напыления материалов с низкой температурой испарения можно использовать тигли из стекла и кварца. При резистивном нагреве тиглей, изготавливаемых из оксидов металлов, до высоких температур проволочными нагревателями из тугоплавких металлов, между нагревателями и тиглем обычно имеют место химические реакции, которые и приводят к разрушению тигля. Экспериментально установлено, что наиболее надежными являются испарители, у которых испаряемый материал не соприкасается непосредственно с нагревательным элементом, а лишь получает от него тепло.

7.4. Индукционные испарители

На рис. 7.4 показана схема устройства для нанесения покрытия в вакууме, имеющее испарительные тигли с индукционным нагревом. Это устройство имеет два тигля с индукционным нагревом. Тигли достаточно близко расположены один от другого, причем между двумя отдельными катушками, окружающими тигли, существует индукционная связь. В устройство входит приспособление для индуцирования в электрической цепи питания каждой катушки напряжения одинакового по величине и противоположного по знаку напряжению индуцируемому в этой катушке рядом расположенной катушкой.

Известно, что испаряемые материалы могут вступить во взаимодействие с материалом испарителя. Это приводит к быстрому разрушению испарителя и загрязнению пленки материалом испарителя. Экспериментально установлено, что вольфрамовые проволочные спирали при испарении алюминия и никеля выходят из строя уже после одного двух циклов испарения. Что касается ленточных вольфрамовых испарителей, то их срок службы ограничивается в основном одним – тремя циклами испарения. При испарении смеси Rh с Gf ленточные испарители выходят из строя раньше окончания первого цикла напыления.

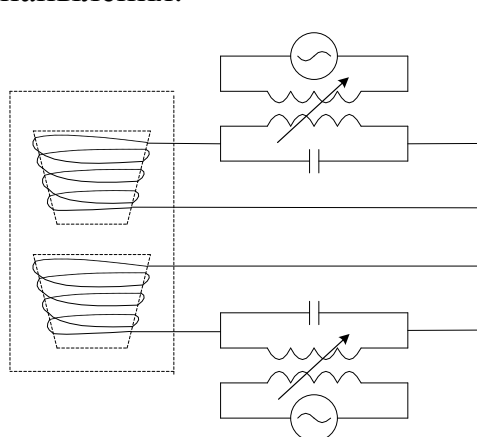


Рис 7.4. Схема устройства для нанесения покрытия в вакууме, имеющее испарительные тигли с индукционным нагревом.

Одним из способов устранения взаимодействия испаряемого материала с материалом испарителя является выбор определенных материалов для нагревателей в виде тиглей. Это достигается применением тигельных испарителей (тигли графитовые или из оксидов металлов). Рассмотрим в какой степени пригодны тигли для испарения различных материалов. Тигли из Al_2O_3 и BeO пригодны для испарения при температурах до 1600–1750 °С. Технология изготовления этих тиглей заключается в многократном нанесении на вольфрамовую спираль водной суспензии оксидов Al или Be с последующим отжигом каждого слоя. Процесс повторяется несколько раз до получения стенок тигля необходимой толщины. Тигли из Al_2O_3 успешно применяются для испарения металлов с низким давлением паров: Cu, Ge, Mn, Fe, Ni, Ag, Sn. Тигли из BeO используются для испарения Co, Fe, Si. Недостатком этих испарителей является то, что они сильно подвержены

образованию трещин при высокой температуре, вследствие чего вольфрамовый нагреватель становится доступным воздействию расплавленных материалов.

Тигли из оксида тория могут применяться для испарения металлов при температурах, достигающих 2200 °С. Но они как и предыдущие подвержены растрескиванию покрытия на вольфрамовой спирали. Тигли из оксида кремния самые неэффективные из класса тигельных испарителей, выполненных из оксидов металлов, так как верхний предел рабочих температур у них равен 1100 °С.

Наиболее предпочтительными тигельными испарителями являются графитовые тигли. Графитовые испарители могут применяться до температур порядка 2500 °С. К тому же графит достаточно технологичен и хорошо поддается механической обработке. Эти тигли менее подвержены испаряемым материалом и могут использоваться для испарения значительных количеств материалов. Однако необходимо учитывать, что ряд материалов, например Al, Si, Ti, при высоких температурах реагирует с углеродом с образованием карбидов и поэтому для их испарения не могут быть использованы графитовые тигли. Из графитовых испарителей эффективно испаряются Be, Ag, Sr. Недостатком графитовых тиглей являются также их способность легко поглощать газы, что усложняет их технологическое использование в вакууме. Многие оксиды активно восстанавливаются углеродом, что дает возможность очистки металлов путем применения графитовых тиглей. Нельзя допускать контакта между графитом и вольфрамом, если желателен большой срок службы нагревателя, так как уже при температуре 1500 °С образуется карбид W, снижающий проводимость нагревателя и делающий его более хрупким. Большим недостатком графита является его малая теплопроводность, в результате чего графитовые тигли не обеспечивают быстрый нагрев испаряемого вещества. Недостаточная пластичность графита не позволяет изготавливать из него нагреватели малого сечения, и поэтому потери тепла при теплопередаче обычно высоки.

Все вышеперечисленные недостатки рассмотренных тигельных испарителей приводят к выводу о необходимости дальнейшего поиска способов устранения взаимодействия испаряемого материала и материала нагревателя. Такими способами устранения взаимодействия испаряемого материала с испарителем являются способы, основанные на применении специальных испарителей, т.е. испарителей с покрытием, материал которого не взаимодействовал бы с испаряемым веществом. В качестве испарителей используются обычно вольфрамовые, танталовые или молибденовые ленты с углублениями или без них. Углубление в вольфрамовой ленте, в следствие их большой хрупкости, может быть получено фрезеровкой, в танталовой и молибденовой – штамповкой. В качестве материала покрытия используются карбиды и бориды тугоплавких металлов (Ti, Hf, Mo, Zr, V, Nb, Cr, W), образующиеся при высоких температурах.

Карбиды и бориды тугоплавких металлов являются металлоподобными фазами. Связь атомов металла с атомами углерода и атомами бора имеет металлический характер. Этим объясняется то, что карбиды и бориды имеют

примерно такое же электросопротивление, как и металлы, и для них, как и для металлов сохраняется постоянство отношения электропроводности к теплопроводности. Особенностью этих соединений является тугоплавкость, высокая твердость, способность некоторых из них переходить в состояние сверхпроводимости и др. Карбиды отличаются от боридов более высокой температурой плавления. Так например, карбид гафния имеет температуру плавления 3890°C , а борид гафния – 3250°C . Модули упругости этих соединений имеют высокое значение (21500 – 71000). Они хрупки и обладают пластичностью только при высоких температурах ($1400 - 1900^{\circ}\text{C}$). Бориды и карбиды обладают высокой химической стойкостью в различных агрессивных средах и хорошо сопротивляются окислению на воздухе при высоких температурах.

В настоящее время находят применение соединения боридов и карбидов нескольких металлов (Ni, Cr и др.). Такие многокомпонентные бориды и карбиды обладают повышенными прочностью, износостойкостью и акалиностойкостью по сравнению с однокомпонентными карбидами и боридами. Изделия из карбидов и боридов изготавливаются методом порошковой металлургии. Обычные методы механической обработки непригодны для изделий из карбидов и боридов. Для этой цели используется электроискровая и ультразвуковая обработка.

На рис. 7.5 показано устройство для нанесения алюминия на полупроводниковые пластины путем вакуумного напыления. В данном устройстве применяется испаритель, который имеет поверхностный слой из соединения нитридов и карбидов металлов: Ti, Zr, Hf, V, Ta и инертен к расплавленному алюминию. Поверхностный слой удерживает часть расплава металла в контакте с тиглем. Нагревание испарителя до температуры выше, чем температура расплава осуществляется пропусканием электрического тока последовательно через испаритель и алюминий в расплаве. Материал испарителя имеет более высокое удельное сопротивление по сравнению с алюминием. В устройстве предусмотрено возвратно-поступательное перемещение пластины относительно испарителя со скоростью регулируемой для получения однородного покрытия на пластине.

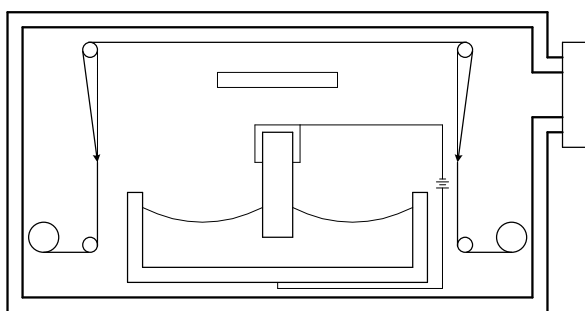


Рис. 7.5. Аппарат для нанесения алюминия на полупроводниковые пластины путем вакуумного напыления

Использование испарителей с покрытиями из карбидов и боридов показало, что они более долговечны, чем испарители без покрытий. Экспериментально установлено, что те же вольфрамовые испарители с

покрытиями из боридов и карбидов могут использоваться в течении четырех и более циклов испарения.

Достоинством таких испарителей является и то, что они более экономичны и технологичны по сравнению с графитовыми тиглями. В этом отношении испарители с покрытием из боридов и карбидов отличаются простотой изготовления и использования. Хорошая теплопроводность нагревателей из W, Mo и Ta позволяет осуществлять быстрый нагрев испарителей и испаряемого вещества до требуемой температуры. Так как испарители изготавливаются из тонкой ленты, они имеют малый объем. Вследствие этого потери тепла у них значительно меньше, чем у графитовых тиглей. Все достоинства испарителей с покрытиями из боридов и карбидов, приведенные выше, показывают перспективность их использования в различных отраслях современной техники, включая и технологию производства изделий интегральной электроники.

7.5. Электронно–лучевое испарение

Установка для электронно-лучевого испарения состоит из технологической камеры, системы откачки, тигля с испаряемым материалом, электронной пушки, заслонки для пара и подложки с приспособлениями для ее крепления и нагрева.

При облучении поверхности испаряемого материала электронным пучком существенная доля кинетической энергии электронов превращается в тепло, нагревая материал до температуры испарения. В потоке пара располагают подложку, на которой конденсируется испаряемый материал.

При нагреве электронным пучком температура поверхности выше, чем в объеме испаряемого материала, поэтому испарение материала проводят из водоохлаждаемых тиглей, обеспечивающих также испарение химически высокоактивных и тугоплавких материалов.

Электронно–лучевые испарители состоят из электронной пушки и тигля. Часто их дополняют устройством для подпитки расплава в тигле исходным материалом.

Катод располагается вблизи испаряемого материала или тигля. Под действием ускоряющего напряжения между катодом и тиглем пучок электронов устремляется на испаряемый материал. Управляющий электрод находится под потенциалом катода и служит для фокусировки электронного пучка. Если катод кольцевой, то управляющему катоду придают форму кольца концентрически охватывающего тигель.

Анод, размещается между тиглем и управляющим электродом с катодом и формирует электронный пучок, который направляют на испаряемый материал перпендикулярно или под углом к поверхности.

Для испарения нескольких материалов при одном электронном пучке используют многотигельные устройства, в которых отдельные тигли поочередно устанавливают в рабочую позицию, перемещая их по прямой или окружности.

Для исключения загрязнений расплава материалом тигля используют

бестигельное распыление. В простейшем случае материал испаряется из жидкой лунки на поверхности массивного слитка.

7.6. Метод ионного распыления

Метод ионного распыления является, так же как и метод термического испарения, универсальным методом для получения тонких пленок различных материалов. Ионное распыление вещества происходит при бомбардировке его поверхности ионами инертного газа, распыленные частицы оседают на подложке, образуя пленку. Бомбардировке (облучению) ионами подвергается мишень, изготовленная из распыляемого вещества.

Широкому применению данного метода в микроэлектронике способствовал ряд преимуществ его по сравнению с методом термического испарения, а именно:

- а) возможность получения пленок тугоплавких металлов;
- б) отсутствие фракционирования при распылении многокомпонентных материалов и возможность получать пленки сплавов, смесей и соединений с сохранением стехиометрического состава;
- в) большая емкость источника и возможность напыления в установках непрерывного действия;
- г) равномерность пленки по толщине.

Ионное распыление является практически безинерционным процессом и прекращается при отключении напряжения питания. Процесс нанесения пленок методом ионного распыления легко контролируется и управляется, что способствует его автоматизации.

Определенные недостатки метода – малая скорость напыления и повышенная загрязненность пленок преодолеваются в специальных распылительных системах.

Процесс ионного распыления происходит в глубоком вакууме при отсутствии электрических и магнитных полей в области между мишенью и подложкой; возможно облучение мишени под малыми углами к ее поверхности. При этом достигается высокая чистота пленок и необходимая скорость напыления. Однако для получения очень тонких пленок ионное распыление почти не используется из-за сложности оборудования. На практике для получения тонких пленок находят применение различные распылительные системы, в которых источником ионов является плазма газового разряда. В связи с этим метод часто называют ионно-плазменным распылением.

Взаимодействие бомбардирующего иона с твердым телом (мишенью) наиболее убедительно описывается моделью атомных столкновений по типу упругих соударений бильярдных шаров. Основные положения такой теории распыления хорошо согласуются с опытом.

Ион, обладающий определенной кинетической энергией, сталкиваясь с атомом кристаллической решетки твердого тела, передает ему импульс энергии. При энергиях, превышающих энергию связи атомов, происходит смещение атома из узла кристаллической решетки, при столкновении с соседним атомом он передает тому свой импульс и т. д. В результате ряда

последовательных столкновений импульс передается поверхностному атому; если получаемая этим атомом энергия выше теплоты сублимации $E_{\text{суб}}$, то он имеет возможность быть выбитым в паровую фазу, т.е. происходит его отрыв от поверхности твердого тела. Рассмотренный упрощенный механизм относится к парному соударению ион–атом, на самом деле происходит более сложное взаимодействие ионов с кристаллической решеткой твердого тела.

Распыление происходит, если энергия иона превышает некоторую пороговую энергию, равную:

$$E_{\text{пор}} = \frac{1 + (M_2 / M_1)^2}{M_2 / M_1} E_{\text{суб}}, \quad (7.5)$$

где M_1 – масса бомбардирующего иона; M_2 – масса атома мишени.

Величина пороговой энергии при распылении ионами аргона различается для металлов в несколько раз: для алюминия $E_{\text{пор}} = 13$ эВ, для меди 12...17 эВ, для вольфрама 35 эВ, для золота 20 эВ, для тантала 25 эВ.

Количественной мерой процесса распыления является коэффициент распыления S , представляющий собой среднестатистическое число атомов, выбитых с поверхности мишени одним ионом. Коэффициент распыления зависит от энергии иона, его массы, угла падения, материала, температуры и состояния поверхности мишени.

Типичная зависимость коэффициента распыления от энергии иона показана на рисунке 4.3. Можно выделить четыре области на графике: I – распыление практически отсутствует, что соответствует энергии ниже пороговой; II – происходит слабое распыление, область пригодна для режима очистки поверхностей от адсорбированных молекул различных газов; III – коэффициент распыления достаточен для использования в режиме получения тонких пленок; IV – коэффициент распыления, достигнув максимума, уменьшается вследствие внедрения ионов в мишень, данная область может быть использована для ионной имплантации.

Экспериментально установлено, что коэффициенты распыления материалов изменяются значительно сильнее в зависимости от природы ионов, чем от природы атомов мишени. В технологии полупроводниковых приборов в качестве рабочего газа распылительных камер используется почти исключительно аргон как наиболее доступный инертный газ, атомная масса Ar достаточно велика ($M_1 = 40$).

Коэффициент распыления имеет периодическую зависимость от атомного номера элемента мишени, которая объясняется периодичностью изменения энергии связи атомов. В целом, однако, величина S мало отличается для различных материалов, изменение имеет место в пределах одного порядка. Для сравнения, скорость термического испарения может отличаться на несколько порядков.

Коэффициент распыления может быть представлен в виде следующей зависимости:

$$S = K \frac{M_1 M_2}{\lambda(E)(M_1 + M_2)} E \cdot f(\alpha), \quad (7.6)$$

где K – коэффициент, учитывающий физическое состояние мишени, $\lambda(E)$ – длина свободного пробега иона в материале мишени как функция энергии E , $f(\alpha)$ – функция угла падения иона.

Процесс распыления идет путем последовательного удаления (травления) поверхностных слоев мишени. Поскольку диффузией атомов из глубины мишени можно пренебречь, распыление многокомпонентных материалов будет происходить без фракционирования составляющих, несмотря на некоторые различия в коэффициенте распыления различных компонентов.

Измерения показывают, что обычно более 95% энергии ионов выделяется в мишени в виде тепла, поэтому распыление является с энергетической точки зрения весьма неэффективным процессом. Тем не менее, энергия распыленных атомов существенно выше, чем энергия испаренных частиц, что определяет особые условия образования пленки.

Повышенная энергия осаждаемых частиц и облучение подложки электронами приводит к увеличению скорости зародышеобразования пленки. Увеличивается адгезия пленки и ее плотность, но одновременно возрастают и остаточные напряжения. В пленке возможны радиационные повреждения, подложка дополнительно нагревается бомбардирующими частицами. Из-за того, что процесс ведется в вакууме порядка 10^{-3} Па, происходит загрязнение пленки остаточными газами, а также продуктами распыления стенок камеры; атомы аргона внедряются в пленку, повышая ее дефектность. Применение обычных для термовакuumного напыления методов контроля толщины пленки с помощью свидетелей и кварцевого датчика для ионного распыления, в среде высокопроводящей плазмы исключено. Зато при стабилизированном процессе распыления толщина пленки может контролироваться простейшим способом – по времени напыления.

7.7. Катодное распыление

Катодное распыление – ещё один универсальный метод получения тонкоплёночных структур различного назначения. В отличие от метода термического испарения при катодном распылении перенос материала, осуществляется за счёт энергии положительных ионов, образующихся в тлеющем разряде и бомбардирующих катод из распыляемого материала.

Этот метод позволяет получать плёнки тугоплавких металлов, осуществлять перенос сложных по составу сплавов и смесей без нарушения процентного соотношения входящих в них компонентов.

При использовании метода катодного распыления относительно просто решается вопрос источников наносимого материала в высокопроизводительном оборудовании.

Для уменьшения степени загрязнения плёнки при катодном распылении применяются откачные системы, позволяющие в режиме подготовки

получать высокий вакуум (порядка $1,3 \cdot 10^{-3} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.), и рабочие газы с малым содержанием активных примесей.

При катодном распылении состав материала плёнки почти совсем не отличается от состава мишени, если же в камеру подать реактивный газ, то становится возможным напыление соединений. Такое распыление называется реактивным и используется для осаждения различных плёнок, главным образом оксидных и нитридных.

На рисунке 7.6 представлена схема рабочей камеры установки катодного распыления.

Из рисунка 7.6 видно, что питание осуществляется постоянным напряжением, и что нижний электрод с подложками заземлён и находится под более высоким потенциалом, чем катод–мишень. Переменный резистор служит для регулирования величины тока разряда.

При ионно–плазменном распылении в трёхэлектродных системах катодного распыления бомбардировку мишени осуществляют ионами плазмы газового разряда низкого давления. Дуговой газовый разряд зажигается между раскалённым катодом, являющимся источником электронов и анодом при напряжении 150...260 В. Разрядный ток в этом случае достигает нескольких ампер.

Электроны, излучаемые катодом, ионизируют молекулы инертного газа. При подаче отрицательного потенциала от 200 до 1000 В на мишень ионы будут бомбардировать её поверхность, материал мишени будет распыляться и конденсироваться на подложке.

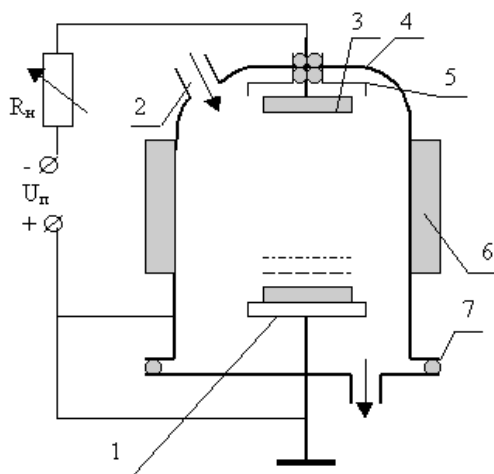


Рис. 7.6. Схема рабочей камеры установки катодного распыления

1 – анод с размещенными на нём подложками; 2 – игольчатый натекаТЕЛЬ, обеспечивающий непрерывную подачу аргона; 3 – катод–мишень из материала, подлежащего распылению и осаждению; 4 – вакуумный колпак из нержавеющей стали; 5 – экран, охватывающий катод с небольшим зазором и предотвращающий паразитные разряды на стенки камеры; 6 – постоянный электромагнит, удерживающий электроны в пределах разрядного столба; 7 – герметизирующая прокладка.

Концентрацией ионов в плазме можно управлять, меняя либо ток электронной эмиссии, либо ускоряя электроны напряжением.

При ионно–плазменном распылении в разрядном промежутке наводится магнитное поле. Под его воздействием электроны движутся вдоль силовых линий; при этом увеличивается вероятность ионизации молекул рабочего газа, возрастает ионный ток и увеличивается скорость распыления.

К ограничениям и недостаткам процесса катодного распыления относятся:

а) возможность распыления только проводящих материалов, способных эмитировать электроны, ионизирующие молекулы аргона и поддерживающие горение разряда.

б) малая скорость роста плёнки (единицы нм/с) из–за значительного рассеивания распыляемых атомов материала в объёме рабочей камеры.

Первый недостаток, имеющий характер ограничения, преодолевается в процессах высокочастотного распыления. При замене постоянного напряжения на переменное диэлектрическая мишень становится конденсатором и подвергается бомбардировке ионами в отрицательный полупериод питающего напряжения. Иначе говоря, распыление мишени происходит не непрерывно, как при катодном распылении, а дискретно с частотой питающего напряжения (обычно 13,56 МГц).

Второй недостаток, обусловленный тем, что при высокой частоте и заданным ею расстоянием от мишени до подложек электроны, находящиеся в срединной части высокочастотного разряда, не успевают достигать электродов за время полупериода, они остаются в разряде, совершая колебательные движения и интенсивно ионизируя рабочий газ. Это обстоятельство позволяет снизить давление рабочего газа без снижения разрядного тока, т.к. степень ионизации заметно повышается.

7.8. Магнетронное распыление

Магнетронное распыление, являясь разновидностью ионного распыления, занимает среди методов получения пленок особое место благодаря своим исключительным возможностям. Имея все достоинства ионного распыления, магнетронное распыление свободно от ряда недостатков ионного распыления. Прежде всего, существенно возрастает скорость нанесения пленок, которая приближается к значениям, характерным для термического испарения. Уменьшаются радиационные повреждения осаждаемых пленок, снижается перегрев подложек и уровень загрязнений. Магнетронная распылительная система является более эффективной по сравнению с другими системами ионного распыления.

Магнетронное распыление предложено сравнительно недавно, и хотя еще далеко не реализованы все его возможности, оно нашло широкое применение в технологии тонких пленок. В магнетронных распылительных системах возможно осуществлять распыление со смещением, реактивное и высокочастотное распыление. В микроэлектронном производстве с помощью магнетронного распыления получают пленки металлов и сплавов для проводников и контактных площадок ИМС, резистивные, диэлектрические и полупроводниковые пленки, магнитные и сверхпроводящие пленки.

Основными элементами магнетронных распылительных систем являются катод–мишень, анод и магнитная система; подложки располагаются вблизи мишени параллельно ей. Анод обычно заземлен или имеет небольшой положительный потенциал, на мишень от источника питания подается отрицательное напряжение. В пространстве анод – катод создаются неоднородные электрическое и магнитное поля. Лавинный пробой разрядного промежутка начинается ионизацией газа свободными электронами. Однако в скрещенных электрическом и магнитном полях электроны движутся по сложным циклоидальным траекториям неоднократно сталкиваясь с атомами газа; эффективность ионизации при этом велика. Тлеющий разряд возникает поэтому при меньшем напряжении анод – катод, чем в обычной диодной системе; по этой причине магнетронная система считается низковольтной системой.

Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны поддерживают и развивают разряд. Магнитным полем электроны как бы прижаты к мишени, а электрическое поле тянет их к аноду. При столкновении с атомами газа электроны ионизируют их, постепенно теряя энергию, полученную в электрическом поле, и только после этого попадают на анод. Таким образом, большая часть энергии электронов уходит на ионизацию, благодаря чему увеличивается плотность плазмы, возрастает ионный ток на мишени, увеличивается скорость распыления и, следовательно, скорость напыления.

Важно, что на подложку, как и на анод, попадают низкоэнергетические электроны, которые не могут вызвать значительного ее перегрева. Это позволяет увеличивать скорость напыления без опасности разрушения подложки или недопустимого перегрева пленки.

Воздействие магнитного поля эквивалентно увеличению давления. Следовательно, при наличии магнитного поля достаточной величины процесс распыления с высокой скоростью можно вести при пониженном давлении. Локализация плазмы у мишени позволяет использовать обычные для термического испарения методы контроля толщины и скорости напыления пленок с помощью свидетелей и кварцевого датчика.

Параметрами процесса магнетронного распыления являются: напряжение на мишени (и на аноде, если он не заземлен), ток разряда, плотность тока на мишени и удельная мощность, величина индукции магнитного поля, давление рабочего газа. Эти параметры определяют скорость нанесения пленок.

Обычно напряжение на мишени составляет 300...700 В, рабочее давление равно 0,13...0,66 Па, хотя возможно вести распыление в более широком диапазоне давлений, от 10^{-2} до 1 Па и выше; индукция магнитного поля у поверхности мишени 0,03...0,1 Т; плотность тока на мишени в устройствах с плоским катодом составляет в среднем 200 мА/см², удельная мощность – 100 Вт/см².

Магнетронное распыление по сравнению с другими методами нанесения пленок обладает рядом достоинств, основными из которых являются: высокая скорость роста пленок, их хорошая адгезия и незначительное

загрязнение посторонними газовыми включениями; низкая температура нагрева подложек; возможность распыления как проводников, так и диэлектриков и получение сверхтонких (менее 20 нм) пленок с меньшими радиационными дефектами; безинерционность процесса.

Магнетронное распыление применяют в технологиях жидкокристаллических индикаторов, прецизионных фотошаблонов (тонких пленок хрома) и микросхем (пленки из алюминия, его сплавов, тугоплавких материалов).

Магнетронная распылительная система приведена на рисунке 7.7, состоит из постоянного магнита 1, на котором расположена плоская мишень–катод 2, а над ней по периметру анод 3. Монтируется эта система под колпаком вакуумно–распылительной установки. Рабочим газом в ней служит аргон. При подаче питания от источника постоянного тока мишенью–катодом создается не однородное электрическое поле и аномальный тлеющий разряд, под действием которых происходит образование плазмы и ионная бомбардировка мишени–катода.

Замкнутое магнитное поле распылительной системы локализует плазму непосредственно у поверхности распыляемой мишени. Под действием ионной бомбардировки выбитые катодом–мишенью электроны захватываются и удерживаются магнитным полем, совершая сложные циклические движения у поверхности мишени до тех пор, пока не произойдет их столкновение с атомами аргона. В результате столкновения электроны теряют большую часть энергии на ионизацию рабочего газа, что увеличивает концентрацию положительных ионов у поверхности мишени–катода, усиливает ее ионную бомбардировку, скорости распыления материала и осаждения пленки

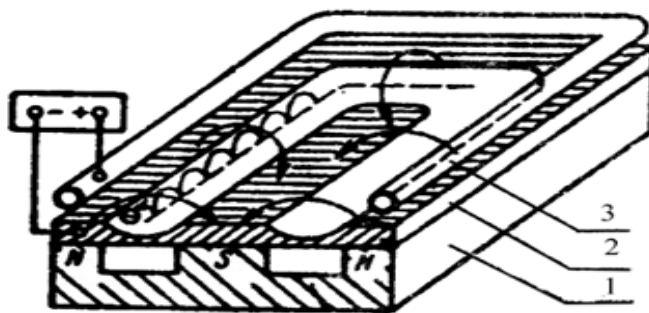


Рис. 7.7. Магнетронная распылительная система с плоской мишенью.
1 – постоянный магнит; 2 – мишень–катод; 3 – катод.

Стабильность и воспроизводимость наносимых на подложки пленок зависит от оптимальных параметров магнетронной распылительной системы, основными из которых являются: напряжение питания электродов; ток разряда; плотность тока мишени; удельная мощность; индукция магнитного поля; рабочее давление.

Напряжение питания, подаваемое на электроды, обычно не превышает 1000 вольт. На мишень, как правило, подают отрицательный потенциал, а на анод – нулевой или положительный, в зависимости от конструкции системы.

Ток разряда, зависящий от мощности источника, а также других параметров, подбирают экспериментально. Плотность тока на мишени колеблется от 40 до 200 А/см² и в центральной части зоны распыления может превышать эти значения. Удельная мощность лежит в интервале от 40 до 100 Вт/ см² и определяется условиями охлаждения и теплопроводностью распыляемого материала.

Важнейшим параметром магнетронных систем является вольтамперная характеристика разряда, зависящая от рабочего давления газа и индукции магнитного поля. С уменьшением давления в системе и индукции магнитного поля, вольтамперные характеристики разряда сдвигаются в область больших рабочих напряжений.

Планарные магнетронные системы позволяют достигать скоростей распыления до двух микрометров в минуту. Недостатком таких систем является то, что распылению подвергается узкая кольцевая область мишени, по этому коэффициент использования материала составляет около 26% от площади мишени.

7.9. Лазерно–плазменное распыление

Переход в микроэлектронике на размеры менее 1 мкм ведет к необходимости увеличения плотности размещения элементов, что в свою очередь требует уменьшения ширины токоведущих дорожек. Для субмикронных размеров возникла необходимость в замене алюминиевых сплавов альтернативными материалами с низким удельным сопротивлением. Использование медных токоведущих линий и контактных площадок обеспечивает увеличение сопротивления электромиграции и снижение электрического сопротивления дорожек. Вследствие высокой подвижности примесных атомов меди в металлах и полупроводниках, необходимо предотвращать их диффузию в окружающие материалы. Поэтому применение медной технологии в СБИС требует создания устойчивых диффузионных барьеров, которые должны полностью со всех сторон изолировать медный проводник и их толщина должна быть на порядок меньше минимального размера сечения проводника. Метод импульсного лазерного распыления позволяет решать задачи получения таких пленок.

По ряду характеристик метод импульсное лазерное распыление выгодно отличается от непрерывных методов. Наличие большой доли возбужденных атомов и ионов позволяет понизить температуру эпитаксиального роста, а высокая скорость образования зародышей позволяет напылять чрезвычайно тонкие сплошные пленки (менее 10 нм). Импульсное лазерное распыление обеспечивает получение пленок, соответствующих по составу многокомпонентной распыляемой мишени. Лазерное распыление – технологичный процесс, так как позволяет использовать мишени любого размера и формы.

При воздействии лазерного излучения на металлические мишени распыление происходит без образования жидкой фазы. Наиболее широкое применение в лазерном получении тонких пленок нашли твердотельные лазеры с модулированной добротностью и эксимерные лазеры. Применение

коротковолновых эксимерных лазеров позволяет получать тонкие слои материала, существенно снижая выброс капель при распылении мишени благодаря малой глубине проникновения лазерного излучения. Вторая особенность процесса лазерного распыления заключается в том, что возникшая в первый момент действия лазерного импульса плазма экранирует мишень, и основная доля лазерного излучения поглощается в плазме. Это приводит к тому, что, эрозионный факел значительно ионизован. Средняя толщина пленок, напыленных за один импульс, меньше атомарного слоя и легко может быть определена (в стандартных режимах напыления вырастает примерно 0.1 монослоя за импульс). Данный процесс позволяет легко контролировать толщину пленок по количеству лазерных импульсов. Все сказанное выше относится к чистым металлам.

Процесс формирования пленки определяется параметрами плазмы на подлете к подложке. Известно существенное влияние энергетического спектра ионов на осаждение тонких пленок физическими методами, в частности при лазерно–плазменном распылении. Качество полученных лазерным методом пленок сравнимо с качеством пленок, выращенных методом молекулярно–лучевой эпитаксии. К основным достоинствам лазерного распыления по сравнению с методом молекулярно–лучевой эпитаксии можно отнести снижение температуры эпитаксиального роста и точный контроль толщины напыляемой пленки.

Импульсное лазерное распыление позволяет создавать сверхтонкие пленки металлов, в которых наблюдаются классический и квантовый размерные эффекты. Исследован размерный эффект изменения статической проводимости в тонких пленках тантала и висмута. На фоне монотонного уменьшения удельного сопротивления пленки с увеличением ее толщины, вызванного классическим размерным эффектом, обнаружена осциллирующая зависимость сопротивления, которая определяется квантовым размерным эффектом в пленках тантала и висмута. Наблюдение квантового размерного эффекта в процессе роста пленок является доказательством высокого качества пленок (однородность толщины и структуры), полученных импульсным лазерным распылением.

7.10. Вакуумное оборудование для формирования пленок

7.10.1. Термическое испарение материала

Вакуумные установки УВН–2М2 (УРМ.3.279.017; УВН–75Р1)

Данные установки периодического действия имеют рабочую камеру, в которой проводятся все стадии технологического процесса.

Такие установки еще используются в промышленном производстве, так как они просты по конструкции, легко переналаживаются и довольно дешевы. Тонкие пленки, наносимые на таких установках, имеют необходимое качество и воспроизводимость технических параметров.

Производительность установки периодического действия невелика, так как перед каждой очередной загрузкой партии подложек в рабочую камеру

напускают атмосферный воздух.



Рис. 7.8. Внешний вид установки УВН–2М2



Рис. 7.9. Внешний вид подколпачного устройства установки УВН–2М2



Рис. 7.10. Внешний вид подколпачного устройства установки УРМ–3.279.017

На рисунке 7.11. представлена конструкция установки УВН–2М2

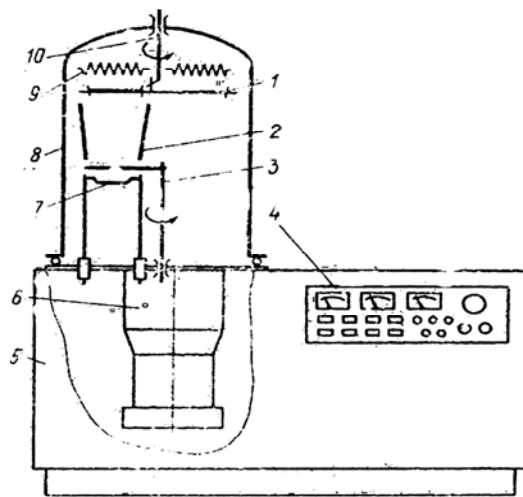


Рис.7.11. Вакуумная установка УВН-2М2:

1 – подложкодержатель, 2 – экран, 3 – заслонка, 4 – пульт управления, 5 – каркас, 6 – насос, 7 – испаритель, 8 – рабочая камера, 9 – нагреватель, 10 – ввод вращения; 11 – резиновая прокладка.

Рабочая камера (8) представляет собой колпак, который может быть поднят для смены подложек (пластин) испарителей (7) и осаждаемых материалов. Вакуумно-плотное соединение основания колпака с базовой плитой достигается с помощью резиновой прокладки (11). Сверху колпака размещен вакуумный ввод привода подложкодержателя (1). На базовой плите закреплены электромеханический привод, приводящий в движение заслонку (3), и электрические вводы подачи тока на испаритель (7). Нагреватель подложек (9) помещен над подложкодержателем.

Вакуумная система этой установки состоит из парамасляного насоса (6), азотной ловушки, механического насоса, вакуумного затвора, блока клапанов и вакуум-проводов. Заправка ловушки жидким азотом осуществляется из сосуда Дьюара с помощью автоматического питателя. Контроль вакуума осуществляется с помощью прибора ВИТ-2. Управление подачей тока на испарители и нагреватели осуществляется вручную с блока управления (4). Контроль толщины напыленной пленки осуществляется с помощью переносного прибора КИТ-1 при помощи кварцевого резонатора, помещенного внутри установки.

7.10.2.Формирование пленок электронно-лучевым методом

Установка 01НЭ-7-004 «Оратория-9»

Данная установка имеет большую цилиндрическую рабочую камеру. Внутри рабочей камеры расположены две электронно-лучевые пушки с магнитной отклоняющей системой, блок ИК-нагрева, роторно-планетарное подколпачное устройство, датчики контроля температуры и толщины напыленной пленки с помощью переносного прибора КИТ-2. Весь технологический цикл распыления материала и напыления пленки может производиться автоматически с заданием режимов по реле времени. Общее

управление осуществляется блоком УСУПМ–1. Внешний вид подколпачного устройства данной установки представлен на рисунке 7.12.

В состав вакуумной установки входят:

- 1) каркас, в котором размещается высоковакуумная система с рабочей камерой;
- 2) стойка питания и управления, служащая для автоматического управления вакуумной откачкой, устройством нагрева, вращением подложек и электронно–лучевыми пушками
- 3) две стойки управления, отдельно для каждой электронно–лучевой пушки.



Рис. 7.12. Внешний вид подколпачного устройства установки «Оратория–9»

Схема данной установки представлена на рисунке 7.13.

С наружной стороны рабочей камеры 8, смонтированной в каркасе 4 установки, приварены трубки, по которым подается холодная вода при ее работе или горячая при обезгаживании, а также напуске воздуха (для снижения конденсации паров воды из атмосферы на внутренних стенках камеры). В открывающейся на петлях дверце имеется смотровое окно. В верхней части камеры размещены кварцевый датчик 7 для измерения толщины наносимой пленки и карусель с тремя планетарными подложкодержателями 9, а в нижней – два электронно–лучевых испарителя 11 и две заслонки 10 с электромагнитными приводами, а также нагреватели и датчик контроля температуры подложек.

Для достижения высокого вакуума служит паромасляный насос 3, имеющий скорость откачки 9000 л/с, соединенный для создания предварительного вакуума с механическим (форвакуумным) насосом 1. Для уменьшения попадания масла в рабочую камеру на форвакуумном трубопроводе, а также на входном патрубке паромасляного насоса установлены соответственно азотные ловушки 2 и 5.

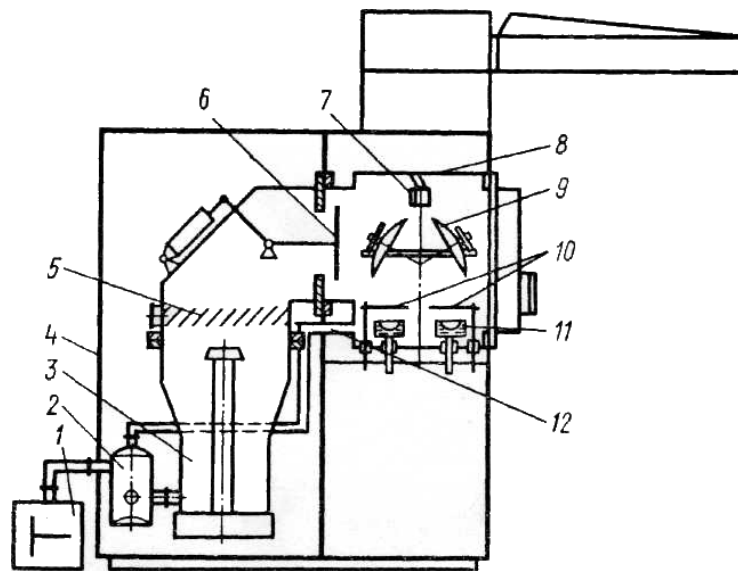


Рис. 7.13. Схема вакуумной установки 01НЭ-7-004 («Оратория-9»)

1,3 – механический (форвакуумный) и паромасляный насосы, 2,5 – азотные ловушки, 4 – каркас, 6 – высоковакуумный затвор, 7 – кварцевый датчик, 8 – рабочая камера, 9 – планетарный подложкодержатель, 10 – заслонка, 11 – электронно-лучевой испаритель, 12 – обводная магистраль.

При работе установки 01НЭ-7-004 в рабочую камеру (8) устанавливаются три подложкодержателя (9) с подложками и откачивают камеру до высокого вакуума, после чего включают вращение планетарного механизма с подложками, затем включается нагреватель подложек и оба шкафа питания испарителей. После нагрева до заданной температуры и выдержки подложек при этой температуре включается накал каждого испарителя и устанавливается ток эмиссии на заданное значение, достаточное для разогрева и обезгаживания испаряемых материалов. При обезгаживании луч сканирует по продольной оси тигля для разгонки шлаков в зоне испарения. В начале распыления материалов производится отпыл на заслонку, которая после разгонки шлаков открывается и распыляемый материал наносится на подложки. При распылении луч может быть сфокусирован в центр тигля или сканировать поверхность материала в тигле. После открытия заслонки запускается реле времени работы данного испарителя. После отключения обоих испарителей нагрев подложек отключается и реле времени начинает отсчитывать время остывания. По окончании остывания подложек подается сигнал «конец цикла» (в течение 10 секунд звучит звуковой сигнал). Установка может работать и в ручном режиме, при этом все команды согласно технологическому процессу выполняет оператор, он задает соответствующие токи, напряжения и длительности процесса, открывает и закрывает заслонки для обеспечения требуемой толщины формируемой пленки.

Электронно-лучевой испаритель представлен на рисунке 7.14.

Электронно-лучевой испаритель (рис. 7.14) состоит из трех основных частей: электронной пушки, фокусирующей и отклоняющей систем и водоохлаждаемого тигля.

Электронная пушка служит для формирования потока электронов и

состоит из вольфрамового катода 6 и фокусирующей системы 7. Электроны, излучаемые нагретым катодом, проходят через фокусирующую систему, ускоряются за счет разности потенциалов между катодом и анодом до 10 кВ и формируются в электронный луч 8.

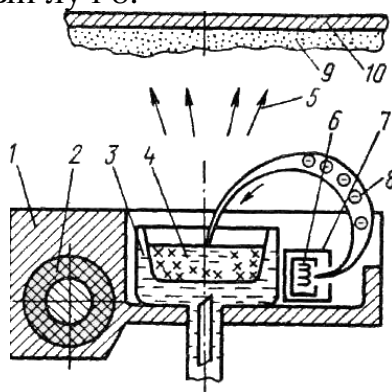


Рис. 7.15. Электронно–лучевой испаритель.

1 – полюсный наконечник, 2 – электромагнит, 3 – водоохлаждаемый тигель, 4 – испаряемый материал, 5 – поток наносимого материала, 6 – термокатод, 7 – система, фокусирующая электронный луч, 8 – траектория электронного луча, 9 – напыляемая пленка, 10 – подложка

Отклоняющая система формирует магнитное поле, перпендикулярное направлению движения электронов, выходящих из фокусирующей системы, и состоит из полюсных наконечников 1 и электромагнита 2. Между полюсными наконечниками расположены водоохлаждаемый тигель 3 и электронная пушка. Отклоняющая система направляет электронный луч в центральную часть водоохлаждаемого тигля 3. В месте попадания луча в испаряемом материале создается локальная зона испарения вещества из жидкой фазы. Нагретый электронной бомбардировкой материал 4 испаряется, и поток паров 5 осаждается в виде тонкой пленки 9 на подложке 10. Изменяя ток в катушке электромагнита 2, можно перемещать луч вдоль тигля, что обеспечивает лучшее образование зоны расплава и предотвращает образование "кратера" в испаряемом материале.

Медные водоохлаждаемые тигли емкостью 50 см³ и более обеспечивают длительную непрерывную работу без добавления испаряемого материала, который, кроме того, не контактирует в расплавленном виде с медными стенками тигля, а значит, и исключается их взаимодействие, загрязнение формируемой пленки материалом тигля.

Электронно–лучевые испарители могут быть одной многотигельной конструкции, с разворотом луча на 270 и 180°. При угле отклонения электронного луча до 270° исключается попадание испаряемого материала на катод и загрязнение наносимых пленок материалом катода, который во время работы также распыляется.

7.10.3. Установка УВНРЭ–Э60 (прототип УВН–Z400 фирмы Leybold Heraeus) имеет две электронно–лучевые пушки и два резистивных испарителя.

Данная установка была разработана для формирования слоев «просветленной оптики». Это значит, что требуется напылять до 10–14 слоев пленок металлов и оксидов толщиной от 50 до 300 Å с оптическим контролем каждого слоя при помощи фотоэлектрического умножителя по пропусканию потока света через специальное окно. Управление такими сложными процессами осуществляется с помощью ЭВМ. Данная установка имеет систему безмасляной откачки, осуществляемой турбомолекулярным насосом (иногда используется диффузионный насос). Весь процесс воспроизводится с высокой точностью, при этом обеспечиваются: получение по заданной программе высокого вакуума; заданная температура нагрева, время ее достижения и стабилизации; время вывода пушки или испарителей на режим поддержания заданного тока напыления, длительности отпыла на заслонку и напыления на подложки.

Электронно–лучевая пушка с косвенным нагревом танталового эмиттера обеспечивает стабильный ток электродов. Отклоняющая система обеспечивает разворот луча на 90°, а сама электронно–лучевая пушка расположена вне рабочего объема, что удобно в эксплуатации. Тигельное устройство для распыления различных материалов представляет собой «револьверную головку» способную вращаться вокруг своей оси, в которой размещено 6 отдельных малых тиглей вместимостью 50–150 грамм материала каждый. Для улучшения охлаждения тигельное устройство выполнено из меди. Основным недостатком данной установки является невозможность напылять толстые пленки.

Пластины как и в предыдущей установке крепятся на роторно–планетарном устройстве. Низкое расположение тиглей и удаленность от двух смотровых окон позволяет вести визуальный контроль за процессом. Кроме этого весь технологический процесс по электрическим, температурным, вакуумным и временным интервалам выведен на световой дисплей, где он фиксируется в виде цветных графиков. Например, нагрев – красный цвет, вакуум – зеленый, нагрев ЭЛИ – белый с отличительным номером. Нагрев пластин осуществляется тенями, что обеспечивает более равномерное распределение температур на подложках. При этом вывод на рабочую температуру и стабилизация осуществляется автоматически. После поддержания заданной температуры в течение 5 минут начинается выполнение последующих операций техпроцесса до полного выполнения всей программы.

Вид подколпачного устройства данной установки приведен на рисунке 7.15.



Рис. 7.15. Вид подколпачного устройства установки УВНРЭ– Э60.

7.10.4. Формирование металлических пленок магнетронным распылением.

Установка магнетронного распыления непрерывного действия УВНМЭ–100/125.003 «Магна–2М» – типичный представитель данного оборудования. В установках такого класса имеются 2 отдельные вакуумные системы, работающие вместе: первая вакуумная система имеет весь комплекс насосов необходимых для откачки высокого вакуума из рабочего объема; вторая вакуумная система состоит из насоса предварительной откачки вакуума, шлюзов загрузки и выгрузки, устройства обеспечения вакуумной связи с рабочим объемом и возможности разгерметизации шлюзов загрузки–выгрузки. Эти 2 вакуумные системы обеспечивают непрерывность процесса напыления. Вид данной установки представлен на рисунке 7.16.



Рис. 7.16. Внешний вид установки «Магна–2М»

Основными частями установки являются:

- рабочая камера, размещенная на каркасе;
- агрегаты высоковакуумной откачки и откачки шлюзов (загрузки, выгрузки);
- нагреватель;

– устройство транспортировки пластин из шлюза загрузки до шлюза выгрузки;

– шкафы питания магнитных распределительных устройств и управления установкой в рабочем и наладочном режимах, управления ионной зачисткой.

В шкафу управления имеется дисплей и ЭВМ «Электроника», которая управляет транспортированием и нагревом подложек, напуском аргона в зоны распыления и травления, режимами работы 3-х магнетронов, шлюзовых устройств, а также ведет счет пластин, обеспечивает контроль всех систем и блокировку при отказе одной из них.

Для высоковакуумной откачки используются диффузионные насосы НВ-5 и АВР-50. В некоторых вариантах вместо диффузионного насоса используется криогенный насос с предварительной откачкой, насос АВР-50 с азотной ловушкой, расположенной в вакуумном трубопроводе над ним.

«Магна-2М» предназначена для нанесения одно- и многослойных пленок из алюминия и его сплавов на кремниевые подложки диаметром 76, 100 и 125 мм магнетронным распылением. Установка состоит из двух 1 и 16 шлюзовых и одной 6 рабочей камер, системы транспортных устройств для перемещения полупроводниковых подложек между кассетами 2, трех магнетронных распылительных устройств 12 и микропроцессорной системы управления с дисплеем.

Схема установки «Магна-2М» представлена на рис. 7.17.

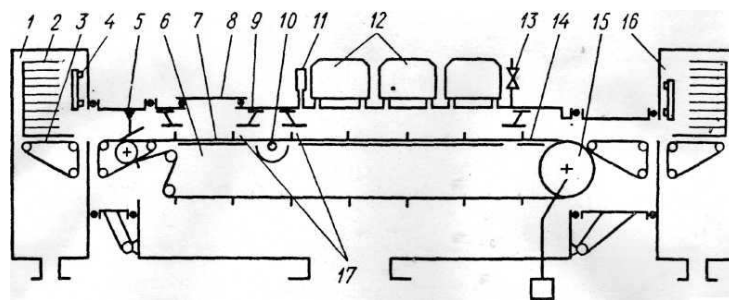


Рис. 7.18. Схема вакуумной установка непрерывного действия «Магна-2М»

1, 16 – шлюзовые камеры, 2 – кассета, 3 – пассивы подачи подложек, 4 – затвор шлюзовой камеры, 5 – датчик подачи подложек на конвейер, 6 – рабочая камера, 7, 15 – конвейер и его привод, 8 – устройство ионной очистки подложек, 9 – уплотняющая диафрагма, 10 – нагреватель подложек, 11, 13 – датчик давления и вибрационный натекаль аргона, 12 – магнетроны, 14 – стол охлаждения подложек, 17 – щелевые каналы.

Шлюзовые камеры 1 и 16, предназначенные для загрузки и выгрузки кассет 2 с полупроводниковыми подложками, вначале откачиваются агрегатом АВР-50 с азотной ловушкой в течение определенного времени, а затем в них для очистки напускается азот. Работа камер так взаимосвязана, что при разгерметизации шлюзовой камеры давление аргона в рабочей почти не изменяется.

Рабочая камера 6 имеет три зоны: предварительной ионной очистки подложек, их нагрева кварцевой лампой и нанесения пленок. Зоны

сообщаются через щелевые каналы, но в них поддерживается разное давление. Вакуумная система рабочей камеры представляет собой агрегат, состоящий из паромасляного диффузионного насоса НВ–5, азотной ловушки и механического насоса ВНМ–18Г.

К системе транспортных устройств относятся конвейер 7 и резиновые пассики 3, подающие подложки из кассет на конвейер и с конвейера в кассеты.

7.11. Установка лазерного распыления.

Схема установки лазерного распыления тонких пленок представлена на рис. 7.18. Излучение лазера с помощью линзы фокусируется на поверхности твердой мишени. Вакуумная камера откачивается турбомолекулярным или диффузионным насосами до давления порядка 1300–800 Па. Внутри камеры располагаются мишень, сепаратор капель и нагреватель подложки. Нагреватель позволяет поддерживать температуру подложки в пределах 50–1000°С.

Плазма, расширяясь при разлете по нормали от мишени, достигает подложки, на поверхности которой и происходит рост пленки. В качестве мишени применяются диски из необходимых материалов (металлы, сплавы, полу-проводниковые материалы, керамики, и составные мишени). Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени в различных процессах изменяется от 1 до 22 Дж/см² при изменении расстояния между линзой и мишенью, т. е. при изменении размеров пятна фокусировки. Плоскости мишени и подложки, как правило, параллельны друг другу и отклонены на 20° от вертикали. Расстояние между ними может составлять от 25 до 120 мм. ВЧ возбуждение буферного газа осуществляется генератором с частотой 50 – 100 кГц.

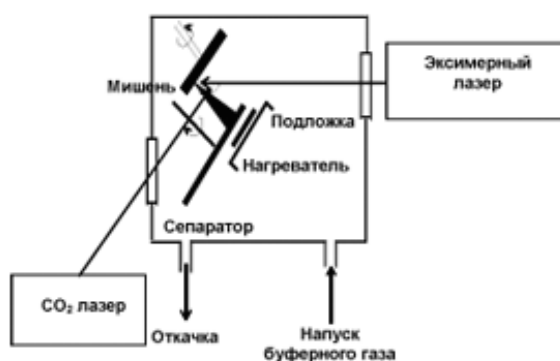


Рис.7.18. Схема установки для лазерно–плазменного напыления тонких пленок.

При использовании данного метода возможны некоторые его модификации, обеспечивающие повышение качества структуры напыляемой пленки и стабильность ее параметров, и включающие:

– использование сепаратора частиц для устранения попадания капель и кластеров на пленку в процессе роста;

– контролируемое изменение состава буферного газа и управление степенью возбуждения и ионизации частиц буферного газа высокочастотным разрядом для легирования возбужденными атомами и ионами из газовой фазы.

Благодаря уникальным свойствам тонкопленочных структур, создаваемых методом импульсного лазерного распыления, реализуется возможность создания бездефектных эпитаксиальных пленок.

Методу импульсного лазерного распыления присущи некоторые недостатки, одним из которых является образование капель при распылении мишени, которые, естественно, попадают на выращиваемую пленку. Избавиться от попадания капель на поверхность выращиваемой пленки позволяет метод перекрещивающихся пучков, однако при этом значительно усложняется установка и снижается скорость осаждения. Существенное различие движения капель и атомной составляющей лазерной плазмы позволяет использовать механический фильтр для предотвращения попадания капель на поверхность выращиваемой пленки. Применение такого фильтра значительно улучшает морфологию пленок. Фильтр представляет собой диск–обтюратор диаметром 140 мм с прямоугольным отверстием на краю размером 10x10 мм. Вращение диска и запуск лазера синхронизируются так, чтобы в момент лазерного импульса отверстие располагалось напротив подложки. При скорости вращения диска более 6000 об./мин поверхность напыляемой пленки защищается от попадания капель. Второй фильтр скоростей изготовлен в виде диска диаметром 120 мм, по краям которого располагается 30 лопаток размером 20x15 мм. Длинная сторона лопаток перпендикулярна плоскости диска, а короткая направлена по радиусу. Для полной защиты от капель необходима скорость вращения более 15000 об./мин. Для этой конструкции в отличие от первой не нужна синхронизация лазерных импульсов с вращением диска с лопатками.

Получение высококачественных пленочных структур является приоритетной задачей как для микроэлектроники, так и для микро– и нанопотоники. Методом импульсного лазерного распыления, более экономичным по сравнению с методом молекулярно–лучевой эпитаксии, получены пленки металлов и полупроводников нанометровой толщины, по качеству не уступающие пленкам, полученным методом молекулярно–лучевой эпитаксии. метод лазерно–плазменного осаждения, в котором впервые применено изменение энергетического спектра и степени ионизации лазерного эрозионного факела, позволяет решить задачу получения пленок с различными структурными характеристиками. Существенное различие скоростей капель и атомной и ионной составляющей лазерной плазмы позволило использовать механический фильтр для предотвращения попадания капель на поверхность выращиваемой пленки. Применение такого фильтра значительно улучшает морфологию пленок.

Глава 8. ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В полупроводниковой технологии для интенсификации химического и электрохимического травления, при отжиге радиационных дефектов лазерным излучением, для стимуляции стадии зародышеобразования при получении эпитаксиальных слоев и т. п. в ряде случаев используют фотохимические процессы. Основным же местом их использования является фотолитография. Именно развитие метода фотолитографии с использованием защитных свойств масок из диоксида кремния послужило основой для создания планарной технологии – одного из наиболее прогрессивных методов в условиях промышленного производства интегральных микросхем (ИМС). Достаточно сказать, что в технологическом цикле производства СБИС процесс фотолитографии на разных уровнях повторяется 12–20 раз.

8.1. Процессы в фоторезистах

Фотолитография – это процесс формирования на поверхности пластины или на поверхности ранее созданных на ней функциональных слоев с помощью светочувствительного химически стойкого материала покрытия с отображением размеров и форм будущих элементов и компонентов прибора (микросхемы) и последующего переноса изображения на подложку или на функциональные слои.

Сложные химические полимерно-мономерные светочувствительные материалы, в которых под действием излучения определенного спектрального состава протекают фотохимические материалы, получили название фоторезистов.

Например, под действием актиничного излучения фоторезисты меняют свою растворимость в реактивах.

Фоторезисты, у которых растворимость освещенного (экспонированного) участка уменьшается, называют негативными, а фоторезисты, растворимость которых после облучения возрастает – позитивными.

Экспонирование фоторезистов производят через фотомаску (фотошаблон) с изображением элементов прибора или микросхемы. После обработки фоторезиста в растворе, удаляющем экспонированные участки (проявителе), на поверхности пластины образуется рельефное изображение, состоящее из участков с удаленным и сохраненным фоторезистивным слоями, устойчивых к воздействию агрессивных сред, таких, как кислоты и щелочи, даже при нагревании. Полимерные системы, из которых формируют фоторезисты, могут обладать чувствительностью не только к видимому или ультрафиолетовому излучению, но и к потоку электронов (электронорезисты) или к рентгеновскому излучению (рентгенорезисты). Соответственно процессы литографии в этих случаях называются электронолитография или рентгенолитография. Схема процесса фотолитографии с использованием негативных и позитивных фоторезистов показана на рис. 8.1, 8.2, 8.3.

Рассмотрим фотохимические процессы, происходящие в фоторезистах. Главным свойством фотохимических реакций является то, что поглощенный фотон действует селективно, возбуждая лишь отдельную молекулу органического материала и не затрагивая остальных. Основные законы фотохимии следующие:

1. Фотохимические реакции происходят только под действием света, поглощаемого материалом (актиничного света) (закон Гротгуса – Дрепера).
2. Каждый поглощенный фотон при первичном акте способен возбудить только одну молекулу (закон фотохимической эквивалентности Эйнштейна).
3. При поглощении фотона молекулой имеется вероятность заселить нижнее возбужденное синглетное или триплетное состояние.
4. В большинстве фотохимических процессов, протекающих в органических материалах, участвует самое нижнее синглетное или триплетное состояние.

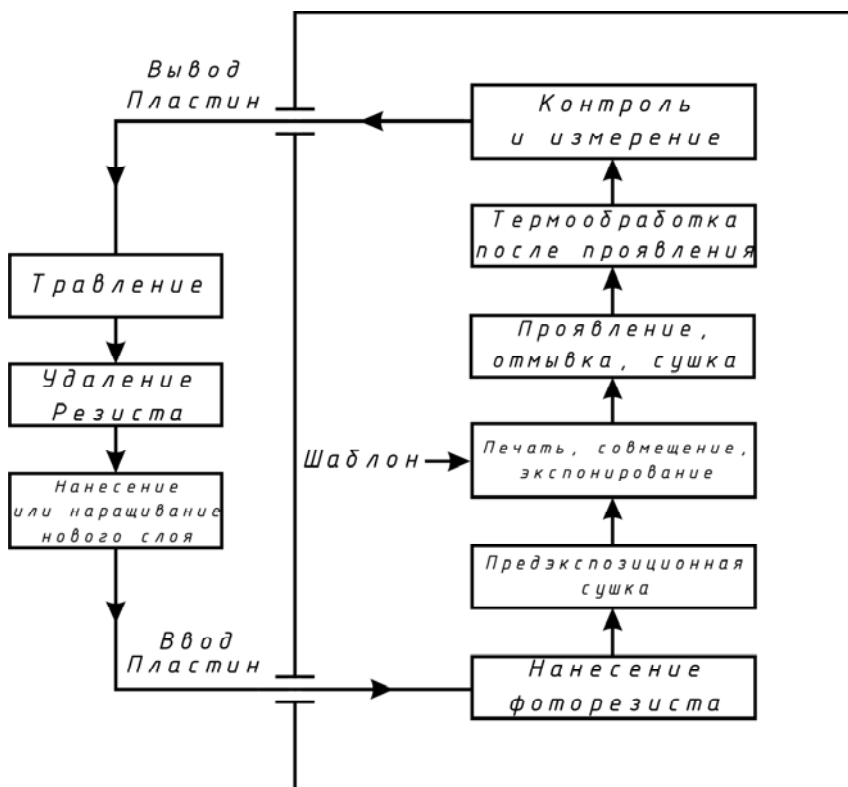


Рис. 8.1. Схематическое изображение этапов литографического процесса, используемого для производства ИМС.

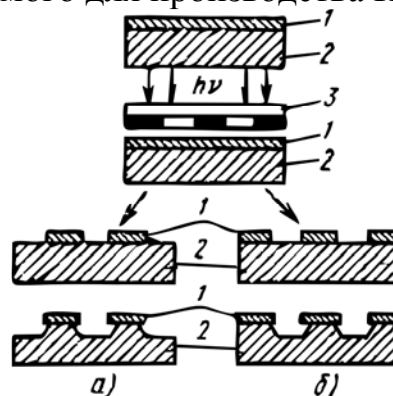


Рис. 8.2. Схема процесса фотолитографии с негативным (а) и с позитивным (б) фоторезистами: 1 – фоторезист; 2 – пластина полупроводника; 3 – фотошаблон



Рис. 8.3. Экспонирование фоторезистов

а – характеристики экспонирования позитивного и негативного резистов, б – изображение слоя резиста в разрезе после проявления.

Кинетику фотохимических реакций можно представить следующими этапами: поглощение фотона молекулой, переходящей в активное состояние; первичные фотохимические процессы с участием активированных молекул; вторичные («темновые») процессы между молекулярными комплексами, образовавшимися в ходе первичных процессов.

Для оценки эффективности фотохимических взаимодействий введено понятие квантового выхода η , который определяется как отношение числа прореагировавших молекул к числу поглощенных фотонов:

$$\eta = \frac{N}{Q/(h\nu)} \quad (8.1)$$

где N – число прореагировавших молекул;

Q – количество поглощенной световой энергии;

$h\nu$ – энергия фотона; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Согласно закону Эйнштейна, квантовый выход должен быть равен 1. На практике значения η могут находиться в пределах от 10^3 до 10^6 . Превышение единицы возможно за счет вторичных процессов, протекающих в темноте в системе активированных молекул после прекращения облучения.

Фотохимические реакции можно разделить на несколько типов:

1. Реакции фотолиза – возбуждение молекул фотоном с последующим распадом на активные частицы.

2. Реакции фотоперегруппировки – перестановка атомов (или радикалов) в главной цепи молекулы под действием света, чаще всего поворот одной группы атомов относительно другой, частный случай фотоперегруппировки – фотоаутомеризация, состоящая в перемещении отдельных атомов из одной части главной цепи молекулы в другую.

3. Реакции фотоприсоединения – присоединение активированной молекулой другой молекулы или молекул.

4. Реакции фотосенсибилизации – передача электронной энергии возбуждения от одной молекулы (или ее части) к другой молекуле (или ее части).

Часто различные типы фотохимических реакций протекают параллельно в одной органической системе. Энергия химических связей в полимерах находится в пределах от 160 до 420 кДж/моль, что соответствует диапазону длин волн актиничного света (320 – 750 нм) (рис. 8.4). Характерной особенностью фотохимических реакций является участие в них радикалов.

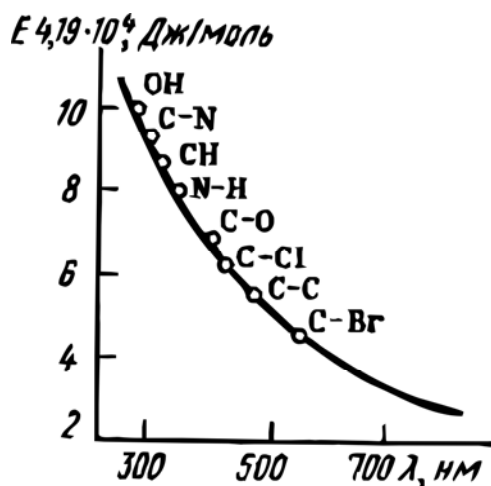


Рис. 8.4. Энергия химической связи некоторых радикалов и соответствующая длина волны актиничного света

Химический процесс, стимулированный светом, приводит к образованию радикалов, химическая активность которых достаточна для развития вторичных процессов. Кинетика первичной стадии (фотолиза) определяется химическим строением полимера. Присутствие в полимерах сильно поглощающих групп атомов $-C=O$, $-C=CC$, $-NO_2$, $-NO$, $-N_3$, $-N_2$ и других способствует интенсивному протеканию стадий фотолиза или фотоприсоединения, приводящих к деструкции или сшиванию молекулярных цепей.

Как правило, собственная фоточувствительность полимеров в видимой коротковолновой и ближней ультрафиолетовой части спектра невелика. Это объясняется значительной энергией связей в полимерных материалах, особенно в их главной цепи. Так, энергия связи $C=C$ соответствует длине волны актиничного света 200 – 250 нм, связи $C=O$ – диапазону 270 – 360 нм.

Фоточувствительность полимеров в требуемом диапазоне длин волн может быть повышена или же полоса поглощения полимера может быть сдвинута в сторону более длинных волн за счет добавки стабилизаторов или сенсибилизаторов. Эффект действия этих добавок определяется главным образом их энергетической связью с полимерной основой. Одна и та же по химическому строению добавка в различных полимерах может выполнять функцию как стабилизатора, так и сенсибилизатора. Возбуждение под действием света, полученное сенсибилизатором, способно в дальнейшем

передаваться полимерной молекуле, инициируя фотосенсибилизированную химическую реакцию.

Для получения негативных резистов, например, очень часто используют полимерную основу из циклокаучука, который сам не является фоточувствительным, но становится таковым при сенсibilизации азидами (азидная группа $-N_3$) различного типа.

Для характеристики фоторезистов в специфических условиях их применения разработана система параметров, среди которых основными являются следующие.

Светочувствительность – величина, обратная экспозиции, требуемой для перевода фоторезиста в растворимое (позитивный процесс) или в нерастворимое (негативный процесс) состояние. Светочувствительность во многом определяется квантовым выходом фотохимических реакций, происходящих в фоторезисте. Важно, чтобы он обладал максимальной светочувствительностью в требуемом диапазоне длин волн. Большинство современных фоторезистов имеет максимальную чувствительность в ближней УФ-области спектра.

Разрешающая способность – максимально возможное число сплошных контрастно различимых полос фоторезиста, разделенных промежутками равной ширины, размещенных на 1 мм.

Разрешение фоторезиста можно характеризовать также выделяющей способностью, т. е. способностью формировать отдельные элементы изображения с минимальными размерами.

Предел разрешающей способности определяется размерами полимерных молекул фоторезиста. Основная технологическая проблема заключается в получении хорошо дифференцированной границы между экспонированным и исходным участками фоторезиста, причем необходимо, чтобы эта граница минимально изменялась на всех этапах обработки.

Стойкость к воздействию агрессивных сред. Этот параметр трудно оценивать количественно. Иногда эта величина пропорциональна (или равна) времени отслаивания пленки фоторезиста при обработке в стандартном травителе. В последнее время химическую устойчивость фоторезиста чаще характеризуют плотностью дефектов $N/мм^2$, передающихся на подложку при травлении рельефа, N – количество дефектов. При такой оценке могут быть получены заниженные данные, ввиду того что дефекты являются следствием не только процесса фотолитографии. Необходимое условие обеспечения стойкости – получение однородной бездефектной пленки с высокой адгезией к подложке и функциональным слоям на ней, по возможности пассивной к химическим реагентам, применяемым для проявления фоторезиста и травления рельефа в защитном слое.

Для характеристик позитивных фоторезистов часто используют такой параметр, как устойчивость к воздействию стандартного проявителя. Значение этой величины должно быть по крайней мере на порядок выше времени проявления.

Стабильность эксплуатационных характеристик фоторезиста во времени определяется их неизменностью при определенных условиях хранения и использования. Для контроля стабильности фотохимических свойств

позитивных фоторезистов проводят измерение оптической плотности слоя определенной толщины, которая пропорциональна концентрации светочувствительных центров. Изменение ее во времени свидетельствует о необратимых химических превращениях, происходящих в структуре фоторезиста.

Для практического применения фоторезистов важно знать их спектры поглощения, представленные для основных типов негативных и позитивных фоторезистов на рис. 8.5.

Резисты на основе циклокаучука с сенсibilизаторами типа бисазидов (1) характеризуются полосой поглощения с максимумом при $\lambda = 350$ нм. Фоторезисты типа ПВЦ (2) – двумя полосами поглощения, одна из которых связана с поглощением света молекулами сенсibilизатора (360 – 370 нм), а другая – молекулами поливинилциннамата (280 нм).

Позитивные фоторезисты также имеют два максимума в спектре поглощения при 350 и 400 нм (кривые 1, 2 на рис. 8.5, б). Оба этих максимума связаны с поглощением света молекулами нафтохинондиазида. После экспонирования спектры поглощения резистов претерпевают существенные изменения – исчезают максимумы и минимумы в спектрах поглощения (рис. 8.5, а – кривая 3; б – кривая 3).

После проявления толщина слоя фоторезиста изменяется. Эти изменения определяются из характеристических кривых (рис. 8.6). Из рисунка видно, что толщина негативного резиста увеличивается с ростом экспозиции, позитивного – уменьшается.

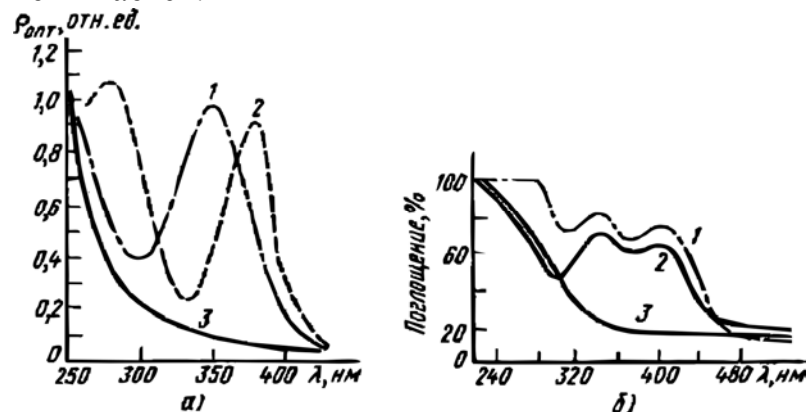


Рис. 8.5. Спектры поглощения негативных (а) и позитивных (б) фоторезистов

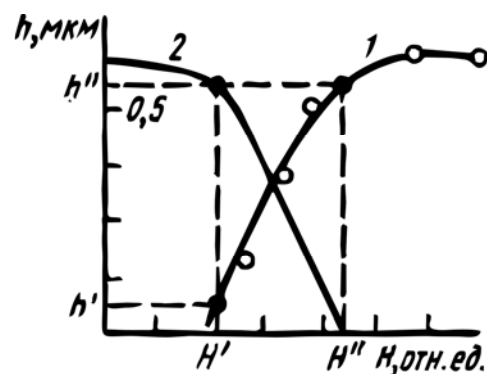


Рис. 8.6. Характеристические кривые негативного (1) и позитивного (2) фоторезистов

Из характеристических кривых можно определить
– чувствительность резиста

$$S = 1/H'' \quad (8.2)$$

где H'' – экспозиция, при которой слой полностью заполимеризован (задублен) или разрушен (для позитивного резиста);

– контрастность $y = (h'' - h') / (H'' - H')$ и фотографическую широту $L = H'' - H'$, где H' – экспозиция, при которой начинается сшивание или деструкция слоя. Для позитивных резистов более полную информацию дает зависимость скорости проявления от экспозиции, которая также называется характеристической.

На основе приведенных сведений о фоторезистах можно сформулировать ряд основных технологических требований, которые должны к ним предъявляться.

1. Высокая светочувствительность в требуемом диапазоне длин волн.
2. Высокая разрешающая способность (на современном уровне производства СБИС – до 5000 – 10000 линий/мм при толщине слоя фоторезиста до 0,1 мкм).
3. Высокая адгезия к подложке (полупроводнику, оксиду, нитриду или металлу, другим функциональным слоям).
4. Высокая контрастность (получение резко дифференцированной границы между экспонированными и неэкспонированными участками).
5. Высокая устойчивость в химически агрессивных средах.
6. Однородность свойств по всей поверхности слоя.
7. Стабильность свойств во времени.
8. Отсутствие загрязнений продуктами химических превращений.
9. Доступность материалов, относительная простота, надежность и безопасность применения, возможность различных способов нанесения и др.

В табл. 8.1. приведены основные технологические характеристики позитивных и негативных фоторезистов.

Таблица 8.1. Технологические характеристики позитивных и негативных ФР:

Сравниваемые характеристики	Фоторезист	
	Негативный	Позитивный
Влияние экспонирования	Достаточная полимеризация для формирования рисунка	Химическая стойкость резиста, формирующего рисунок, химические изменения происходят в областях, не участвующих в формировании резистивной маски
Чувствительность к кислороду	Чувствителен, что создает трудности при экспонировании	Не чувствителен

Удаление резиста	Трудно удаляется, так как материал имеет высокую относительную молекулярную массу	Легко удаляется, так как не содержит компонентов с высокой относительной молекулярной массой
Химическая стойкость	Незначительная химическая стойкость, низкая скорость фильтрации	Высокая химическая стойкость и скорость фильтрации
Проявление	Проявитель – органический растворитель; рисунок набухает; удаление отходов затруднено	Проявитель на основе воды: рисунок не нарушается; удаление отходов простое
Толщина	Должна составлять не более 1/3 минимального размера рисунка	Может быть равна минимальному размеру рисунка или превышать его
Покрытие ступенек рельефа	Плохое из-за ограничений по толщине покрытия	Отличное, так как можно использовать относительно толстое покрытие (2-3 мкм)

8.2. Фотошаблоны

Фотошаблоны – стеклянные пластины или полимерные пленки со сформированным на их поверхности рисунком элементов и компонентов микросхем из материала, не пропускающего актиничного излучения. Система элементов и компонентов на фотошаблоне образует топологию одного из слоев структуры прибора или микросхемы. Элементы и компоненты изображения многократно повторяются в пределах активного поля фотошаблона.

В зависимости от типа процессов фотолитографии различают негативный (темнопольный) фотошаблон, на котором изображение элементов схемы выполнено в виде светлых фигур на темном поле, и позитивный (светлопольный) фотошаблон с темными элементами на светлом поле. Кроме того, получили распространение зеркальные фотошаблоны с зеркально-симметричным изображением элементов по отношению к топологии структуры и транспарантные, на которых изображение элементов сформировано пленкой материала, не пропускающего актиничного для данного типа фоторезиста излучения, для неактиничного излучения материал практически прозрачен.

Как правило, на фотошаблоне содержится столько изображений участка микросхемы, сколько необходимо для заполнения поверхности рабочей пластины. Таким образом, фотошаблон является носителем размноженного (мультиплицированного) идентичного изображения. Для производства ИМС (или прибора) изготавливают комплект фотошаблонов (3 – 10 шт. в зависимости от сложности микросхемы), элементы которых должны точно совмещаться друг с другом при переходе от одного технологического слоя к другому.

Вначале создается комплект эталонных фотошаблонов, с которых затем методом фотолитографии получают несколько рабочих комплектов. Так как в производстве микросхем используют главным образом метод контактной фотолитографии, то в процессе эксплуатации фотошаблоны изнашиваются: на них появляются проколы, количество которых превышает допустимую норму, царапины и другие дефекты. При выходе из строя одного из рабочих фотошаблонов заменяют весь комплект во избежание ошибок при совмещении. Точно так же поступают, если выходит из строя один из эталонных фотошаблонов.

Изготовление фотошаблонов – дорогостоящий, трудоемкий процесс, требующий высокой квалификации операторов, высокой точности и надежности оборудования, строжайшего соблюдения норм вакуумной гигиены.

В современной технологии существует в основном три метода изготовления фотошаблонов: оптико-механический, заключающийся в получении проекции участка топологии микросхемы истинного размера с высокой степенью разрешения, который затем мультиплицируют, применяя фотоповторители; метод сканирования с использованием модулированных по амплитуде и длительности лазерных или электронных пучков и растровый метод с применением линзовых, зеркальных или голографических устройств. В промышленности наиболее распространен оптико-механический метод.

Этих недостатков нет у разработанных в последнее время прозрачных фотошаблонов. Край фундаментальной полосы поглощения материалов их покрытия находится в диапазоне длин волн 300-400 нм.

Для формирования изображения на прозрачных фотошаблонах пригодны пленки из полупроводниковых или диэлектрических материалов с шириной запрещенной зоны 3 – 4 эВ. Чаще всего для этой цели используют пленки монооксида кремния SiO или оксида железа Fe_2O_3 толщиной 1 – 1,5 мкм. Хорошие результаты дают пленки сложного состава: 10% Fe_2O_3 + 90% VO_2 . Износоустойчивость прозрачных фотошаблонов увеличивается при нанесении поверх основной пленки тонкого слоя фторида магния MgF_2 .

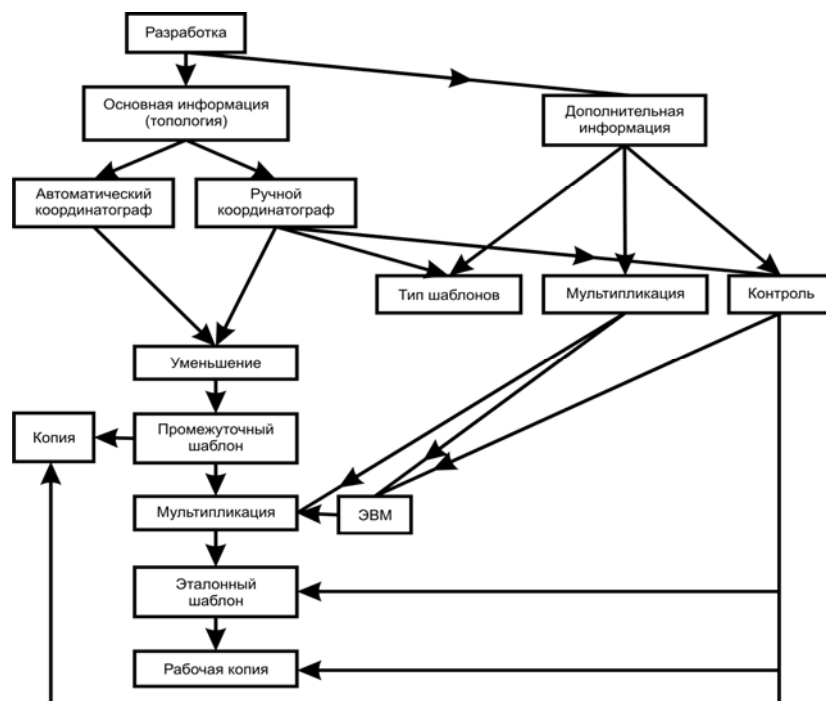


Рис. 8.7. Обобщенная схема изготовления фотошаблонов

К фотошаблонам предъявляются весьма жесткие требования: они должны иметь высокую разрешающую способность (до 2000 линий/мм); достаточно большую площадь рабочего поля (это особенно важно при переходе на пластины диаметром 150 мм и больше в производстве БИС); высокую контрастность; обеспечивать точность воспроизведения всех размеров изображения (на уровне 0,3–0,5 мкм); точность размеров шага между элементами (в пределах 1 мкм); стабильность рисунка во времени; быть стойкими к истиранию и проколам; иметь плоскостность рабочей поверхности не хуже 0,5 мкм на длине 25 мм, что особенно важно при контактной печати.

8.3. Методы литографии

В зависимости от длины волны применяемого излучения различают оптическую, рентгеновскую, электронную или ионную литографию (рис. 8.8). Оптическая литография (фотолитография), стандартная или в глубокой ультрафиолетовой области, в соответствии со способом экспонирования может быть контактной или бесконтактной (на микрозоре и проекционная). Рентгеновская литография может выполняться путем последовательной передачи топологического рисунка на слой резиста сфокусированным единичным электронным лучом или путем одновременной проекции всего рисунка. То же можно сказать и об электронной литографии.

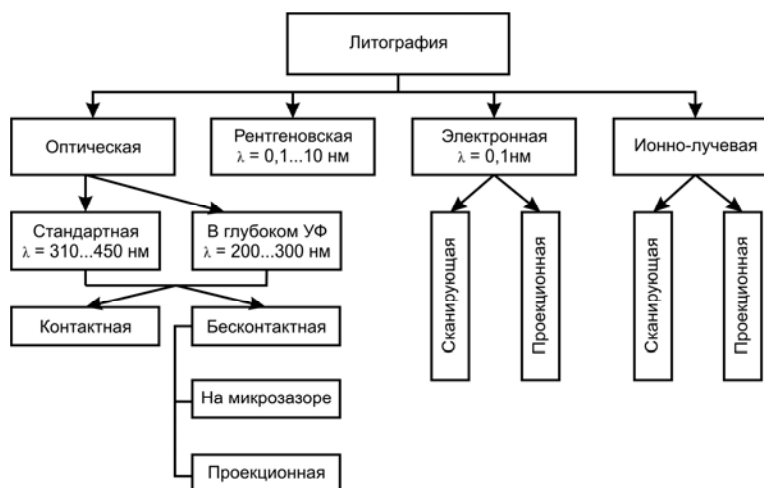


Рис.8.8. Классификация литографических процессов

В отличие от производства СБИС при производстве ГИС нецелесообразно использовать длины волн $<200-300$ нм, достаточно ограничиться методом стандартной фотолитографии (длина волны $\lambda = 310-450$ нм).

Следует отметить принципиальные различия между световыми излучениями и излучениями высоких энергий. Для поглощения световой энергии характерна селективность. Поглощение же излучений высокой энергии менее избирательно и, за исключением мягкого рентгеновского излучения, почти не зависит от химического строения полимера. Световая энергия воздействует лишь на валентные электроны в молекулах, в то время как ионизирующее излучение может оказывать влияние и на связанные более прочно внутренние электроны.

8.3.1. Оптическая литография (фотолитография)

Фотолитография (ФЛ) - это технологический процесс (ТП), основанный на использовании фотохимических явлений, которые происходят в нанесенном на подложку слое фоторезиста (ФР) (Примечание. В литературе можно также встретить термин «актинорезист») при его обработке ультрафиолетовым излучением (УФ) через маску (фотошаблон (ФС)) и последующей операции формирования маски в слое фоторезиста и травлении технологического слоя через маску в ФР.

Основными параметрами, определяющими технологический уровень ФЛ, являются:

- минимальный элемент изображения и точность его воспроизведения в ФР по полю изображения, по подложке и в партии обрабатываемых подложек;
- погрешность совмещения топологических слоев;
- воспроизводимость формы (рельефа) элементов рисунка, протравленных в технологическом слое через маску в ФР;
- плотность дефектов в технологическом слое, внесенных в процессе литографии.

Формирование слоя резиста. Данный процесс должен обеспечить получение равномерных по толщине бездефектных фотослоев с хорошей адгезией к подложке и функциональным слоям при сохранении исходных свойств применяемых ФР.

Подготовка поверхности подложек. Подготовка поверхности подложки к нанесению ФР состоит из нескольких операций и является индивидуальной для каждого конкретного случая в зависимости от материала подложки, технологии ее получения, состояния поверхности и дальнейшего назначения маски. Под подложкой в фотолитографических процессах обычно подразумеваются не только подложки, но и функциональные слои, на которых формируют резистивный слой. Если фотомаска используется для локального травления, то качество передачи рисунка на подложку зависит в основном от адгезии маски к подложке и от способности травителя проникать под слой фотомаски по границам окон. Адгезия фотослоя увеличивается с повышением смачивания поверхности подложки ФР. Проникновение травителя под слой фотомаски, приводящее к растравливанию подложки (рис. 8.9), в свою очередь, зависит от смачивания поверхности подложки травителем или водой.

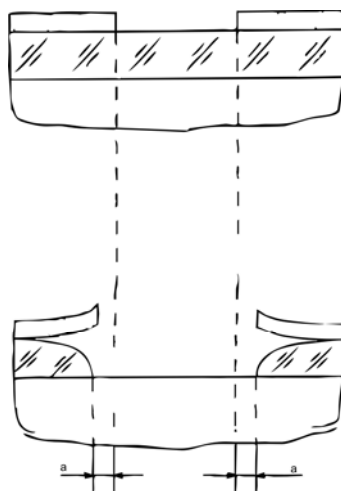


Рис. 8.9. Клин травления при передаче рисунка с фотомаски

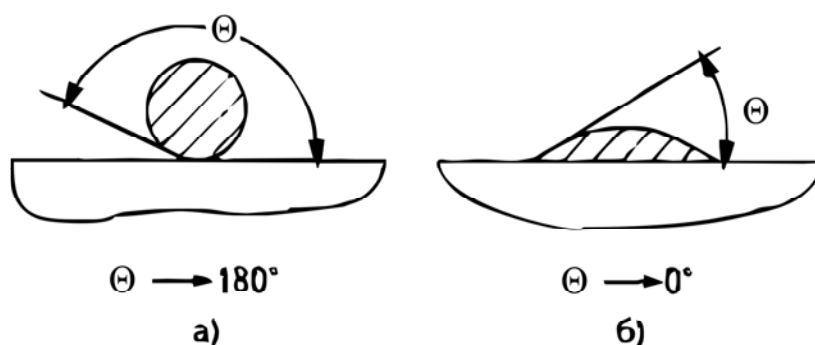


Рис. 8.10. Поверхность, смачиваемая жидкостью:
а) плохо; б) хорошо

Критерием смачиваемости является краевой угол смачивания поверхности твердого тела жидкостью (рис. 8.10). Оптимально

подготовленной к ФЛ поверхностью является поверхность, которая хорошо смачивается ФР и плохо смачивается водой, т. е. для которой выполняется условие:

$$\Theta_{\phi} \rightarrow 0^{\circ}, \Theta_{B} \rightarrow 180^{\circ}$$

Эти условия не противоречат друг другу для большинства полимерных ФР, так как они, будучи сами гидрофобными, хорошо смачивают гидрофобные, а не гидрофильные поверхности. Таким образом, подготовленная к нанесению фоторезиста поверхность должна быть очищена от загрязнений, а также должна обладать свойством гидрофобности. Требования к очистке состоят в следующем.

Очистка подложек должна включать:

- обработку моющими средствами;
- промывку;
- просушку.

8.3.2. Технология контактной фотолитографии

Схема технологического процесса контактной фотолитографии приведена на рис. 8.11. Все операции можно разделить на три группы.

1. Формирование слоя фоторезиста: обработка поверхности подложек; нанесение и первая сушка слоя фоторезиста.

2. Формирование защитного рельефа: экспонирование и совмещение; проявление и промывка; сушка; задубливание рельефа.

3. Передача изображения на подложку; травление профиля; удаление фоторезиста.

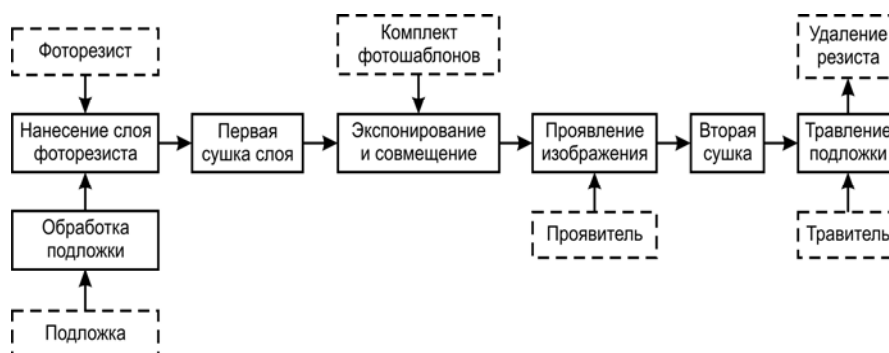


Рис. 8.11. Схема процесса контактной фотолитографии

Рассмотрим технологические особенности каждого из этих этапов.

Обработка поверхности подложки имеет целью обеспечить хорошую адгезию слоя фоторезиста к подложке. Фоторезисты наносят на поверхность кремния, поликристаллического кремния, диоксида кремния, примесно-силикатных стекол, нитрида кремния, различных металлических слоев. Характер обработки поверхности для каждого конкретного случая различен.

Подготовку поверхности кремния выполняют по одной из возможных схем.

1. Поочередная отмывка в толуоле, амилацетате, ацетоне, этиловом спирте по 5 мин, нагрев до кипения с последующей ультразвуковой очисткой в порции свежего растворителя.

2. Кипячение в деионизованной воде 5 мин.

3. Промывка в HF 5 мин.

4. Кипячение в деионизованной воде 5 мин.

Иначе производят подготовку оксидных пленок. Пленки оксида после выращивания почти не содержат гидроксидов, и поверхность оксида гидрофобна. Проведенный на ней процесс фотолитографии обеспечивает высокое качество пленки, о чем можно судить по малому размеру клина травления. Ввиду этого целесообразно наносить фоторезист на поверхность оксида сразу после извлечения пластины из реактора или не позднее чем через 1 ч после этого. Если подложки хранились длительное время, то их следует подвергнуть термообработке перед нанесением фоторезиста в целях гидрофобизации поверхности оксида. Минимальная температура обработки в сухом азоте 700 °С, время обработки 1 ч. Лучшие результаты получают при обработке при температуре 1000 °С и выше в течение 5 мин.

При предварительной обработке металлических слоев проводят их очистку и химическое травление. Очистку осуществляют чаще всего в парах трихлорэтилена C_2HCl_3 . Химическое травление алюминия – в растворе NaOH или Na_3PO_4 с последующей обработкой в HNO_3 , хрома – в разбавленной хлористоводородной кислоте, золота – в персульфате аммония.

Предварительную обработку поверхности нитрида кремния производят в горячей фтористоводородной кислоте с последующей промывкой кипячением в деионизованной воде.

Нанесение фоторезиста осуществляют центрифугированием, пульверизацией, поливом, окунанием в раствор фоторезиста, и т. д.

Наибольшее распространение в промышленности получил способ центрифугирования. При включении центрифуги фоторезист растекается по поверхности подложки под действием центробежной силы. Слой фоторезиста толщиной h на границе с подложкой формируется за счет уравнивания этой силы и силы сопротивления, зависящей от когезии молекул фоторезиста:

$$h = ac^2(\omega)^{\frac{1}{2}} \quad (8.3)$$

где a – постоянная центрифуги, $\text{мин}^{1/2}\text{мкм}$; c – содержание сухого вещества в фоторезисте, вес. %; ω – угловая скорость вращения центрифуги, мин^{-1} .

Для изменения толщины слоя изменяют вязкость фоторезиста. Тонкая регулировка толщины достигается подбором угловой скорости вращения центрифуги ω , которая обычно находится в диапазоне 2000-10000 об/мин. В процессе центрифугирования на краю пластины возникает валик фоторезиста, толщина которого

$$D = (2\sigma / (d \omega^2 R))^{\frac{1}{2}} \quad (8.4)$$

Здесь σ – поверхностное натяжение фоторезиста; R – радиус пластины-подложки; d – плотность фоторезиста.

Для каждой концентрации фоторезиста существует критическая скорость вращения центрифуги, соответствующая равновесию центробежной и когезионной сил. При превышении этой скорости уменьшения толщины слоя фоторезиста не происходит.

Первой сушкой заканчивается процесс формирования слоя фоторезиста. На этом этапе наряду с удалением растворителя происходит формирование структуры полимерной пленки фоторезиста.

3. Термообработка (1-я сушка) слоя.

Сушка является операцией, завершающей формирование слоя ФР, и выполняется после его нанесения. Она проходит в два этапа:

- 1) низкотемпературная выдержка нанесенного слоя;
- 2) высокотемпературная выдержка нанесенного слоя.

В процессе сушки удаляется растворитель, и в пленке ФР происходит сложный релаксационный процесс плотной упаковки молекул, уменьшающий остаточные напряжения и увеличивающий адгезию фотослоя к подложке. Растворитель при сушке необходимо удалять полностью, так как он экранирует фоточувствительные части молекул при экспонировании. Удаление растворителя проходит в две стадии: 1) диффузия изнутри слоя к границе слой -атмосфера; 2)испарение с поверхности.

Если испарение преобладает над диффузией, поверхностный слой ФР уплотняется раньше внутреннего слоя и препятствует удалению растворителя изнутри. При этом возникают остаточные напряжения, ослабляющие слой и приводящие к его разрывам. Для более равномерного высыхания фоторезист приготавливают на смесях растворителей с различными скоростями испарения. Сушку рекомендуют проводить в инертной атмосфере, так как на воздухе возможно окисление молекул ФР.

Основными параметрами процесса сушки являются температура и время, которые в значительной степени влияют на такие важные показатели ФР, как время его экспонирования и точность передачи размеров элементов после проявления. При низких температурах адгезия фотослоя к подложке плохая, преобладает сцепление между собственными молекулами полимера (когезия). Этим объясняется отслаивание фотослоя при проявлении, кроме этого, возможно неполное удаление растворителя. Слишком быстрая сушка может привести к возникновению остаточных напряжений в пленке. При больших температурах в ФР идет термополимеризация (при 140-200 °С) и другие процессы. Так, в слое позитивного ФР при температурах выше критических, протекают те же необратимые явления, что и при экспонировании. Качество проведения сушки влияет на все остальные операции фотолитографии.

Большое значение при сушке имеет механизм подвода теплоты. Существуют три метода сушки:

- конвективный,
- инфракрасный (ИК),
- СВЧ-поле.

Конвективная сушка выполняется в термостатах. Образующаяся на поверхности уплотненная часть слоя препятствует равномерной и полной сушке. Для равномерного испарения растворителя и снижения внутренних механических напряжений в фотослое сушку выполняют в два этапа: 15-20 мин. при 18-20 °С, 30-60 мин. при 90-120 °С. Недостаток метода – низкое качество ФР-слоя.

ИК-сушка отличается равномерным удалением растворителя по толщине слоя резиста, поскольку источником теплоты является сама подложка. ИК-излучение сначала достигает границы раздела подложка – резист и, отразившись от подложки, сильнее нагревает нижние прилегающие к подложке слои ФР. Возникает такой температурный градиент по толщине резиста, при котором наиболее холодной частью покрытия будет поверхность, а самой горячей – нижние слои, в которых испарение растворителей почти завершено. Следовательно, «фронт сушки» перемещается от подложки к поверхности слоя ФР. Поэтому у поверхности слой преждевременно не уплотняется. Время сушки понижается до нескольких минут. ИК-сушка является основным промышленным методом, применяемым в ФЛ-линиях. Она выполняется непосредственно после нанесения ФР под ИК-лампами при непрерывном продуве азотом.

При СВЧ-сушке подложки нагреваются, поглощая электромагнитную энергию СВЧ-поля. Такая сушка производится в печах мощностью 200-400 Вт при рабочей частоте 2,45 ГГц. Время сушки – несколько секунд. Достоинством метода является высокая производительность, а недостатками – сложность оборудования и необходимость тщательного экранирования рабочего объема во избежание облучения СВЧ-излучением оператора, а также неравномерность сушки слоя фоторезиста на различных по электрическим характеристикам участках подложек. Поэтому СВЧ-сушке подвергают только однородные подложки.

При любом методе сушки ее режимы, время, температура, должны исключать появление структурных изменений в слое ФР. Высушенный слой необходимо экспонировать не позднее чем через 1ч. Сушку подложек следует выполнять в тщательно очищенной от пыли среде. Контролируют качество сушки визуально или под микроскопом.

При нанесении слоя фоторезиста могут появиться различные виды брака. Плохая адгезия ФР к подложке вызывает при последующем травлении растравливание и искажение рисунков элементов. Причиной плохой адгезии является некачественная подготовка поверхности подложек. Локальные неоднородности рельефа слоя фоторезиста, имеющие вид капелек, обусловлены попаданием пылинок на подложки или присутствием посторонних частиц в ФР. Микродефекты (проколы) слоя фоторезиста объясняются теми же причинами, что и локальные неоднородности рельефа. Неоднородности рельефа слоя ФР в виде радиально расходящихся длинных лучей вызываются нарушением режима центрифугирования в процессе нанесения слоя (вибрацией столика при вращении). Неоднородность толщины слоя ФР на подложках и разброс ее на разных подложках являются результатами перекоса столика, уменьшения частоты его вращения и уве-

личения времени разгона центрифуги. Отклонение толщины слоя ФР от заданной может быть также связано с изменением вязкости ФР.

Условия сушки в значительной степени влияют на качество фотолитографии в целом (рис. 8.12). Максимальную температуру сушки выбирают для каждого типа фоторезиста. Она определяется температурой деструкции его молекул. При превышении максимальной температуры изображение или не проявляется, или для его проявления требуется слишком большое время, что приводит к росту числа дефектов в резистивной пленке.

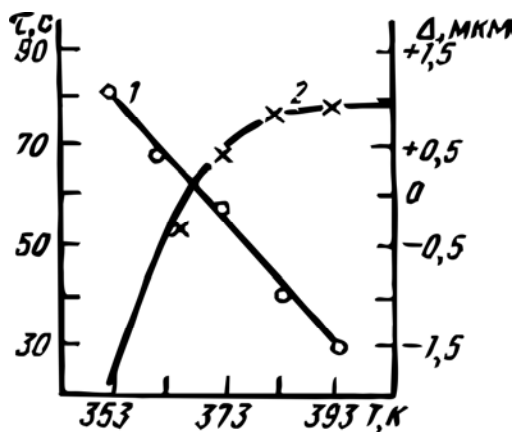


Рис. 8.12. Зависимость времени экспозиции τ (1) и отклонения размеров Δ изображения (2) от температуры.

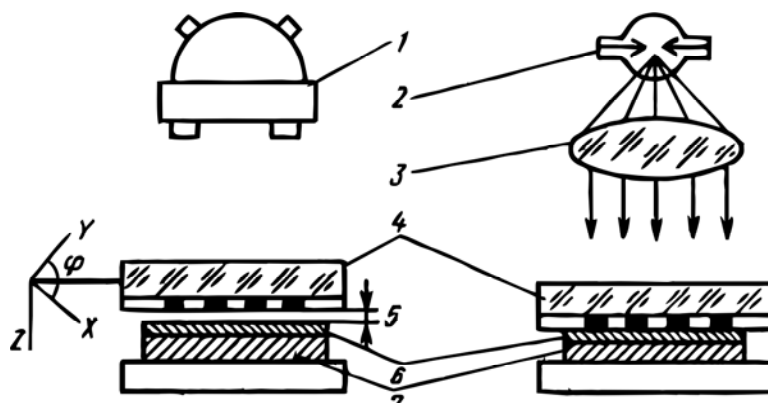


Рис. 8.13. Схема операций совмещения (а) и экспонирования (б) при контактной фотолитографии

1 – микроскоп; 2 – ртутная лампа; 3 – конденсор; 4 – фотошаблон; 5 – зазор; 6 – фоторезист; 7 – подложка.

Экспонирование и совмещение – операции, обеспечивающие перенос изображения с фотошаблона на пластину, – связаны между собой (рис. 8.13). Для получения точной передачи размеров изображения фотошаблона необходимо одновременно и взаимосвязано изменять и время экспонирования, и время проявления рисунка. Поскольку одинаково недопустимы как недодержки, так и передержки при экспонировании, оптимальная экспозиция определяется экспериментально. Характер дефектов при неправильно выбранной экспозиции в позитивных и негативных фоторезистах различен.

Недостаточная экспозиция.

Негативный фоторезист ,

– отслаивание резиста, растравливание рисунка, неровный край изображения, уменьшение толщины слоя фоторезиста

Позитивный фоторезист,

– остатки фоторезиста в экспонированном участке, заниженные размеры элементов, неровные края элементов изображения.

Избыточная экспозиция.

Негативный фоторезист,

– неровные края элементов изображения, заниженные размеры элементов, остатки фоторезиста в неэкспонированных участках.

Позитивный фоторезист,

– увеличение размеров элементов, нарушенные слои фоторезиста.

В качестве источников света при экспонировании (рис. 8.13) обычно используют ртутные лампы 2 высокого или сверхвысокого давления мощностью от 100 до 500 Вт, интенсивно излучающие в коротковолновой области спектра, что соответствует полосе максимальной чувствительности большинства фоторезистов (300 – 450 нм). Это излучение через конденсор 3 попадает на фотошаблон 4. При контактной фотолитографии разрешающая способность процесса во многом определяется надежностью контакта между экспонируемым резистом 6 и фотошаблоном 4. За счет зазора 5 между шаблоном и фоторезистом 6 возникает френелевская дифракция, размывающая контуры изображения. Для уменьшения зазора используют вакуумный или пневматический прижим шаблона к пластине 7 с нанесенным фоторезистом.

В современных прецизионных установках совмещения и экспонирования используются два метода совмещения: визуальный и фотоэлектрический. От выбора метода зависят точность, разрешение и производительность процесса. Аппаратурная точность совмещения может достигать $\pm 0,1$ мкм, хотя реально удается получать только $\pm (0,7 - 0,8)$ мкм. Для работы автоматических установок требуются специальные опорные знаки в виде непрозрачных штрихов на фотошаблоне и канавок, вытравленных на подложках. Ширина канавок должна быть в 2 – 4 раза больше ширины штриха.

Вначале с помощью микроскопа 1 оператор производит грубое совмещение, затем включается фотоэлектрическая система, выполняющая точное совмещение. Размер, форма и контрастность знаков совмещения играют решающую роль в обеспечении точности процесса.

Следует помнить, что при травлении размеры фигур совмещения меняются. Наиболее характерные типы фигур совмещения для контактной фотолитографии показаны на рис. 8.14. Важным обстоятельством, которое необходимо учитывать при оценке точности совмещения, является зависимость этого параметра от индивидуальных особенностей зрения оператора.

При проявлении скрытого изображения в фоторезистах удаляют ненужные участки слоя, после чего на поверхности пластины остается защитный рельеф, конфигурация которого соответствует рисунку на фотошаблоне.

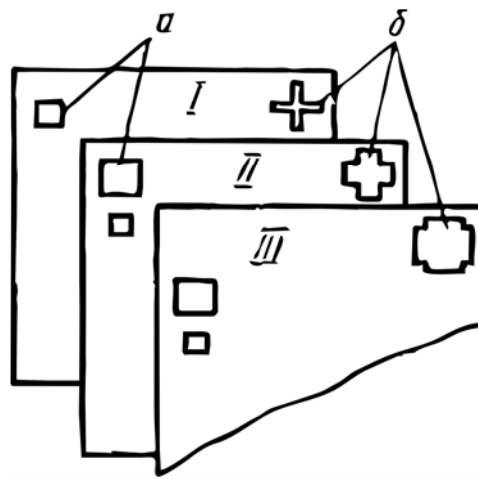


Рис. 8.14. Типы I, II, III фигур совмещения:
а – на пластине; б – на фотошаблоне

В качестве проявителей негативных резистов можно использовать диоксан, хлорбензол, трихлорэтилен, толуол.

При проявлении позитивных резистов применяют щелочные растворы: 0,3-0,5%-ый раствор КОН; 1-2%-ный раствор тринатрийфосфата Na_3PO_4 ; органические щелочи.

В процессе проявления важно контролировать температуру и значение рН проявителя. Изменение рН всего на 0,1 вызывает отклонение в размере элементов на ~10% от номинального значения.

Удаление экспонированных участков негативных резистов производят в органических растворителях, часто в тех же, на основе которых был составлен фоторезист.

Сушка проявленного слоя производится для удаления остатков проявителя и дополнительной тепловой полимеризации фоторезиста, улучшающей его защитные свойства, но не может быть применено для подложек с нанесенными металлическими слоями. При удалении фоторезистов с таких подложек применяют органические растворители.

При обработке резиста в среде кислорода при температуре 700–800 °С с большой скоростью происходит термическая и окислительная деструкция слоя. При одновременном освещении УФ-светом удается снизить температуру деструкции до 250 °С. Наилучшие результаты и наивысшую производительность обеспечивает плазмо-химический метод удаления фоторезиста в кислородной низкотемпературной плазме при давлении $5 \cdot 10^2$ Па. Если добавить в состав плазмообразующего газа 1 % водорода, это позволяет почти на 100 % увеличить скорость обработки за счет каталитического влияния H_2 на выход атомарного кислорода.

Все операции технологического цикла фотолитографии выполняют в специальных агрегатах, представляющих собой законченную технологическую линию. В состав линии входят: установка обезжиривания, установка нанесения фоторезиста, установка сушки фоторезиста, установка совмещения и установка экспонирования, установка проявления фоторезиста, установка контроля, установка сушки проявленного фоторезиста и задубливания, установка травления рельефа в подложке,

установка удаления фоторезиста, установка выходного контроля качества пластин после процесса фотолитографии.

Качество проведения каждой операции в процессе фотолитографии в основном определяет процент выхода годных изделий. Требования к качеству возрастают при переходе от дискретных приборов и микросхем со средним уровнем интеграции к большим интегральным схемам. Это связано с тем, что для БИС характерны большие критические площади, т. е. области, на которых появление локального дефекта приводит к выходу из строя микросхемы в целом.

Причины образования локальных дефектов: собственные загрязнения фоторезиста и реактивов (проявителя, травителей и др.); загрязнения, вносимые в результате деятельности операторов из окружающей среды (начиная от контакта с технологической тарой и оборудованием); низкое качество фотошаблонов (проколы, остатки покрытия в окнах, выколки стекла и др.); дефекты на поверхности подложки (загрязнения после отмывки, пирамиды роста (домики) на эпитаксиальных слоях); механические нарушения слоя фоторезиста вследствие попадания твердых частиц между резистом и шаблоном при контакте или вследствие неосторожного обращения с пластиной при транспортировке или манипулировании.

Причины неточной передачи размеров изображения: неоптимальные режимы проведения операций экспонирования, проявления, сушки и травления; неправильный подбор пары фоторезист – травитель для данного типа подложки; зазор между шаблоном и слоем фоторезиста из-за искривления пластины, попадания инородных частиц и др.

Проблема повышения качества изделий процесса фотолитографии может быть решена при комплексном подходе. Для этого на производстве необходимо создавать единую систему очистки и фильтрации, обеспечивающую не только тщательную фильтрацию фоторезиста и отмывку пластин и фотошаблонов, но и тонкую фильтрацию воздуха, всех газов, воды, реактивов. Только применение такой системы в условиях максимальной автоматизации процесса и организации автоматизированных систем контроля обеспечивает высокий процент выхода годных изделий.

8.4. Методы повышения качества формирования изображения

Повышение разрешающей способности оптической фотолитографии с одновременным увеличением диаметра рабочего поля является одной из важнейших задач современной технологии. В оптическом диапазоне длин волн даже при использовании самых совершенных безаберрационных объективов разрешение метода не лучше 0,50 мкм, что во многих случаях уже не удовлетворяет требованиям технологов при производстве БИС. Методы формирования изображения в различных регистрирующих материалах развиваются главным образом в трех направлениях: проекционная фотолитография, рентгенолитография, электролитография.

Проекционная фотолитография является одним из наиболее перспективных методов. Ее преимущества заключаются прежде всего в отсутствии механического контакта фотошаблона со слоем фоторезиста на

подложке: повреждения фотошаблона не происходит, и срок его службы значительно увеличивается. Проекционную фотолитографию осуществляют одновременной передачей всех элементов изображения фотошаблона на фоторезист (рис. 8.13), поэлементным (шаговым) переносом изображения; вычерчиванием изображения на слое фоторезиста сфокусированным лучом УФ-света.

В этом случае очень жесткие требования предъявляются к объективу проектора, который должен обеспечивать высокое разрешение на всем рабочем поле подложки.

Метод экспонирования на микрозоре обычно сочетает в себе достоинства контактного и проекционного методов фотолитографии. Сущность его заключается в том, что между пластиной и фотошаблоном с помощью специальных приспособлений устанавливается контролируемый зазор $\sim 10 - 20$ мкм, достаточно большой, чтобы свести к минимуму нежелательное явление френелевской дифракции, и в то же время достаточно малый, чтобы можно было пренебречь нелинейными искажениями в зазоре при передаче изображения. Отсутствие механического контакта с подложкой, как и в методе проекционной литографии, обеспечивает большой срок службы фотошаблона (рис. 8.13,а).

8.4.1. Рентгенолитография

Рентгенолитография (рис. 8. 15) – метод, позволяющий повысить разрешение за счет уменьшения дифракционного рассеяния (при использовании более коротких волн). В диапазоне рентгеновских длин волн наличие зазора между шаблоном и резистом при контактной печати практически не оказывает влияния на разрешение.

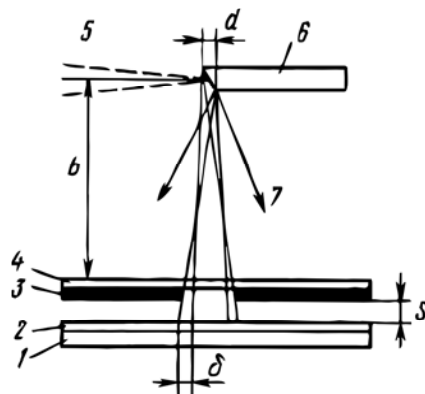


Рис. 8.15. Схема рентгенолитографии

d – диаметр пятна на аноде рентгеновской трубки; b – расстояние до шаблона; S – зазор между шаблоном и пластиной с нанесенным рентгенорезистом; δ – размытие края изображения

Пластину 1, покрытую слоем полиметилметакрилата 2, чувствительного к рентгеновскому излучению, помещают на небольшом расстоянии S под шаблоном 4, выполненным из кремния методом глубокого травления. Рисунок на шаблоне создается гравировкой по тонкому слою золота 3,

сильно поглощающего рентгеновское излучение в диапазоне длин волн 0,5 – 0,6 нм. Рентгеновское излучение получают под действием пучка электронов 5 в трубках с анодом 6, изготовленных из молибдена ($\lambda = 0,54$ нм), алюминия ($\lambda = 0,83$ нм), меди ($\lambda = 1,33$ нм) и т. д. Экспонирование производят расходящимся пучком 7. Схема экспонирования подобна схеме фотолитографии на микрозоре. Отсутствие дифракции позволяет получить минимальный размер линии 0,25 мкм при зазоре $S = 50$ ч – 60 мкм. Наличие зазора необходимо из-за малой механической прочности шаблона (рис. 8.18).

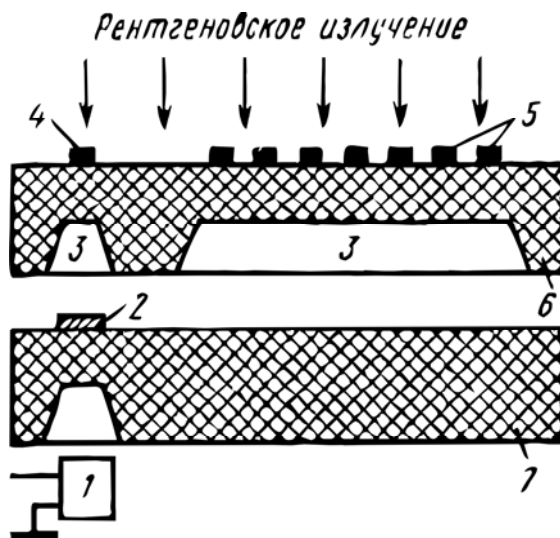


Рис. 8.16. Схема шаблона для рентгенолитографии:

1 – детектор рентгеновского излучения; 2, 4 – фигуры совмещения; 3 – окна в пластине кремния и шаблоне; 5 – изображение элементов в золотом слое; 6 – шаблон; 7 – экспонируемая пластина

Важной проблемой рентгенолитографии является разработка технологии изготовления рентгеношаблонов, которые должны отвечать определенным требованиям. Маска рентгеношаблона, нанесенная на тонкую мембрану, должна хорошо поглощать рентгеновское излучение, а мембрана должна обладать малым коэффициентом поглощения, достаточной механической прочностью и не давать усадок и искажений при изменении внешних условий.

Исходя из этих требований, маски формируют в виде тонких пленок Au, Pt, W, Mo, а мембраны изготавливают в виде тонких слоев Be, Si, SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃, их сочетаний или специальных безусадочных полимерных пленок.

Как правило, рентгеношаблоны выполняют на жестком каркасе (обычно – это селективно вытравленные кремниевые подложки), на который наносят мембрану. Изображения элементов на рентгеношаблоне создают электролитографией.

При рентгенолитографии следует учитывать также радиационные дефекты, которые возникают как в экспонируемых полупроводниковых подложках, так и в рентгеношаблонах. Дефекты, возникающие в формируемых в подложках транзисторных структурах, устраняют термическим отжигом. Высокие дозы рентгеновского излучения приводят к тому, что сроки использования рентгеношаблонов невелики.

Одним из достоинств рентгенолитографии является возможность получения структур субмикронных размеров с низким уровнем дефектности. Это объясняется тем, что загрязняющие частицы, как правило органические, существенно не ослабляют рентгеновское излучение при экспонировании, вследствие чего дефекты рентгеношаблона не переносятся на слой рентгенорезиста на подложке.

Технология изготовления шаблона состоит в следующем. В пластину кремния, ориентированную в плоскости (100), проводят диффузию бора на глубину 3-5 мкм, что должно соответствовать толщине маски, прозрачной для рентгеновских лучей. На легированной бором стороне формируют рисунок в слое золота или другом материале. Затем с обратной стороны кремний травят в анизотропном травителе – этилендиамин-пирокатехине, который быстро растворяет нелегированный кремний и практически не растворяет легированный материал. Процесс травления прекращается на границе с диффузионным слоем. Остающаяся тонкая перемычка обладает достаточной прочностью на площади 2,5 x 2,5 мм. Рентгенолитография обладает рядом преимуществ:

1. Высокая разрешающая способность. Ограничение разрешающей способности связано с конечными размерами источника рентгеновского излучения и с появлением оже- и фотоэлектронов при взаимодействии излучения с резистом. Первый эффект описывается формулой: $\delta = S(d/D)$, где δ – размытие края изображения; S – зазор между шаблоном и резистом; d – размер излучающего пятна на антикатоде рентгеновской трубки; D – расстояние от антикатада до резиста.

2. Отсутствие контакта с резистом.

3. Нечувствительность к загрязнениям.

4. Независимость от типа резиста; одинаковая разрешающая способность как на деструктурирующихся, так и на сшивающихся под действием рентгеновского излучения полимерах. Чаще на практике используют позитивный резист – полиметилметакрилат.

5. Простота и низкая стоимость метода в производстве по сравнению с другими методами формирования изображения.

К ограничениям метода следует отнести большое время экспонирования (до 20 – 30 мин), обусловленное малым поглощением рентгеновского излучения в применяемых резистах, и явление дисторсии проявленного изображения за счет искажения изображения на шаблоне. Дисторсия возникает вследствие остаточных напряжений в золотой маске. Ее значение составляет около 100 нм и может быть снижено при тщательном подборе режима нанесения золота. Рентгенолитографию следует рассматривать как один из наиболее перспективных методов литографии при изготовлении сверхбыстродействующих полупроводниковых приборов и ИМС.

8.4.2. Электролитография

Современные методы электролитографии позволяют получать разрешение 1 нм, что на 1,5 – 2 порядка превышает предельное разрешение

оптических методов. Разработано два метода электроннолучевой литографии: электронолитография со сканирующим сфокусированным пучком электронов и проекционная электронолитография (рис. 8.17). В первом случае используют растровые электронные микроскопы или специализированные электронно-лучевые установки.

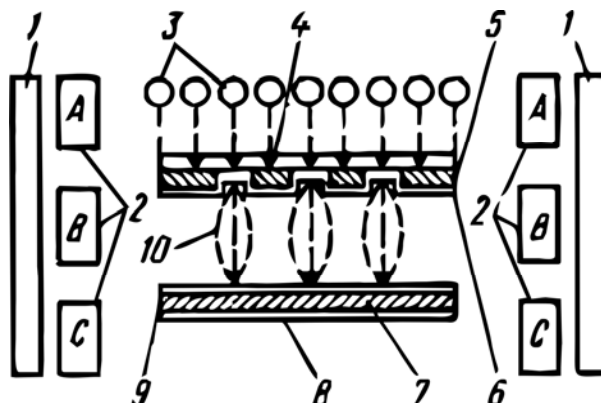


Рис.8.17. Схема проекционной электронолитографии

1 – отклоняющие катушки; 2 – фокусирующие катушки; 3 – УФ-лампы; 4 – кварцевая пластина; 5 – слой диоксида титана; 6 – слой палладия; 7 – 9 – окисленная пластина кремния с электронорезистом; 10 – траектория электронов.

Сканирование пучка осуществляют либо по всему растру с включением его в тех местах, которые должны быть проэкспонированы, либо перемещением пучка и экспонированием не по всей площади растра, а только по участкам, где необходимо получить изображение. И в том, и другом варианте управление током и перемещением пучка осуществляется с помощью ЭВМ. В некоторых типах растровых электронных микроскопов можно получать линии шириной до 0,1 мкм на площади до 20 см².

Основной недостаток систем электронолитографии со сканирующим пучком – большое время экспонирования, увеличивающееся с уменьшением ширины линии. Преимущества метода – отсутствие фотошаблонов и возможность автоматизации процесса.

В процессе проекционной электронолитографии экспонирование подложки с нанесенным на нее электроночувствительным слоем производят несфокусированным потоком электронов через свободную металлическую маску. Свободная маска не позволяет получать замкнутые кольцевые рисунки. Ввиду этого чаще используют потоки электронов с катодов заданной конфигурации.

Для создания фотокатодов на полированную пластину из плавленого кварца наносят слой титана, в котором формируют изображение. Вытравленные в титановом слое участки в дальнейшем служат источником фотоэлектронов. Затем титан окисляют до диоксида титана, поглощающего УФ-излучение, после чего на всю поверхность напыляют слой палладия толщиной около 4–5 нм. При освещении обратной стороны кварцевой пластины УФ-светом палладий эмиттирует электроны с малой энергией ~0,1 эВ. Плотность потока электронов невелика и составляет 100 мкА/см².

Ускоряющее поле напряженностью 10 кВ/см, фокусирующее магнитное поле, обеспечивают перенос изображения на резист в масштабе 1:1. Минимальная ширина линии 1 мкм, диаметр рабочего поля более 125 мм, время экспонирования составляет всего 5 с.

Ограничениями метода проекционной электролитографии являются трудность выполнения операции совмещения и необходимость создания сложных фотокатодов.

8.5. Метод самосовмещения

8.5.1 Изготовление МОП-транзисторов с кремниевыми затворами

Скорость переключения МОП-прибора связана со степенью легирования канала, длиной канала и емкостью затвора. Чтобы сделать скорость переключения максимальной, желательно использовать малую концентрацию примеси в канале с тем, чтобы минимизировать длину канала. Вообще же уменьшение размеров МОП-приборов увеличивает плотность упаковки и скорость переключения.

При изготовлении приборов с алюминиевым затвором длина канала определяется шаблоном. Длина канала лимитируется возможностями литографии; затвор должен перекрывать области истока и стока, чтобы компенсировать погрешности совмещения шаблонов. Излишнее перекрытие увеличивает емкости сток – затвор и исток – затвор, а это снижает быстродействие прибора.

Для уменьшения размеров и повышения быстродействия МОП ИМС с каналом n-типа была разработана технология самосовмещенного кремниевого затвора. В этой технологии совмещение канала с затвором не зависит от качества шаблона. Хотя пороговые напряжения по-прежнему регулируются ионным внедрением защитных областей и затвора, эти этапы в упрощенном описании технологии на рис. 8.18 не указаны. На рис. 8.18, б и в показан поликристаллический кремний, осажденный из парообразного состояния на поверхность оксида и затем протравленный так, чтобы остались только полосы затвора. На рис. 8.18, г и д показано удаление оксида в областях истока и стока. Для формирования областей истока и стока, а также для сильного легирования поликристаллического кремниевого затвора используется n^+ -диффузия. Так как примесь n^+ -типа не может проникнуть сквозь оксид затвора, канал совмещается с затвором. На рис. 8.19, е показаны осаждение из парообразного состояния слоя сильнолегированного фосфором оксида и перетекание его для сглаживания рельефа. Если бы этот оксид выращивался термическим способом, то на его образование расходовался бы кремний затвора. На рис. 8.18, ж и з показаны вскрытие окон под контакты и нанесение слоя алюминия. На рис. 8.19 показан вид сверху n-канального МОП-прибора с кремниевым затвором.

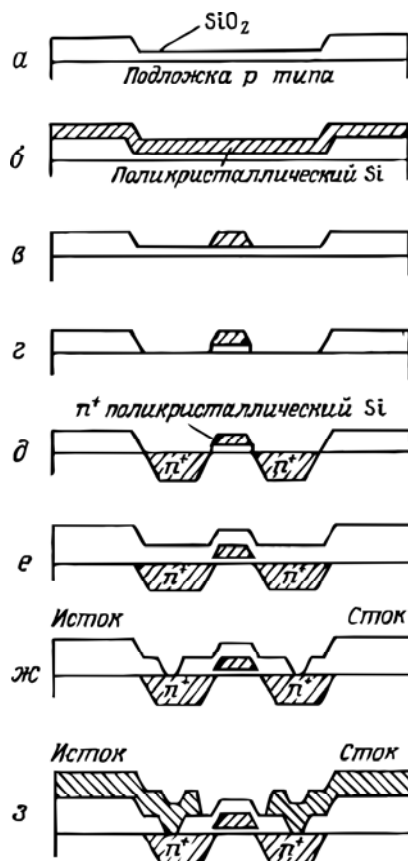


Рис. 8.18. Изготовление самосовмещенного кремниевого затвора для n -канального МОП-прибора.

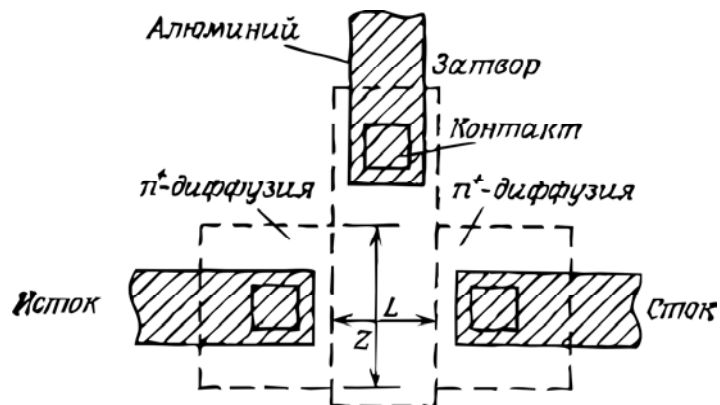


Рис. 8.19. Вид сверху n -канального МОП-транзистора с кремниевым затвором

Глава 9. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО–ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ МЕТОДОМ ДИФФУЗИИ

9.1. Основы диффузионной технологии

Для разработки технологических процессов формирования легированных областей диффузией необходимо прежде всего знать механизмы взаимодействия примесей, образующих тот или иной тип проводимости с полупроводником, распределение примесей в подложке, типы и состояние легирующих примесей, конструкции и принципы работы базовых узлов диффузионного оборудования, способ транспортировки примесей в высокотемпературную зону диффузии и др.

Диффузия – процесс хаотического переноса молекул или атомов вещества, вызванный наличием градиента концентрации. Этот процесс наблюдается в веществах (средах), находящихся в любом агрегатном состоянии при наличии градиента концентрации, но скорости диффузии зависят от состояния вещества ($v_{\text{тв}} \approx 10^{-9}$, $v_{\text{газ}} \approx 10^{-6}$). Если атомы примеси распределены неравномерно и существует градиент концентрации, то возникает направленный диффузионный поток, который стремится выровнять концентрацию. Аналогичное действие оказывает градиент температуры. Заметная диффузия в твердом теле происходит при температуре выше 1073 К. Особенности процессов диффузии применительно к изготовлению изделий интегральной электроники детально рассматриваются в разделах 9.9 – 9.18 данной главы.

9.2. Легирующие примеси и источники диффузии

Основными легирующими примесями в кремнии являются элементы III (акцепторы) и V (доноры) групп Периодической системы. Чаще всего для получения легированных областей p -типа используют бор, имеющий высокую предельную растворимость в кремнии, а для n -областей – фосфор.

В качестве донорных примесей можно использовать сурьму, мышьяк, а в качестве акцепторных – алюминий, галлий. Выбор примесей диктуется растворимостью элементов в полупроводнике, коэффициентом диффузии, способом маскировки и др. В последнее время возрос интерес к мышьяку как к легирующей примеси для создания скрытого слоя в коллекторных областях ИМС. Есть сведения об использовании для создания скрытых сильнолегированных слоев сурьмы и фосфора.

Диффузия акцепторных и донорных примесей, т. е. формирование областей с различным типом проводимости в полупроводниковых структурах, может производиться последовательно или одновременно. При формировании n - p - n -транзисторов одновременной диффузией необходимо, чтобы коэффициенты диффузии находились в соотношении $D_n \ll D_p$, а пределы растворимости – в соотношении $N_n \gg N_p$. Для p - n - p – транзисторов эти соотношения должны быть противоположными. Если сравнить радиусы,

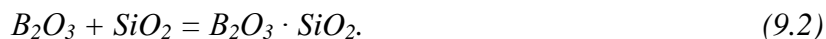
например, Si (0,117 нм) и примесей, то нетрудно заметить, что примеси P (0,110 нм), B (0,089 нм), C (0,077 нм) при внедрении вызывают сжатие решетки кремния, а примеси с большим радиусом Sb (0,141 нм), Ge (0,122 нм), As (0,121 нм), чем у Si, вызывают расширение его решетки. Это приводит к возникновению напряжений, деформации решетки и дефектов в решетке, что особенно критично при высоких плотностях примесей $\sim 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Устранить возникновение таких явлений можно путем компенсации напряжений (деформаций), вызванных примесями одного сорта (P, B, C), примесями другого сорта (Sb, Ge, As), электрически нейтральными примесями или одноименной примесью. Относительные концентрации примесей подбирают в соответствии с правилом Вегерда:

$$\varepsilon = \beta N_m, \beta = \left\{ \left(\frac{r_m}{r_0} \right)^3 - 1 \right\} N_0, \quad (9.1)$$

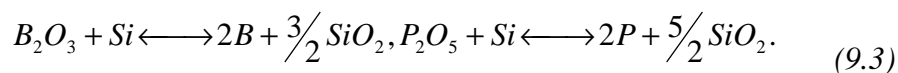
где ε – упругая деформация решетки; N_m – концентрация примеси; β – коэффициент примесного сжатия решетки; r_m и r_0 – атомные радиусы примеси и полупроводника; N_0 – атомная плотность полупроводника ($5,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ для Si).

В качестве источников примеси могут быть газы, жидкости, твердые тела, чистые вещества и химические соединения. Наибольшее распространение получили газы: PH_3 , BCl_3 , AsH_3 , B_2H_6 ($T_{\text{ист}} = 283 - 303 \text{ K}$); жидкости: POCl_3 , PB_3 , PCl_3 , BB_3 ($T_{\text{ист}} = 275 - 473 \text{ K}$), твердые тела: B, B_2O_3 , Sb_2O_3 , As_2O_5 , P_2O_5 , легированные пленки и др.

Диффузия, как правило, происходит в окислительной среде, вызывающей образование диэлектрических пленок, диффузию примесей в полупроводник и кислорода через выросшую пленку. Газообразная примесь взаимодействует с кислородом и SiO_2 с образованием примесно-силикатных стекол:



На границе окисел – кремний протекает окислительно-восстановительная реакция с образованием элементарной примеси, диффундирующей в кремний:



В последнее время широкое распространение приобретает метод диффузии из легированных пленок, наносимых на поверхность полупроводника при относительно низких температурах. В этом методе источниками диффузии могут служить легированные фосфором или бромом пленки, боросиликатные (B), фосфорносиликатные (P) стекла, мышьяко-фосфоро-боросиликатные (As), SiO_2 (P + B) стекла.

9.3. Технология проведения процессов диффузии

Технологическое оформление процессов диффузии для получения легированных областей весьма разнообразно. При диффузии можно использовать различные источники примесных материалов и различные способы нанесения их на поверхность полупроводника.

Существует несколько способов проведения диффузии:

- в замкнутом объеме;
- в незамкнутом объеме (в открытой трубе, в потоке газа-носителя);
- в частично-замкнутом объеме;
- из твердых источников.

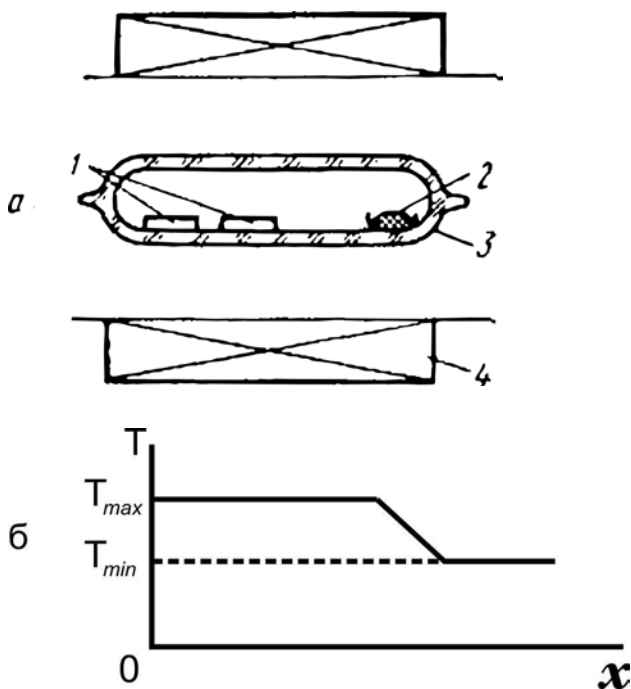


Рис. 9.1. Схема процесса диффузии в замкнутом объеме (а) и распределение температуры в двухзонной печи (б)

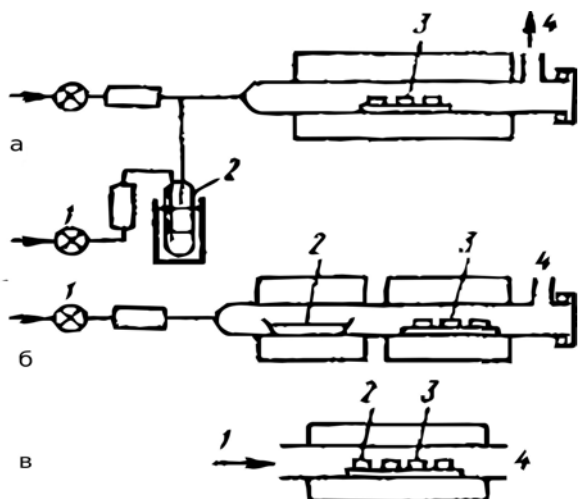


Рис. 9.2. Схемы проведения диффузионных процессов в открытой трубе

Способ диффузии в замкнутом объеме (рис. 9.1) заключается в следующем. Пластины кремния помещают совместно с некоторым количеством примеси в кварцевую ампулу, которая откачивается до давления

10^{-2} – 10^{-3} Па и запаивается. В некоторых случаях ампула заполняется перед запайкой чистым инертным газом. Ампулу выдерживают при температуре 1173–1573 К определенное время, в течение которого идет процесс диффузии газообразной примеси в кремний на рассчитанную глубину.

Поверхностную концентрацию примеси при данном методе диффузии можно менять в широких пределах, меняя концентрацию примеси в газовой фазе, т. е. давление паров. Возможность такого управления процессом диффузии является достоинством метода. Для изменения давления паров можно использовать замкнутую систему, представляющую собой эвакуированную кварцевую ампулу с отростком, в котором находится источник примеси. При этом температура источника может регулироваться независимо от температуры пластин кремния.

Недостаток метода диффузии в замкнутом объеме – низкая производительность и высокая стоимость процесса, так как при вскрытии ампулы разрушается. Кроме того, посторонние вещества при загрузке примесей могут захватываться системой и диффундировать вместе с основными примесями.

Диффузия в незамкнутом объеме (способ открытой трубы или способ диффузии в газе–носителе) широко применяется в производстве ИМС (рис 9.2). Метод позволяет решать многие технологические задачи, так как, изменяя состав газа–носителя, содержание влаги в нем, температуру пластин кремния и температуру источника, можно эффективно управлять распределением концентрации примеси в диффузионном слое. При этом способе возможно использование твердых, жидких и газообразных источников диффузанта, причем предпочтение отдается жидким источникам. Наиболее широко применяются трихлорид фосфора (PCl_3) и трибромид бора (BBr_3). Эти диффузаны характеризуются высокой растворимостью в кремнии и высокой (и почти одинаковой) скоростью диффузии. Диффузант к пластине переносится инертным газом–носителем.

Сущность способа диффузии в незамкнутом объеме заключается в следующем. В трубе создается сильный поток инертного газа (например, азота). В ходе осаждения примеси через источник или над ним пропускается слабый поток азота. Для защиты поверхности кремния и облегчения превращения PCl_3 в P_2O_5 (BBr_3 в B_2O_3) в поток вводится небольшое количество кислорода. Диффузия проходит так же, как и при использовании внешнего источника P_2O_5 (BaO_3). Метод в открытой трубе с использованием газа–носителя дает возможность получать р – n–переходы с высокой воспроизводимостью электрических характеристик.

Для обеспечения лучшего управления процессом диффузии и предохранения поверхности кремниевых пластин от разрушения процесс диффузии обычно ведут в два этапа: на первом этапе примеси осаждаются на поверхность кремниевой пластины и диффундируют в нее на небольшую глубину, а на втором этапе производится окончательная диффузия на нужную глубину. Во время второго этапа нагрев осуществляется в окислительной среде, благодаря которой на поверхности образуется защитный слой SiO_2 , предохраняющий поверхность кремния от дальнейшего проникновения примесей. Кроме этого, наличие окислительной среды

позволяет проводить длительную диффузию при высокой температуре (1473 К) без существенного ухудшения состояния поверхности кремниевых пластин. Выращенный во время второго этапа оксидный слой используется также и для маскирования во время дальнейшей обработки.

Способ диффузии в частично-замкнутом объеме является промежуточным между методом диффузии в замкнутом объеме и методом открытой трубы. Вместо герметичных ампул используются контейнеры с определенной величиной испарения примесей, в которые помещают пластины кремния и источник диффузанта. В качестве источника применяют оксиды примеси, растворенные в SiO_2 . Испарение примесей приводит к постепенному обеднению источника и уменьшению давления паров примеси. Используя этот способ, можно в широких пределах регулировать величину поверхностной концентрации примеси, изменяя ее количество в источнике.

В последнее время широкое распространение получил новый метод диффузии из твердых источников. Сущность метода заключается в нанесении легированных одним или двумя компонентами пленок на поверхность полупроводника при низких температурах с последующей диффузией примесей при высоких температурах. Нанесение пленок можно осуществлять одним из низкотемпературных методов, например пиролизом с добавлением легирующих веществ, методом контролируемого окисления, анодированием, термическим напылением легированного поликристаллического кремния и др.

Для примера рассмотрим одновременную диффузию мышьяка и фосфора, имеющих разные ковалентные радиусы, из пленки SiO_2 , легированной этими примесями. Слой SiO_2 осаждают методом окисления моносилана кислородом. Изменение AsH_3 и PH_3 в газовой фазе вызывает изменение концентрации мышьяка и фосфора в диффузионном слое. В диффузионном слое происходит изменение плотности дислокаций. Минимальную плотность дислокаций достигают при отношении концентрации в газовой фазе $\text{PH}_3:\text{AsH}_3 = 4:1$, что соответствует соотношению поверхностных концентраций фосфора и мышьяка в кремнии $N_S(\text{P}) : N_S(\text{As}) = 15 : 1$. Число возникших дефектов при одновременной диффузии мышьяка и фосфора в кремнии, ориентированном в плоскости (111), меньше, чем при диффузии одного фосфора, примерно на два порядка. Предполагается, что главным является механизм диффузии, в результате которого атомы мышьяка, находящиеся в междоузлиях, вызывают расширение решетки кремния, которое компенсирует сжатие решетки, возникающее за счет атомов фосфора в узлах. Возможно также, что перемещение атомов кремния затруднено атомами мышьяка, находящимися в междоузлиях, а следовательно, затруднены генерация и движение дислокаций. Такой механизм диффузии позволяет совершенствовать частотные, шумовые и другие параметры полупроводниковых ИМС.

Метод одновременной диффузии из твердых источников обладает следующими достоинствами: уменьшение общего времени высокотемпературной обработки полупроводниковых структур, возможность контролируемого изменения поверхностной концентрации примеси в широких пределах, снижение нарушений структуры, вводимых при

диффузии, возможность одновременного создания двух $p-n$ -переходов, простота технологического процесса и оборудования.

9.4. Контроль параметров диффузионных слоев

Контроль диффузионных слоев проводится в основном по таким параметрам, как глубина залегания сформированного $p-n$ -перехода, проводимость поверхностного слоя и поверхностная концентрация атомов примеси.

Наиболее распространенным методом контроля глубины залегания $p-n$ -перехода является метод окрашивания шлифа. Для измерения глубины залегания примеси порядка единиц микрометра и менее удобно использовать сферический шлиф.

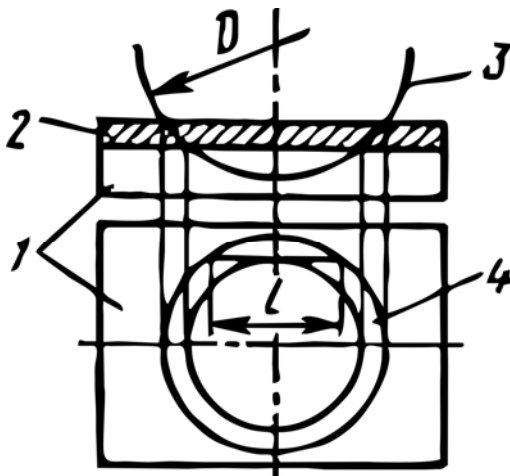


Рис. 9.3. Схема процесса изготовления сферического шлифа на пластине с диффузионным слоем:

- 1 – пластина полупроводника; 2 – $p-n$ -перехою;
- 3 – стальной шар; 4 – окрашенная p -область шлифа

Его изготавливают при вращении стального шара диаметром 35 – 100 мм, прижимаемого к поверхности пластины. Образование сферы происходит за счет того, что в место контакта вращающийся шар – кристаллическая пластина подают абразивную суспензию или наносят на поверхность шара алмазный порошок в виде эмульсии. Для большей точности измерения диаметр зерна абразивного материала не должен превышать 1 мкм. Чтобы выявить границы $p-n$ -перехода, глубина сферической лунки должна быть больше глубины залегания $p-n$ -перехода. Границу выявляют по окрашиванию (потемнению) p -области вследствие окисления в травителе, состоящем из 48 %-ной плавиковой кислоты с небольшой добавкой (до 0,05–0,1 %) 70 %-ной азотной кислоты.

Глубина залегания диффузионного $p-n$ -перехода:

$$x_i = l^2/(4D) \quad (9.4)$$

где l – длина хорды контура сферического шлифа (рис.9.3), измеряемая с помощью микроскопа; D – диаметр шара.

Для повышения точности измерений изготавливают несколько шлифов (до 5), а полученные результаты усредняют.

Наиболее распространенным методом измерения поверхностного сопротивления является четырехзондовый метод. Погрешность измерения поверхностного сопротивления обычно не превышает 5 – 10 %. Для определения поверхностной концентрации легирующей примеси необходимо знать характер распределения примесей в диффузионной области, который зависит от условий проведения процесса.

9.5. Ионная имплантация

Ионной имплантацией (ионным легированием) называется процесс внедрения в мишень ионизованных атомов с энергией, достаточной для проникновения в ее приповерхностные области. Успешное применение ионной имплантации определяется главным образом возможностью предсказания и управления электрическими и механическими свойствами формируемых элементов при заданных условиях имплантации.

9.5.1. Назначение и применение ионной имплантации

Наиболее распространенным применением ионной имплантации в технологии формирования ИМС является процесс ионного легирования кремния. Часто приходится проводить имплантацию атомов в подложку, которая покрыта одним или несколькими слоями различных материалов. Ими могут быть как тонкие слои тяжелых металлов (например, Та или силицида тантала $TaSi_2$), так и диэлектриков. Существование многослойной структуры может вызвать резкие перепады в профиле легирования на границе отдельных слоев. За счет столкновения ионов с атомами приповерхностных слоев последние могут быть выбиты в более глубокие области легируемого материала. Такие "осколочные эффекты" способны вызвать ухудшение электрических характеристик готовых приборов.

Во многих случаях для получения необходимого профиля распределения легирующей примеси в подложке применяют метод, основанный на предварительной загонке ионов с их последующей термической разгонкой в мишени. При этом имплантация проводится с малой энергией ионов.

Общая траектория движения иона называется длиной пробега R , а расстояние, проходимое внедряемым ионом до остановки в направлении, перпендикулярном к поверхности мишени, проецированной длиной пробега R_p .

9.5.2. Применение ионной имплантации в технологии СБИС. Создание мелких переходов

Требование формирования n^+ слоев, залегающих на небольшой глубине, для СБИС можно легко удовлетворить с помощью процесса ионной имплантации As. Мышьяк имеет очень малую длину проецированного пробега (30 нм) при проведении обычной имплантации с энергией ионов 50 кэВ.

Одной из прогрессивных тенденций развития СБИС является создание КМОП– транзисторов. В связи с этим большое значение имеет получение мелких p^+ – слоев. Такие слои очень сложно сформировать путем имплантации ионов B^+ .

Решение проблемы, связанной с имплантацией бора на небольшую глубину, на практике облегчается использованием в качестве имплантируемых частиц BF_2 . Диссоциация молекулы BF_2^+ при первом атомном столкновении приводит к образованию низкоэнергетических атомов бора. Кроме того, использование молекулы BF_2 имеет преимущество при проведении процесса отжига структур.

9.6. Геттерирование

Процесс геттерирования основан на трех физических эффектах:

- освобождении примесей или разложении протяженных дефектов на составные части;
- диффузии примесей или миграции дислокаций;
- поглощении примесей или собственных межузельных атомов некоторым стоком.

Рассмотрим четыре основных механизма геттерирования примесей.

1. Образование пар ионов. Диффузия фосфора является эффективным методом геттерирования. Профиль распределения таких примесей, как медь, которая в основном находится в междоузлиях в решетке нелегированного кремния и диффундирует по междоузельному механизму, принимает форму диффузионного профиля распределения фосфора. Атомы меди занимают положения в узлах кристаллической решетки кремния в области, легированной фосфором, а затем захватываются вакансиями, расположенными около атомов фосфора, образуя пары P^+Cu^- . Энергия связи и коэффициент диффузии ионных пар определяются обоими ионами.

2. Геттерирование с использованием нарушенных слоев. Геттерирующее действие дефектов было исследовано с использованием пескоструйной обработки, механического абразивного воздействия ультразвуком или шлифованием. Особенности дефектов зависят от концентрации и вида имплантированных атомов.

Оптимальная температура геттерирования определяется для каждого конкретного случая. Время жизни неосновных носителей в слое, имплантированном аргоном, существенно увеличивается после отжига при температуре 850 °С.

3. Внутреннее геттерирование. Геттером может служить преципитаты SiO_x и комплексы дислокаций, присутствующие в объеме кремниевой подложки после имплантации в нее кислорода. Воздействие этих преципитатов на дислокации приводит к тому, что последние действуют в

качестве стока для примесей тяжелых металлов, при этом поверхностные области освобождаются от дефектов.

9.7. Эффекты, используемые в технологии СБИС

При высокой дозе имплантированного азота скорость окисления кремния уменьшается из-за образования нитрида кремния, тогда как появление дефектов, вводимых при имплантации В, Ar, As, Sb может привести к увеличению скорости окисления. С помощью этих эффектов можно изменять толщину оксида в различных областях СБИС.

В другом случае оксиды с поврежденной поверхностью используются для уменьшения толщины маски по краям вытравленных в маске окон, при этом поверхностная область стравливается быстрее, чем бездефектные участки.

9.7.1. Оборудование для ионной имплантации

Магнитный масс-спектрометр предназначен для формирования пучка легирующих ионов, электрометр – для измерения величины имплантированного потока ионов. Маски для ионной имплантации могут быть изготовлены из любых материалов, используемых в технологии СБИС (фоторезист, нитриды, оксиды, поликремний и др.).

Управление дозой при ионной имплантации затруднено рядом факторов. Это наличие потока нейтральных частиц, обмен энергией ионов с молекулами газов, вторичная электронная эмиссия из подложки, эффект обратного ионного распыления.

Для ликвидации последствий действия этих факторов используют следующие технические приемы. Нейтральные молекулы отсеивают с помощью масс-спектрометра (его магнитное поле не отклоняет нейтральные частицы, и они не попадают в апертурную диафрагму). Кроме этого, в камере поддерживается достаточно высокий вакуум, предотвращающий процесс нейтрализации ионов. Вторичную электронную эмиссию подавляют, располагая около подложки ловушку Фарадея.

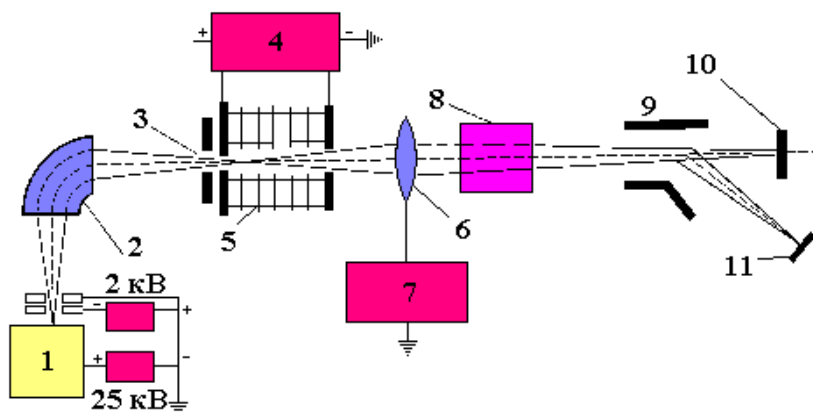


Рис. 9.4. Схема установки для ионной имплантации

1 – источник ионов, 2 – масс–спектрометр, 3 – диафрагма, 4 – источник высокого напряжения, 5 – ускоряющая трубка, 6 – линзы, 7 – источник питания линз, 8 – система отклонения луча по вертикали и система отклонения луча, 9 – система отклонения луча по горизонтали, 10 – мишень для поглощения нейтральных частиц, 11 – подложка

Во избежание загрязнений поверхности кремния вследствие полимеризации углеводов ионную имплантацию проводят через оксидную пленку, которую затем удаляют.

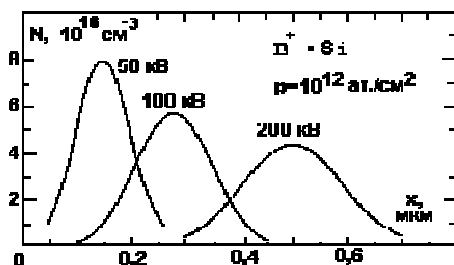


Рис. 9.5. Профиль распределения примеси при ионной имплантации бора различных энергий в кремний

Для корректного теоретического расчета профиля, особенно для больших значений энергий пучков ионов, используют два объединенных распределения Гаусса:

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi(\Delta R_{p1} + \Delta R_{p2})}} \exp\left(-\frac{(x - R_m)^2}{2\Delta R_{pi}^2}\right) \quad (9.5)$$

Где D – поглощенная доза, R_m – модальная длина пробега (аналог проекционной длины пробега при Гауссовом распределении), ΔR_1 , ΔR_2 – флуктуации первого и второго распределения, $\Delta R_i = \Delta R_1$ при $x > R_m$, $\Delta R_i = \Delta R_2$ при $x \leq R_m$.

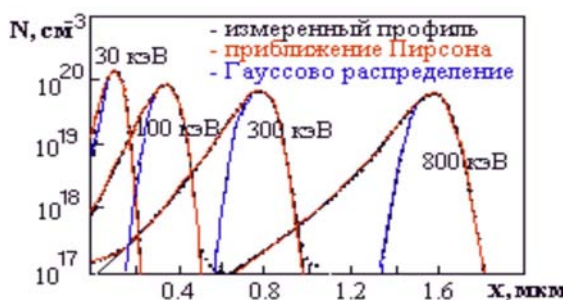


Рис. 9.6. Теоретические профили, рассчитанные по приближению Пирсона с 4 параметрами и распределению Гаусса, и измеренные профили при ионной имплантации бора в кремний без проведения отжига

9.7.2. Механизм проникновения ионов в подложку

Распределение внедренных атомов по глубине подложки оценивается с помощью симметричной функции распределения Гаусса:

$$n(x) = n(R_p) \exp\left[\frac{-(x - R_p)}{2\Delta R_p^2}\right] \quad (9.6)$$

Максимизируем её на расстоянии $x = R_p$

$$\varphi = \int_0^x n(x) dx \quad (9.7)$$

через дозу

$$n(R_p) = \frac{\varphi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \approx \frac{0,4\varphi}{\Delta R_p} \quad (9.8)$$

где R – общая длина пробега; R_p – проецированная длина пробега; ΔR_p – флуктуации величины; $R_p \Delta R_p$ – боковое рассеяние.

Оказалось, что экспериментальные профили не симметричны. Для учета несимметрии необходимо более тщательное исследование профилей распределения ионов.

9.8. Дефекты ионного легирования и способы их устранения

9.8.1. Ионное каналирование

Эффект каналирования наблюдается при попадании иона в свободное пространство между рядами атомов. Как только ион попадает в это пространство, на него начинают действовать потенциальные силы атомных рядов, направляющие его в центр канала. В результате этого ион продвигается на значительные расстояния. Такой ион постепенно теряет энергию за счет слабых скользящих столкновений со стенками канала и, в конце концов, останавливается. Расстояние, проходимое ионом в канале, может в несколько раз превышать длину пробега иона в аморфной мишени.

Эффект каналирования характеризуется наличием "хвостов" концентрации внедряемых ионов, выявляемых с помощью метода масспектрометрии вторичных ионов и "хвостов" концентрации свободных носителей зарядов, обнаруживаемых при проведении электрических измерений. Попытки устранения эффекта каналирования путем ориентации кремниевой монокристаллической подложки в наиболее плотно упакованных направлениях сводят его к минимуму, но не исключают полностью.

Были сделаны попытки практического использования эффекта каналирования при имплантации примеси на большую глубину. Однако в этом случае значительно затруднены управление профилем распределения имплантируемой примеси и получение воспроизводимых результатов из-за очень высоких требований к точности разориентации ионного пучка относительно основных кристаллографических направлений в подложке.

9.8.2. Радиационные дефекты

При внедрении ионов в кремниевую кристаллическую подложку они подвергаются электронным и атомным столкновениям, однако, только атомные взаимодействия приводят к смещению атомов кремния. Легкие и тяжелые ионы производят качественно различное "дерево радиационных дефектов".

Легкие ионы при внедрении в подложку первоначально испытывают в основном электронное торможение. На профиле распределения смещенных атомов по глубине подложки существует скрытый максимум концентрации. При внедрении тяжелых ионов они сразу начинают сильно тормозиться атомами подложки.

Тяжелые ионы смещают большое количество атомов подложки из узлов кристаллической решетки вблизи ее поверхности. На окончательном профиле распределение плотности радиационных дефектов, который повторяет распределение длин пробега выбитых атомов подложки, существует широкий скрытый пик. Сложная структура различных типов дефектов вдоль траектории движения иона вызвана распределением смещенных атомов подложки.

Вводимые в процессе ионной имплантации дефекты состоят из вакансий и дивакансий. При нагреве подложки пучком ионов в процессе имплантации до температуры выше 500 °С будут образовываться дислокации.

При внедрении ионов они подвергаются электронным и атомным столкновениям. Только атомные столкновения ведут к смещению атомов подложки.

Длительность столкновения иона и атома подложки не превышает 10^{-13} с; через 10^{-12} с тепловые колебания атомов решетки возвращаются к равновесным; за 10^{-19} с релаксируют нестабильные нарушения кристаллической структуры.

Легкие ионы ^{11}B испытывают в основном электронное торможение. Тяжелые ионы ^{31}P или ^{75}As тормозятся атомами подложки.

В зависимости от энергии переданной атому подложки (ΔE) различают следующие случаи (E_d – энергия смещения атома): если $\Delta E < E_d$, то смещения атома не происходит; если $\Delta E > E_d$, то образуются простые точечные дефекты; если $\Delta E \gg E_d$, то наряду с формированием стабильных дефектов и вторичным перемещением атомов образуются и кластеры дефектов.

Количество атомов примеси замещающих атомы подложки соответствует точно количеству падающих ионов после их торможения в подложке. Однако радиационные дефекты создают большее число энергетических состояний с глубокими уровнями, чем количество имплантируемых атомов, что делает необходимым отжиг структур после имплантации.

Природа реальных нарушений кристаллической решетки сложна и зависит от материала подложки и вида внедряемых ионов, температуры, ориентации поверхности подложки и т.д. Общая энергия ионов, вносящая вклад в смещение атомов может быть оценена при предположении, что

каналирование, тепловая диффузия и эффекты насыщения незначительны в процессе торможения.

9.9. Отжиг легированных структур

9.9.1. Изохорный отжиг структур, имплантированных бором

Весь диапазон температур отжига разбит на три области. В первой области используется относительно низкая температура отжига, так отжиг при температуре 500°C приводит к ликвидации таких точечных дефектов в кремнии, как дивакансии. Во второй области отжиг производится в диапазоне $500^{\circ}\text{C} < T < 600^{\circ}\text{C}$, при этом в решетке кремния бор содержится в меньшей концентрации в узлах кристаллической решетки и в большей концентрации в междоузлиях. В третьей области при температурах $T > 600^{\circ}\text{C}$ за счет увеличения числа кремниевых вакансий и их замещения атомами бора концентрация атомов примеси увеличивается. При дозах имплантированных ионов 10^{12} см^{-2} полный отжиг, приводящий к расположению внедряемой примеси в узлах решетки кремния, происходит при $T=800^{\circ}\text{C}$ в течение нескольких минут.

9.9.2. Изохорный отжиг структур, имплантированных фосфором

Режимы отжига кремния имплантированного при комнатной температуре фосфором, определяются в зависимости от количества внедренной примеси. Доза имплантируемого фосфора от $3 \cdot 10^{12}$ до $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ требует проведения отжига при температурах $T > 800^{\circ}\text{C}$ для устранения более сложных радиационных дефектов по сравнению с отжигом слоев, имплантированных бором. Когда имплантированный слой фосфора становится аморфным (при дозе выше $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), начинает действовать другой механизм отжига. Температура отжига при этом несколько меньше, чем для кристаллических слоев и составляет 600°C . Более сложные процессы происходят при отжиге скрытых слоев с аморфной структурой, расположенных на определенной глубине под поверхностью подложки. Эпитаксиальная перекристаллизация начинается на обеих поверхностях раздела аморфных и монокристаллических областей.

9.9.3. Изотермический отжиг

Дополнительная информация о характере распределения имплантированных примесей может быть получена при проведении отжига при постоянной температуре, но в течение различного времени. По мере увеличения времени отжига электрическая активность легирующей примеси возрастает относительно медленно; при этом доля электрически активных атомов бора повышается от нескольких процентов атомов в узлах кристаллической решетки до величины, когда в узлах решетки размещается более 90% внедренной примеси. Энергия активации соответствует генерации и миграции термически введенных вакансий. Термически генерированные

вакансии мигрируют к междоузлиям. При этом происходит расположение атомов бора в узлах кристаллической решетки.

9.9.4. Диффузия имплантированных примесей

Коэффициент диффузии бора может быть повышен за счет уменьшения количества вакансий и междоузельных кластеров, при этом уменьшение вакансий увеличивает диффузию по узлам кристаллической решетки, а уменьшение междоузельных атомов способствует вытеснению атомов бора из узлов кристаллической решетки, что приводит к быстрой диффузии комплексов междоузельный атом кремния – атом бора.

9.9.5. Быстрый отжиг

Имплантированные слои могут быть подвергнуты лазерному отжигу с плотностью энергии в диапазоне 1–100 Дж/см². Вследствие короткого времени нагрева имплантированные слои могут быть термообработаны при отсутствии диффузии примеси. Имплантированные аморфные слои толщиной 100 нм перекристаллизуются в течение нескольких секунд при $T = 800$ °С по механизму твердофазной эпитаксии. Процесс быстрого отжига относится к категориям чистых процессов, и загрязнения материалами элементов конструкций оборудования не происходит. Лазерная энергия может быть локализована на отдельной части кристалла ИМС, при этом некоторые p – n переходы микросхемы в этой части кристалла могут размываться во время отжига за счет диффузии примеси в большей степени, чем другие не подвергнутые лазерной обработке. Значительное преимущество метода обусловлено тем, что после расплавления аморфных слоев и кристаллизации по методу жидкофазной эпитаксии в эпитаксиальных слоях отсутствуют линейные дефекты. С использованием технологии лазерного отжига создают биполярные и МОП–транзисторы, ИМС, кремниевые солнечные батареи.

9.9.6. Отжиг в атмосфере кислорода

Процессы отжига, в результате которых все имплантированные ионы занимают электрически активные положения в узлах кристаллической решетки, обычно приводят к возникновению микродефектов. Эти дефекты называют вторичными дефектами. Любые образовавшиеся микродефекты приводят к образованию дислокаций и дефектов упаковки. Эти дефекты, называемые третичными дефектами, имеют достаточно большие линейные размеры, достигающие десятков мкм.

9.10. Диффузия.

9.10.1. Назначение и задачи диффузии

Диффузия в полупроводниках это процесс последовательного перемещения атомов примеси в кристаллической решетке, обусловленного

тепловым движением. Для изготовления $p-n$ перехода используется термическая диффузия примесных атомов, которые вводятся в кристаллическую решетку вещества для изменения его электрофизических свойств. Перемещение примеси в решетке происходит посредством последовательных скачков, осуществляемых в трех направлениях.

При наличии градиента концентрации собственных или примесных атомов на их диффузию оказывают влияние точечные дефекты.

Задачи технологического этапа диффузии:

- управление концентрацией легирующей примеси в подложке;
- обеспечение однородности легирования;
- обеспечение воспроизводимости процесса;
- увеличение числа подложек, подвергаемых одновременному легированию, для снижения себестоимости продукции.

Назначение диффузии:

- формирование базовых и эмиттерных областей и диффузионных резисторов в биполярной технологии;
- создание областей истока и стока в МОП технологии;
- легирование поликристаллического кремния.

Способы диффузии:

- диффузия из неограниченного источника в газовой фазе при высоких температурах;
- диффузия из легированных оксидов;
- диффузия из ионно–имплантированных слоев при последующем отжиге (проводится для активирования имплантированных атомов и уменьшения числа дефектов).

Изучение диффузии ведется в направлении создания на основе экспериментальных данных точных моделей, способных предсказывать протекание процесса диффузии путем теоретического анализа. Конечная цель этого анализа – обеспечение формирования электрических характеристик полупроводниковых приборов на основе выбора параметров технологического процесса расчетным путем.

9.10.2. Модели и механизмы диффузии

Изучение диффузии ведется в направлении создания на основе экспериментальных данных точных моделей, которые давали бы возможность предсказать протекание процесса диффузии путем теоретического анализа. Конечная цель – возможность расчетным путем определять электрические характеристики изделий электроники на основе задаваемых технологических параметров процесса диффузии.

Диффузионные модели развивались с позиций двух основных приближений:

1. Теории сплошных сред с использованием уравнений диффузии Фика. Адекватность модели, исходя из диффузионного уравнения Фика и соответственно коэффициента диффузии, контролируется экспериментально путем измерения поверхностной концентрации.

2. Атомистическая теория, которая принимает во внимание взаимодействие между собственными точечными дефектами (вакансиями и междоузельными атомами) с одной стороны и примесными атомами с другой.

Перераспределение легирующих примесей на границе раздела фаз:

Легирующая примесь, первоначально располагавшаяся в одной части кремния, будет перераспределяться в другую часть до тех пор, пока ее химический потенциал не выровняется по обеим сторонам границы раздела областей, что может привести к сглаживанию профиля концентрации примесей в объеме кремния.

Равновесный коэффициент – отношение концентрации легирующей примеси в Si к концентрации примеси в SiO₂. Он определяется экспериментальным путем и может отличаться от равновесного значения и зависит от:

- химических потенциалов на границе раздела сред;
- кинетики перераспределения примеси в контактирующих слоях;
- коэффициентов диффузии;
- вида примесей в контактирующих слоях.

К основным механизмам диффузии относят:

- [вакансионный](#);
- [прямое перемещение по междоузлиям](#);
- [эстафетный \(непрямое перемещение по междоузлиям\)](#);
- [краудионный](#);
- [диссоциативный](#).

Бор, фосфор в кремнии диффундируют по вакансионному механизму, элементы первой и седьмой групп периодической системы – по междоузельному.

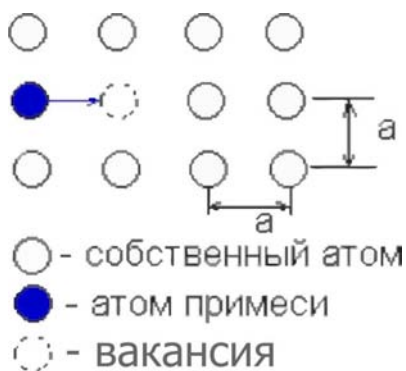


Рис 9.7. Вакансионный механизм

Диффузия по вакансиям – это такой механизм, при котором мигрирующий атом (примесный или собственный) перемещается на место вакансии, а на его месте в узле кристаллической решетки образуется новая вакансия.

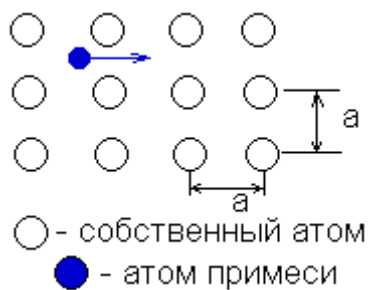


Рис 9.8. Диффузия по междоузлиям

Данный механизм сопровождается переходом мигрирующего атома (как правило примесного) из одного междоузлия в другое без его локализации в узлах кристаллической решетки.

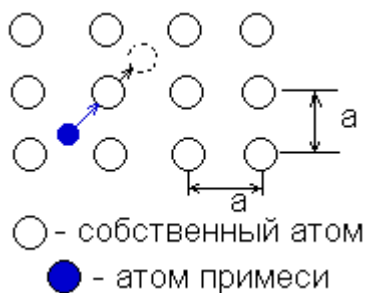


Рис 9.9. Эстафетный механизм диффузии

В отличие от междоузельного механизма диффузии, примесные атомы внедряются в узлы кристаллической решетки, вытесняя при этом собственные атомы в междоузельное пространство.

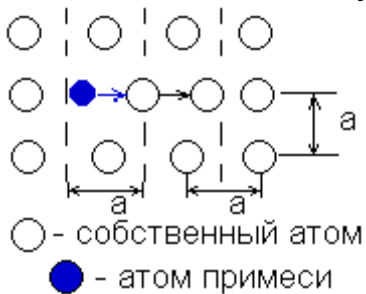


Рис 9.10. Краудионный механизм диффузии

Данный механизм тесно связан с эстафетным. При этом междоузельный атом, расположенный посередине между двумя узлами решетки, перемещается в направлении одного из них, смещая его из положения в узле решетки. Вытесненный атом становится междоузельным и занимает промежуточное положение в решетке.

Диссоциативный механизм диффузии связан с распадом комплексов молекул и диффузией составляющих их компонент (атомов или ионов) в кристаллической решетке.

9.11. Одномерное уравнение Фика

В 1855 году Фик предложил теорию диффузии:

В отсутствие конвекции перенос атомов через единичную площадку при одномерном направлении потока может быть описан уравнением:

$$J = -D \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \quad (9.9).$$

– первый закон Фика

Здесь J – диффузный поток, скорость переноса вещества через единичную площадку. Минус означает, что процесс идет в направлении уменьшения концентрации растворенного вещества, то есть градиент отрицательный.

Из закона сохранения вещества следует, что изменение концентрации со временем должно быть равно уменьшению диффузионного потока в том же объеме:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x,t)}{\partial x} \quad (9.10)$$

Из (9.9) в (9.10) выводится второй закон Фика:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \left(\frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right) \right] \quad (9.11)$$

При низких концентрациях примеси $D = \text{const}$ получаем простое диффузионное уравнение Фика:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} \quad (9.12)$$

Решения данного уравнения проводятся для различных простых начальных граничных условий.

9.12. Постоянные коэффициенты диффузии

При низких значениях концентрации диффузия хорошо описывается уравнениями с постоянными значениями коэффициента диффузии.

При высоких концентрациях примеси форма диффузионных профилей отличается от расчетной. Здесь необходимо учитывать зависимость коэффициента диффузии от концентрации примеси.

Для объяснения зависимости коэффициента диффузии от концентрации примесей и других явлений при диффузии разрабатываются различные атомистические теории– модели, основанные на взаимодействии дефектов с примесными атомами.

9.13. Механизмы диффузии в твердом теле

При высоких температурах в кристалле увеличивается количество точечных дефектов. Диффузия в твердом теле может быть представлена как движение атомов диффузанта в кристаллической решетке за счет вакансионного или междоузельного механизма диффузии.

1. Механизм диффузии, когда соседний атом, будь то атом примеси или собственный атом кристалла, мигрирует на место вакансии, называется вакансионным.

2. Механизм диффузии, при котором атом переходит из одного междоузлия в другое, не попадая при этом в узлы кристаллической решетки, называется механизмом перемещения атомов по междоузлиям.

3. Движение междоузельных атомов, когда в процессе перемещения они вытесняют атом из узла решетки и замещают его, а вытесненный атом при этом становится междоузельным, такое перемещение собственных или примесных атомов называют механизмом непрямого перемещения атомов по междоузлиям или эстафетным механизмом.

4. С указанным механизмом непосредственно связан и краудинный механизм, при котором атом, расположенный в атомном ряду посередине между двумя узлами решетки, перемещается к одному из них, смещая при этом атом, расположенный в узле. Вытесненный атом становится междоузельным и занимает промежуточное положение в данном ряду кристаллической решетки.

Сопоставление теории и эксперимента обнаружило, что диффузия примесей элементов третьей и пятой групп происходит по вакансионному механизму. Элементы первой и седьмой групп, имеющие малый ионный радиус, относятся к быстродиффундирующим примесям и механизм диффузии является междоузельным.

При низкой концентрации примеси процесс диффузии может быть описан решением простого уравнения Фика. При этом коэффициенты диффузии различных элементов определяются для разных температур.

В общем случае диффузия анизотропна. Однако в кубической решетке из-за ее симметрии диффузия изотропна. Процессы изотропной диффузии описываются посредством коэффициента диффузии D , который является скалярной величиной и определяется из первого закона Фика.

При одномерной диффузии

$$J = \frac{D \partial N}{\partial x} \quad (9.13)$$

где J – плотность потока атомов или дефектов вещества, D – коэффициент диффузии, N – концентрация атомов или дефектов решетки.

Температурная зависимость коэффициента диффузии выражается следующим соотношением:

$$D = D_0 \exp(-E_a/kT) \quad (9.14)$$

где E_a – энергия активации процесса диффузии, T – температура диффузии, k – постоянная Больцмана ($k = 8,63 \cdot 10^{-5}$ эВ/град).

Для разных механизмов диффузии энергия активации различна. Например, для вакансионного механизма значение E_a равняется $E_a = 3-4$ эВ, а для диффузии по междоузлиям $E_a = 0,6-1,2$ эВ.

Изменение концентрации растворенного вещества во времени при одномерной диффузии определяется вторым законом Фика:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad (9.15)$$

Таблица 9.1. Диффузионные параметры различных элементов в кремнии:

Элемент	D при 1473 К, м ² /с	D ₀ , м ² /с	$E_a \cdot 10^{-19}$, Дж	Тип проводимости
B	$2.8 \cdot 10^{-16}$	$(5-10.5) \cdot 10^{-4}$	5.6-5.92	p
Al	$1.5 \cdot 10^{-15}$	$(4.8-8.0) \cdot 10^{-4}$	5.28	p
Ga	$(2.5-4.1) \cdot 10^{-16}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	5.6-6.56	p
In	$8.3 \cdot 10^{-17}$	$16.0 \cdot 10^{-4}$	6.24	p
Tl	$8.3 \cdot 10^{-17}$	$16.0 \cdot 10^{-4}$	6.24	p
P	$2.8 \cdot 10^{-16}$	$10.5 \cdot 10^{-4}$	5.92	n
As	$2.7 \cdot 10^{-17}$	$0.32 \cdot 10^{-4}$	5.76	n
Sb	$2.2 \cdot 10^{-17}$	$5.6 \cdot 10^{-4}$	6.24	n
Bi	$2.0 \cdot 10^{-17}$	0.1	7.36	n
Li	$1.3 \cdot 10^{-9}$	$2.3 \cdot 10^{-7}$	1.06	n
Au	$1.1 \cdot 10^{-10}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	1.76	Амфотерный

При диффузии на небольшую глубину примеси с относительно низкой концентрацией (концентрация примеси ниже концентрации собственных носителей при температуре диффузии) коэффициент диффузии не зависит от концентрации диффузанта. Значение коэффициента в этом случае принято называть собственным коэффициентом диффузии.

Для низкой концентрации примеси уравнение (9.15) можно записать в виде:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (9.16)$$

Однако при высоких уровнях легирования наблюдается значительное увеличение коэффициента диффузии, что имеет место за счет влияния на движение примеси электрического поля, возникающего при термической диффузии, а также при взаимодействии примеси с дефектами, находящимися в различном заряженном состоянии.

9.14. Диффузия из бесконечного источника

Диффузия из бесконечного источника описывается уравнением:

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (9.17)$$

где $N(x, t)$ – концентрация примеси на расстоянии x от поверхности, N_0 – концентрация примеси на поверхности подложки, D – коэффициент диффузии примеси при температуре диффузии, t – продолжительность диффузии, $\operatorname{erfc}(z)$ – дополнительная функция ошибок.

Начальные условия: $N(x, 0) = 0$. Граничные условия: $N(0, t) = N_0$, $N(x \gg 0, t) = 0$.

Металлургическим переходом называется глубина, на которой концентрация диффузионной примеси $N(x_j)$ равняется концентрации исходной примеси на поверхности подложки $N(x_j) = N_b$.

Если тип легирующей примеси противоположен типу примеси подложки, то концентрацию легирующих элементов $N(x) = |N_D(x) - N_b|$ в области p - n перехода можно определить с помощью дополнительной функции ошибок. Зависимость концентрации легирующей примеси от параметра $z = x/2(Dt)^{1/2}$ приведена на рис. 9.12.

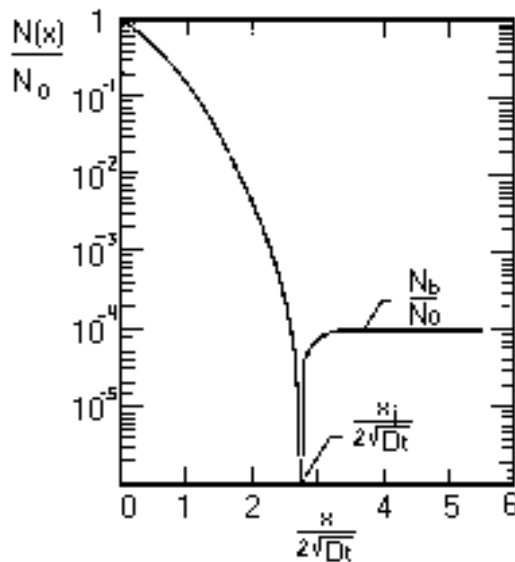


Рис. 9.11. Зависимость концентрации легирующей примеси от параметра

z

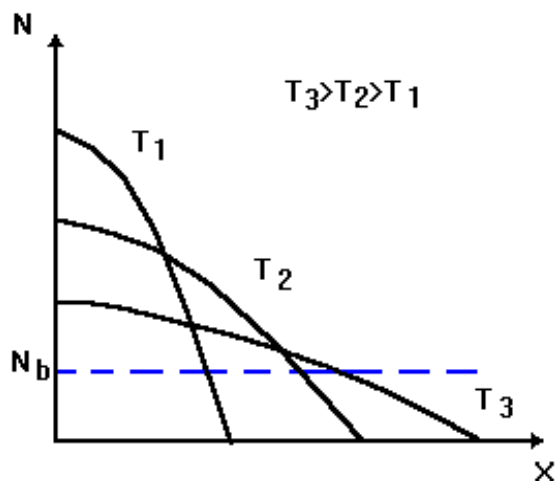


Рис. 9.12. Профиль легирования из источника с постоянной концентрацией

9.15. Диффузия из ограниченного источника

Диффузия из ограниченного источника описывается уравнением Гаусса:

$$N(x,t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2\right) \quad (9.18)$$

Начальные условия: $N(x, 0)=0$.

Граничные условия: Q_0 – число атомов легирующего вещества, осажденного на единицу площади полупроводника, равно интегралу от $N(x, t)$ по всей глубине полупроводника и $N(x, t \gg 0)=0$.

При $x = 0$ концентрация легирующей примеси на поверхности будет равна:

$$N_s = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (9.19)$$

Количество диффузанта, необходимого для осуществления диффузии на определенную глубину полупроводника заданного количества примеси, изменяющейся пропорционально $\exp(-z^2)$, где $z = (x/2\sqrt{Dt})$, очень мало. Такое количество примеси можно ввести ионным легированием или предварительным проведением диффузии (преддиффузии) при низкой температуре в течение короткого времени. При этом на поверхности сформируется источник с необходимым малым содержанием примеси Q_0 :

$$Q_0 = 2N_{01} \left(\frac{D_1 t_1}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9.20)$$

где Q_0 – количество примеси, образованное в течение преддиффузии, N_{01} – поверхностная концентрация при температуре преддиффузии, D_1 – коэффициент диффузии при температуре преддиффузии, t_1 – продолжительность преддиффузии.

Общее уравнение, позволяющее определить концентрацию примеси в полупроводнике, записывается в следующем виде:

$$N(x, t_1, t_2) = \frac{2N_{01}}{\pi} \left(\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\left(\frac{x}{2\sqrt{D_2 t_2}}\right)^2\right) \quad (9.21)$$

где индексы 1 относятся к разгонке примеси из источника сформированного на преддиффузии, а индексы 2 – к самому процессу диффузии.

Уравнение (9.27) справедливо для случая, когда выполняется следующее условие:

$$\sqrt{D_2 t_2} \gg \sqrt{D_1 t_1} \quad (9.22)$$

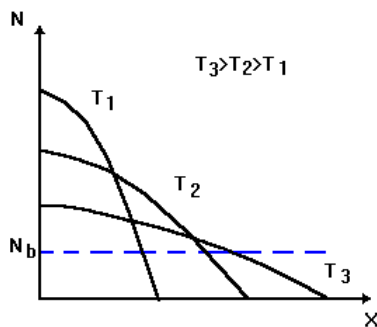


Рис 9.13. Профиль легирования из ограниченного источника

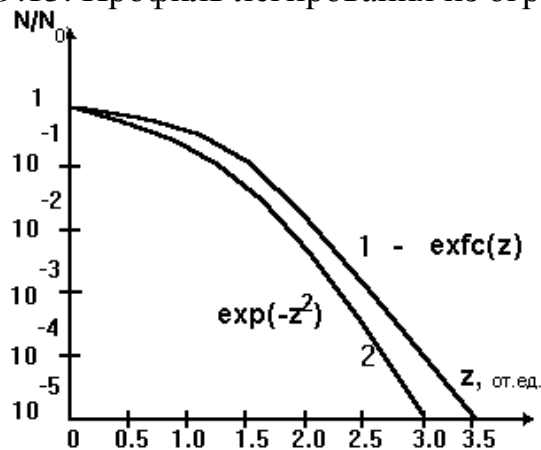


Рис. 9.14. Профили легирования при диффузии из бесконечного (кривая 1) и ограниченного (кривая 2)

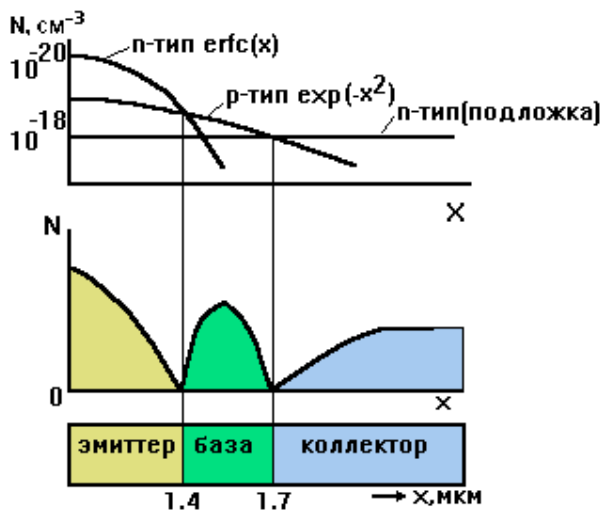


Рис. 9.15. Формирование областей базы и эмиттера биполярного транзистора (указаны возможные значения глубин слоев с разным типом проводимости)

9.16. Концентрационно–зависимые коэффициенты диффузии

Для определения концентрационной зависимости коэффициента диффузии рассмотрим второй закон Фика. $c_s = \text{const}$. Если D есть функция только c и $c_s = \text{const}$, то уравнение может быть записано в виде простого дифференциального уравнения с новой переменной η , где $\eta = \frac{x}{\sqrt{t}}$, то есть D и c зависят явным образом только от x .

После замены переменной получаем:

$$D(c) = \frac{-\frac{1}{2} \int_{c_0}^c \eta \cdot dC}{\frac{dC}{d\eta}} \quad (9.23)$$

Это соотношение позволяет получить графическое отображение измеренного профиля концентрации как зависимость концентрации c от значения η . Для этого выбираю начало отсчета, затем проводится поверхностное численное интегрирование:

$$\int_{c_0}^c \eta \cdot dC \quad \text{или} \quad C_0 \int_{c_0}^{c/C_0} \eta \cdot d(C/C_0) \quad (9.24)$$

Условия, когда c зависит только от η проверяется построением графика x от $t^{1/2}$, где прямая линия $c = c(\eta)$. Такой способ обработки называется преобразованием Больцмана – Матано.

9.17. Атомные механизмы диффузии

Верхний предел концентрации легирующей примеси, для которой справедливо предположение о постоянстве коэффициента диффузии, может быть оценен по концентрации собственных носителей n_i при температуре

диффузии. $D = \text{const}$, если $c(x) < n_i$ и D_i – собственный коэффициент диффузии.

Для того, чтобы понять механизм диффузии при высоких концентрациях были предложены атомные модели процесса диффузии в твердом теле, которые сравнивались с экспериментальными данными.

Было установлено, что вакансионный механизм диффузии наиболее вероятен для кристаллов с гранецентрированной кубической решеткой. Диффузия в кремнии может быть описана за счет механизма, предполагающего взаимодействие примеси и точечных дефектов с дефектами, находящимися в различном заряженном состоянии.

Точечные дефекты, образованные внутренней примесью, могут стать активными, когда они захватывают или теряют электроны. Вакансия может заряжаться, действуя как акцептор и приобретая при этом отрицательный заряд: $V + e \rightleftharpoons V^-$. Аналогично, междоузельный атом (I) может заряжаться как акцептор: $I + e \rightleftharpoons I^-$.

Концепция диффузии за счет ионизированных точечных дефектов с успехом применяется для кремния. В результате было получено выражение для концентрации вакансий акцепторного типа в примесном кремнии (C_V).

$$\frac{C_V}{C_1(V^-)} = \frac{n}{n_i}, \quad (9.25)$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (9.26)$$

где $C_1(V^-)$ – концентрация вакансий акцепторного типа в собственном кремнии. Так как C примерно пропорционально D , то таким образом

$$D/D_i = n/n_i \quad (9.27)$$

D – коэффициент диффузии в примесном кремнии.

D_i – коэффициент диффузии в собственном кремнии. Учитывая все возможные виды взаимодействий примесей с кристаллической решеткой получим формулу:

$$D = D^x + \sum_{r=1}^m (D^{-r})(n/n_i)^r + \sum_{r=1}^m (D^{+r})(n/n_i)^r, \quad (9.28)$$

где D^x и x относятся к нейтральным дефектам. r – степень ионизации точечных дефектов. "-" – акцептор, "+" – донор. D_i – собственный коэффициент диффузии, E – энергия активации. V^+ – ионизованные вакансии донорного типа. V^x – нейтральные вакансии. V^- – ионизованные вакансии акцепторного типа.

Это феноменологическое выражение для зависимости коэффициента диффузии от концентрации примеси, которое описывает диффузию за рамками уравнения Фика, но не дает ответ о механизме диффузии, что требует других измерений, например, зависимости D от температуры.

9.18. Факторы, влияющие на процессы диффузии

1. Температурная зависимость коэффициента диффузии.

Экспериментально установлено: $D = D_0 \exp(-E_a/kT)$, где E_a – энергия активации. Если построить график D от $1/kT$ в полулогарифмических координатах, то получим прямую линию, тангенс угла наклона которой $\operatorname{tg}\alpha = E_a/kT$, D_0 – константа диффузии – частотный фактор.

Из атомистических моделей E_a связано с частотой атомных скачков или частотой колебаний решетки (10^{13} Гц) E_a не зависит от температуры.

$E_a = 3\text{--}4$ эВ – при вакансионной модели. $E_a = 0,6\text{--}1,2$ эВ – при междоузельной модели.

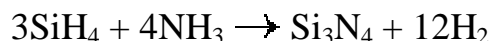
Если измерять температурную зависимость D , можно определить механизм диффузии.

2. Коэффициенты диффузии элементов В, Р, As, Sb в кремнии.

а) Диффузия в собственный кремний. Данные представлены в таблице 9.2.

Таблица 9.2. Коэффициенты диффузии элементов В, Р, As, Sb в кремнии и энергии активации процесса собственной проводимости.

	В	Р	As	Sb
	$(D_i^+)_{\text{В}}$	$(D_i^x)_{\text{Р}}$	$(D_i^-)_{\text{As}}$	$(D_i^x)_{\text{Sb}}$
$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	0,76	3,85	24 – 60	0,214
$E, \text{эВ}$	3,46	3,66	4,08 – 4,2	3,65



б) Диффузия при высоких концентрациях примесей.

I) Мышьяк. Из теории взаимодействия с ионизованными дефектами: $D_{\text{As}} = (2n/n_i)(D_i)_{\text{As}}$ – коэффициент учитывающий влияние электрического поля. Если концентрация As $> 10^{20} \text{см}^{-3}$, то образуются кластеры и при $T < 1000$ °С коэффициент диффузии кластеров очень мал, при более высокой температуре кластеры распадаются и диффузия идет атомами.

II) Бор.

$D_{\text{B}} = (D_i^+)_{\text{B}} \frac{p}{n_i}$. При $C_{\text{B}} > 10^{20} \text{см}^{-3}$ D стремится к 0, как в случае с

мышьяком.

в) Диффузия в SiO_2 .

Коэффициент диффузии для разных примесей получают экспериментальным путем по результатам легирования кремния через SiO_2 .

3) Влияние электрического поля.

При диффузии ионов создается внутреннее электрическое поле:

$$E_x = -\frac{\partial}{\partial x} \varphi(x, t) \quad (9.29)$$

Для донорной примеси: $\varphi(x, t) = (E_C - E_F)/q$, где E_C – энергия для зоны проводимости кремния, E_F – энергия уровня Ферми, q – заряд электрона. Так

как число ионизованных доноров равно числу электронов и считая, что все доноры ионизованы, получаем:

$$np = n_i^2 \text{ и } ND = n. \quad (9.30)$$

Тогда

$$E_x = \frac{kT}{q} \frac{\partial}{\partial x} \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \quad (9.31)$$

Диффузионный поток в электрическом поле:

$$J = -qD \left(\frac{\partial N_D}{\partial x} \right) - qZD \left(\frac{q}{kT} N_D E_x \right) \quad (9.31)$$

где Z – заряд донорных атомов. Подставляя (9.30) в (9.31) и заменив $\frac{\partial}{\partial x}$ на $\frac{\partial}{\partial N_D} \frac{\partial N_D}{\partial x}$, получим

$$J = -qDh \frac{\partial N_D}{\partial x} \quad (9.32),$$

где $h = 1 + ZN_D \frac{\partial}{\partial N_D} \ln \frac{N_D}{n_i}$, h – коэффициент ускорения диффузии при наличии электрического поля. В случае, когда $N_D/2n_i$ много больше 1, $h = 2$ – максимальное ускорение.

9.19. Способы контроля процессов диффузии

Результаты процесса диффузии можно проконтролировать измерением глубины p - n перехода и поверхностного сопротивления диффузионного слоя.

Глубину p - n перехода обычно определяют химическим окрашиванием отшлифованного под небольшим $1-5^\circ$ углом образца в смеси 100 мл (49%) плавиковой кислоты и нескольких капель азотной кислоты. Если образец, обработанный в этом растворе, выдержать на ярком свете 1–2 минуты, то область

p -типа проводимости будет выглядеть темнее по сравнению с областью n -типа проводимости. С помощью интерферометра глубина p - n перехода может быть измерена с высокой точностью в пределах от 0.5 до 100 мкм.

Величину поверхностного сопротивления диффузионного слоя R_s можно измерить четырехзондовым методом, рассчитав ее по формуле: $R_s = V \cdot C / I$, где V – измеренная величина постоянного напряжения, I – величина постоянного тока, C – коэффициент коррекции, зависящий от геометрии образца и расстояния между электродами. Его величина изменяется от 1 до 4,5.

Средняя величина поверхностного сопротивления диффузионного слоя R_s связана с глубиной p - n перехода x_j , подвижностью носителей μ и распределением примеси по глубине диффузионного слоя $N(x)$ выражением:

$$R_s = \frac{1}{q \cdot \mu_{\text{эфф}} \int_0^{x_j} N(x) dx} \quad (9.33)$$

Введя понятие эффективной подвижности носителей в слое $\mu_{\text{эфф}}$, как средней подвижности носителей, определенной в диапазоне от 0 до x_j , получим следующее выражение:

$$R_s = \frac{1}{q \cdot \int_0^{x_j} \mu \cdot N(x) dx} \quad (9.34)$$

Для задания вида зависимости $N(x)$ используются простые диффузионные профили, такие как экспоненциальный, гауссовый и функции дополнительных ошибок.

Величина удельного сопротивления однозначно связана с поверхностной концентрацией примеси при предполагаемом диффузионном профиле соотношением: $\rho = R_s \cdot x_j$.

Указанные выше методы просты и дают важную информацию о диффузионном слое без использования сложных способов измерения диффузионного профиля. Однако они основаны на предположении о конкретной модели диффузии, нуждающейся в экспериментальной проверке.

Известны следующие способы измерения профиля концентрации примеси: метод вольтфарадных характеристик; метод дифференциальной проводимости; метод сопротивления растекания; метод масс-спектропии вторичных ионов; метод Резерфордского обратного рассеяния.

1. Метод вольт-фарадных характеристик.

При наличии резкого $p-n$ – перехода и при приложении обратного напряжения будет меняться емкость области пространственного заряда.

$$C(x) = \frac{C^3(V)}{q \epsilon_s} \frac{1}{dC/dV},$$

$$x = \epsilon_s / C(V) \quad (9.35)$$

$C(V)$ – емкость обратно смещенного $p-n$ – перехода на единицу площади. $C(x)$ – концентрация примеси на краю области пространственного заряда.

Если $V = V_R + V_{bi}$, где V_R – величина обратного приложенного напряжения, V_{bi} – встроенный потенциал $p-n$ –перехода.

$$C(V) = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2} L_D} (\beta V_{bi} \pm \beta V_R - 2)^{-\frac{1}{2}},$$

$$\beta = q/kT, \quad (9.36)$$

L_D – дебаевская длина экранирования. Ее можно определить из емкости $p-n$ – перехода при $V = 0$. На основании других уравнений можно оценить

профиль легирования, измеряя емкость $p-n$ – перехода как функцию от приложенного напряжения.

2. Метод дифференциальной проводимости.

Измеряют поверхностное сопротивление образца, а затем проводят повторное измерение поверхностного сопротивления после удаления тонкого слоя SiO_2 анодным окислением или травлением этого оксида в растворе HF. Так как анодное окисление производится при комнатной температуре, то примесные атомы не перемещаются в диффузионном слое и исключается эффект сегрегации. Необходимо, также измерить подвижность носителей методом, например по эффекту Холла.

3. Метод сопротивления растекания.

Метод вольт-фарадных характеристик имеет ограничения по глубине залегания, метод дифференциальной проводимости – трудоемок. Этих недостатков лишен метод, известный как метод сопротивления растекания.

В методе используют два зонда, и сопротивление растекания определяется как: $R_{sr} = \rho/2a$, где ρ – удельное сопротивление вблизи зонда, a – радиус зонда. Этот метод чувствителен к локальным изменениям концентрации примеси.

Глава 10. КОНСТРУКТИВНО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

10.1. Типы интегральных микросхем

Под интегральной микросхемой (ИМС) понимается микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматриваются как единое целое. Приведенное определение подразумевает, что микросхема состоит из значительного объединенного числа элементов: транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и т. п., которые размещены на части кремниевой пластины, называемой кристаллом.

Интегральные микросхемы можно классифицировать по различным признакам: по виду обрабатываемого сигнала, по конструктивно–технологическому исполнению, по степени унификации и назначению, по наличию и отсутствию корпуса, по степени интеграции и т. п.

По виду обрабатываемого сигнала ИМС делятся на аналоговые и цифровые.

Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Устройства ЭВМ в основном реализуются на цифровых ИМС, в которых осуществляются преобразование и обработка сигналов по закону дискретной функции.

По конструктивно–технологическому исполнению ИМС делятся на три большие группы: полупроводниковые, гибридные и прочие. В группу прочих входят пленочные, керамические, вакуумные и другие ИМС.

Полупроводниковая ИМС – это ИМС, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника. Для ее изготовления используются пластины (подложки) из полупроводникового материала. Часть полупроводниковой пластины, в которой сформированы элементы полупроводниковой ИМС, межэлементные соединения и контактные площадки, называется кристаллом. Полупроводниковые ИМС характеризуются высокой надёжностью, малыми массой и габаритными размерами, возможностью применения групповых методов производства почти на всех стадиях изготовления. При современной технологии можно сформировать на кристалле сотни тысяч и более различных элементов.

В настоящее время различают два основных класса полупроводниковых ИМС: биполярные (на основе биполярных транзисторов) и металл–диэлектрик–полупроводниковые (МДП) ИМС (на основе МДП–транзисторов). Возможно также сочетание биполярных и МДП–транзисторов на одном кристалле.

Для изготовления полупроводниковых ИМС требуются значительные капитальные вложения, поэтому производство их экономически выгодно лишь при массовом выпуске.

Если элементы и межэлементные соединения выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрической подложки, то такую ИМС называют пленочной. В зависимости от толщины пленок и способа их нанесения различают тонкопленочные (толщина пленок до 1 мкм, тонкие пленки получают преимущественно методами вакуумного распыления и испарения) и толстопленочные ИМС (толщина пленок 10...70 мкм, толстые пленки получают методами трафаретной печати – шелкографии).

Поскольку до сих пор никакая комбинация напыленных пленок не позволяет получать активные элементы (транзисторы, диоды) со стабильными электрическими характеристиками, то пленочные ИМС содержат только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и т. п.). Для реализации электронных микросхем пленочные элементы дополняются дискретными активными элементами. Тогда получается гибридная ИМС, в которой, кроме пассивных пленочных элементов, применяются и навесные компоненты (бескорпусные гибридные ИМС, транзисторы и диоды, а также дискретные резисторы и конденсаторы, которые по каким–либо причинам невозможно или нецелесообразно выполнять в пленочном виде). В гибридных ИМС электрические связи между элементами и компонентами реализуются в виде пленочного и (или) микропроводного монтажа. Гибридные ИМС просты в изготовлении, имеют низкую стоимость и трудоемкость технологических операций, сравнительно небольшую длительность производственного цикла. В ряде случаев возможно изготовление прецизионных пленочных элементов для гибридных ИМС с более стабильными электрическими характеристиками и повышенным тепловыделением, чем в полупроводниковых ИМС.

По степени унификации и назначению различают ИМС общего применения (массового назначения) и частного применения. Обычно ИМС являются самостоятельными изделиями общего применения и в зависимости от массовости выпуска и требуемых параметров изготавливаются в полупроводниковом или гибридном исполнении. ИМС общего назначения, как правило, выпускают сериями. Серией называется совокупность типов ИМС, которые могут выполнять различные функции, имеют единое конструктивно–технологическое исполнение и предназначены для совместного применения.

Для частных специализированных, как правило в конструкциях модулей современных технических средств ЭВМ используют микросборки — микроэлектронные изделия типа гибридных ИМС или больших гибридных ИМС, выполняющих конкретные функции и состоящие из элементов, компонентов и (или) ИМС (корпусированных и бескорпусных) и других электро–радио элементов (ЭРЭ) в различных сочетаниях, разрабатываемых и изготавливаемых для улучшения показателей микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры.

Чрезвычайно важными характеристиками ИМС и микросборок являются плотность упаковки и степень интеграции. Плотность упаковки ИМС – это отношение числа элементов и компонентов ИМС к ее объему. Степень интеграции определяет сложность ИМС и записывается как $k = \lg N$, где k – коэффициент, определяющий степень интеграции и округляемый до ближайшего большего целого числа; N – число элементов и компонентов, входящих в ИМС.

По степени интеграции различают ИМС первой степени (до 10 элементов), второй степени (от 10 до 100 элементов). ИМС третьей и более высоких степеней интеграции обычно называют большими (БИС).

БИС, являются микросхемами высокой функциональной сложности, определяемой большой степенью интеграции. К таким БИС в первую очередь следует отнести микропроцессорные ИМС, микросхемы оперативной и постоянной памяти, а также многие другие микросхемы, осуществляющие функции управления, преобразования и ввода–вывода информации.

За счет сокращения длины и количества межсоединений увеличение степени интеграции ведет к повышению функциональной сложности, надежности и быстродействия ИМС и снижению их стоимости. Однако себестоимость существенно зависит от совершенства технологии, так как с повышением степени интеграции при неизменном уровне технологии процент выхода годных микросхем резко падает.

По особенностям конструкции элементов защиты ИМС от внешних воздействий (влага, газы, пыль, механические воздействия, радиация и т.п.) различают корпусированные и бескорпусные ИМС.

В корпусированных ИМС защита кристалла или подложки осуществляется корпусом –частью конструкции ИМС, которая наряду с защитой от внешних воздействий предназначена для соединения ИМС с внешними электрическими цепями посредством выводов. Для защиты микросхемы корпуса герметизируются.

В настоящее время разработка полупроводниковых ИМС в корпусах сопровождается, как правило, и разработкой их аналогов в бескорпусном варианте. Бескорпусные ИМС, а также транзисторы, диоды и другие ЭРЭ образуют элементную базу гибридных ИМС и микросборок, герметизируемых блоков электронной аппаратуры.

10.2. Корпуса ИМС и их конструкции

Корпус служит для защиты полупроводникового кристалла от различных воздействий окружающей среды, включая повышенную влажность, механические нагрузки, электромагнитные излучения, воздействие агрессивных химических веществ и т.д. Он должен обеспечивать коммутацию электрических сигналов и подвод электропитания к элементам, расположенным на и в объеме кристалла, отводить выделяемое им тепло, допускать проверку электрических параметров микросхемы и применение высокопроизводительных, в том числе автоматизированных, процессов сборки ИМС и их монтажа в аппаратуру. Корпус ИМС должен сохранять ее работоспособность при повышенных (до 125 °С и более) и пониженных (до – 60 °С) температурах. Такие разнообразные функции корпусов довольно жестко регламентируют номенклатуру используемых материалов, а также основные конструктивно–технологические решения, которые лежат в основе изготовления корпусов.

В зависимости от требований, предъявляемых к полупроводниковым приборам, корпуса могут быть герметичными и негерметичными. Применяют также бескорпусные полупроводниковые приборы, представляющие собой кристалл (плату) с электродными выводами. Для закрепления выводов и защиты кристалла (платы) его заливают пластмассой (компаундом). После монтажа в аппаратуре бескорпусные приборы вместе с другими элементами схемы обычно опрессовывают пластмассой.

Корпуса ИМС классифицируют по назначению, свойствам помещаемых в корпус полупроводниковых приборов, конструкции и материалу изоляторов, методу герметизации, тепловому сопротивлению.

В зависимости от назначения корпуса бывают для диодов, транзисторов, интегральных микросхем, оптических приборов, модулей и других устройств.

В зависимости от свойств помещаемого полупроводникового прибора и мощности рассеивания корпуса бывают для маломощных, средней и большой мощности, а по частотным свойствам – для низкочастотных, средней, высокой и сверхвысокой частоты изделий.

В зависимости от конструкции изоляторов корпуса бывают с одиночными и несколькими выводами, проходящими через одну изолирующую деталь, а также чашечного типа, с отдельными проходными, скрытыми внутри изолятора, наружными одно– и многорядными выводами.

В зависимости от того, какой материал в конструкции корпуса служит механической опорой для монтируемого кристалла и каким осуществляется изоляция выводов, корпуса, принято делить на керамические,

металлокерамические, металлостеклянные, стеклокерамические, пластмассовые, стеклянные.

По методу герметизации корпуса подразделяются на герметизируемые контурной контактной электросваркой, холодной сваркой, пайкой, стеклом, пластмассой, клеем и т.д.

Загерметизированный корпус образует замкнутый объем, в котором располагается кристалл и соединяющие его с внутренними контактными площадками корпуса (траверсами) проволочные проводники. Вместо разварки проволокой, применяются также методы электрического соединения кристалла с корпусом с помощью балочных или столбиковых выводов. Корпус любого типа состоит из основания (с выводами) или подложки, выводной рамки (когда поставляется подложка без выводов) и крышки, используемой для герметизации ИМС.

Каждый из перечисленных выше типов корпусов имеет свои достоинства и недостатки (табл. 10.1), однако в целом принято считать, что наиболее надежными являются керамические корпуса, несколько уступают им металлостеклянные и стеклокерамические. Вместе с тем большинство керамических корпусов (особенно многовыводных) имеют недостаточную для получения высокого быстродействия микросхем проводимость выводов вследствие использования в конструкции печатных проводников из тугоплавких высокоомных металлов, а также высокую стоимость, обусловленную значительным расходом драгоценных металлов (припой, покрытия).

Таблица 10.1. Качественная оценка характеристик типов корпусов ИМС

Характеристика	Тип корпуса			
	керамический	металлостеклянный	стеклокерамический	пластмассовый
Сопротивление тепловому удару	В	С	С	Н
Сопротивление механическому удару	В	Н	С	С
Стойкость к химическим реагентам	В	С	Н	Н
Герметичность	В	В	С	Н
Проводимость выводов	Н	В	В	С
Стоимость	Н	С	В	Н

Примечание: В,С, Н – высшая, средняя и низшая оценки, соответственно.

Под пластмассовыми корпусами понимают такой способ сборки, когда кристалл монтируется на выводную рамку (имеющую в центре не пустое пространство, как в стеклокерамических корпусах, а прямоугольную площадку–держатель), а затем герметизируется заливкой жидкими компаундами или опрессовкой порошкообразными пресс–композициями. При этом корпус образует с кристаллом монолитное (без внутреннего воздушного объема) тело, которое может повторять форму любых корпусов с

тем же числом выводов. Пластмассовые корпуса приобрели большую популярность благодаря низкой стоимости герметизирующих полимерных материалов, простой, легко автоматизируемой технологии групповой сборки ИМС, высокой механической прочности и малой массе корпуса. Однако герметизация пластмассой не обеспечивает надежной защиты кристалла в условиях эксплуатации ИМС при повышенных значениях влажности и температуры окружающей среды. Влагопроницаемость полимерных материалов, наличие в них агрессивных примесей, мигрирующих с влагой к кристаллу, приводят к коррозии металлических покрытий, а низкая теплопроводность пластмассы затрудняет отвод тепла. Поэтому пластмассовые корпуса используются для массовых серий микросхем с малой рассеиваемой мощностью, рассчитанных на работу при нормальной и низкой влажности в ограниченном диапазоне температур окружающей среды. Старение полимерных материалов также снижает надежность ИМС при длительных сроках хранения и эксплуатации. Разработаны и применяются более надежные, хотя и более трудоемкие в изготовлении пластмассовые корпуса с полым внутренним объемом, конструктивно близкие к металлокерамическим и металлокерамическим корпусам.

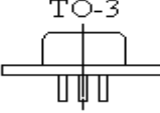
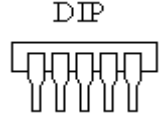
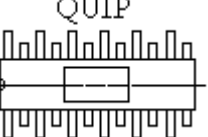
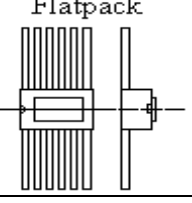
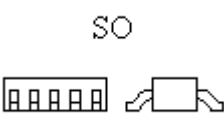
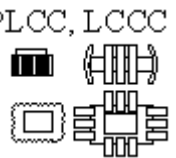

Конструкции корпусов ИМС отличаются большим разнообразием, большинство их стандартизировано и разбито по конструктивным типам. Отличительными признаками последних, независимо от технологического варианта изготовления, являются форма корпуса и расположение выводов. С этими признаками связан выбор способа монтажа изделий и конструкции печатной платы. В настоящее время известны и широко используются семь типов корпусов (табл. 10.2).

Одним из первых примененных корпусов для ИМС был металлокерамический с круглой крышкой и штырьковыми выводами, расположенными перпендикулярно основанию корпуса, как правило, по окружности. Такие корпуса типов ТО-3 (с фланцем в качестве теплоотвода), ТО-5, ТО-8, ТО-78 и ТО-99 неудобны для проверки электрических параметров схем и монтажа на печатные платы. Гибкие проволочные выводы корпусов типа ТО-5 легко перепутать, они часто ломаются при испытаниях или сборке изделий.

Поэтому созданные в 1965 г. фирмой Fairchild (США) DIP-корпуса с жесткими выводами быстро стали популярными и до сих пор остаются самыми массовыми. Габариты корпусов этого типа зависят от числа выводов в ряду и расстояния между их рядами (растра). Растр, как и шаг 2,54 мм между выводами в ряду, стандартизован и равен 7,62 мм для корпусов с числом выводов от 8 до 20 и 15,24 мм – при числе выводов от 24 до 64. Применяются две разновидности DIP-корпусов: с выводами, припаянными к керамическому телу корпуса, и выступающими за него, последние которые формуется до или после сборки ИМС под углом 90° к телу корпуса. Такие выводы имеют все DIP-корпуса в стеклокерамическом или пластмассовом вариантах изготовления и некоторые конструкции керамических корпусов. Естественно, что при одном и том же растре корпуса с припаянными выводами имеют несколько более широкое тело, что допускает монтаж кристалла больших габаритов.

Стремясь уменьшить длину DIP–корпуса с большим числом выводов при сохранении его общей конфигурации и стандартного шага 2,54 мм, изготовители корпусов разработали и внедрили его QUIP–модификацию с ленточными выводами припаянными к телу корпуса или выходящими из середины боковых сторон пластмассового или стеклокерамического корпуса с шагом 1,27 мм. После сборки ИМС они формируются под прямым углом в четыре ряда и располагаются при этом в каждом соседнем ряду в шахматном порядке с шагом 2,54 мм.

Таблица 10.2 Основные конструктивные типы корпусов ИМС

Тип и условное изображение	Число выводов	Особенности конструкции выводов	Технологический вариант изготовления
 <p>ТО-3</p>	До 12	Выводы корпуса расположены по окружности, крышка – круглая	Металлостеклянный
 <p>DIP</p>	От 8 до 64	Жесткие выводы расположены в два ряда с шагом 2,54 м	Керамический, стеклокерамический, пластмассовый
 <p>QUIP</p>	До 64	Выводы (после формовки) расположены в четыре ряда в шахматном порядке	Керамический, стеклокерамический, пластмассовый
 <p>Flatpack</p>	От 6 до 80–100	Гибкие выводы расположены с двух или четырех сторон корпуса параллельно основанию с шагом 1,27 мм	Керамический, стеклокерамический, металлостеклянный, пластмассовый
 <p>SO</p>	От 8 до 64	Укороченные отформованные выводы расположены с 2-х сторон корпуса с шагом 1,27 мм	Стеклокерамический, пластмассовый
 <p>PLCC, LCCC</p>	От 16 до 156 (256)	Контакты (короткие выводы) расположены с четырех сторон квадратного корпуса с шагом 1,27 мм (0,635 мм)	Керамический, стеклокерамический, пластмассовый
 <p>PGA</p>	До 324 и более	Выводы (контакты) расположены по основанию в узлах координатной сетки с шагом 2,54 мм или 1,27 мм	Керамический, стеклокерамический

Другой стандартизированный тип корпуса (плоский) при поставке может ничем не отличаться от корпуса QUIP, он имеет гибкие ленточные выводы, параллельные основанию корпуса с шагом 1,27 мм, но при монтаже ИМС на печатные платы эти выводы S–образно изгибают или не формируют совсем, если они припаяны под основанием корпуса. В обоих случаях ИМС припаивают к контактным площадкам печатной платы внахлест. При таком способе сборки РЭА ИМС могут располагаться на поверхности платы (или

теплоотвода) без зазора, благодаря чему достигается хороший кондуктивный отвод тепла от кристалла и обеспечивается меньшая, по сравнению с корпусами DIP и QIP, высота ИМС на плате.

Высоконадежные плоские корпуса, включая керамические и металлостеклянные, пользуются большим спросом изготовителей военной и авиакосмической аппаратуры. В последние годы в связи с расширением применения метода поверхностного монтажа и возрастанием требований к миниатюризации коммерческой аппаратуры внедряются плоские корпуса с четырехсторонним расположением выводов и расстоянием между ними 0,635 мм, причем среди которых не только керамические, но и более дешевые стеклокерамические и пластмассовые корпуса.

Наиболее обширное семейство корпусов ИМС – кристаллоносители. Это, вероятно, самый быстроразвивающийся тип корпусов. Авторство в их изобретении принадлежит фирме ЗМ, которая в 1972 г. запатентовала, а с 1975 г. стала применять кристаллоносители в своих разработках.

Однако при сборке СБИС с числом выводов свыше 100 кристаллоносители уступают матричным корпусам, которые, начиная с конца 60-х годов, выпускает и применяет в производстве ЭВМ фирма ИВМ (США). Отличные массо-габаритные и электрические характеристики этих корпусов обусловлены особенностями расположения штырьковых выводов (или контактов), благодаря, которым при одинаковом числе выводов основание матричного корпуса по площади меньше кристаллоносителя. Так, 160-выводной корпус с шагом матрицы 2,54 мм занимает менее половины площади, необходимой для монтажа кристаллоносителя с таким же числом контактов и шагом между ними 1,27 мм. Выпускается несколько вариантов корпусов: с матрицей выводов, занимающей всю нижнюю плоскость основания, с выводами, обращенными в ту же сторону, что и монтажный колодец (неполная матрица выводов); с двумя массивами выводов (разделенная матрица).

Матричные корпуса сложнее в изготовлении кристаллоносителей в связи с тем, что они выполняются спеканием нескольких слоев керамики, и поэтому дороже их примерно в 1,5 – 2,0 раза. Кроме того, для монтажа ИМС в таких корпусах требуются многослойные печатные платы, стоимость которых высока; недостатком является также невозможность визуальной проверки качества паяных контактов, расположенных внутри матрицы. Наряду с керамическими, созданы конструкции металлостеклянных корпусов этого типа, не уступающих первым в надежности, но более дешевых и удобных в производстве.

Развитие техники корпусирования осуществляется в направлении увеличения числа выводов, уменьшения расстояния между выводами и снижения общих размеров корпусов. Мировая электронная промышленность около 90% всех приборов выпускает в пластмассовых, и до 10% – в керамических корпусах.

Технологические изменения, связанные с поверхностным монтажом, которые начались с пассивных компонентов, все более распространяются и на ИМС. Наблюдается годовой рост объема продаж приборов выполненных

по технологии монтажа поверхностью по сравнению с приборами для монтажа в отверстия.

Сохраняется тенденция к увеличению числа выводов, которая наиболее отчетливо проявляется в заказных ИМС, вентильных матрицах и микропроцессорах.

Ведущие ассоциации и организации по стандартизации, такие как EIAJ в Японии и JEDEC в США, проводят большие работы в области нормирования параметров корпусов. Ведущее положение в области разработки новых корпусов, особенно для бытовой аппаратуры, занимает Япония. Основными направлениями в стандартизации JEDEC являются переход на метрическую систему, уменьшение расстояния (шага) между выводами, уменьшение длины выводов, снижение зазора корпус – плата и толщины корпусов.

Применение плоских корпусов у изготовителей аппаратуры связано с определенными трудностями, что является результатом снижения расстояния между выводами и увеличением их числа.

Основной проблемой, сдерживающей широкое применение корпусов с шагом меньше 0,5 мм, является миниатюрность выводов и необходимость обеспечения их высокой компланарности. Отклонение от нормального положения хотя бы одного вывода приводит к отказу аппаратуры.

В разных странах проблема решается различными способами. Так, при малом числе выводов такие корпуса поставляются в лентах, а при большом числе выводов – в поддонах. Таким образом фирмы–изготовители корпусов идут по пути совершенствования существующей технологии, не меняя системы взаимных отношений между изготовителями и потребителями электронных компонентов.

В США существует другой подход к решению проблемы. Электронные фирмы поставляют ИМС в плоских корпусах с защитной рамкой, которая удаляется изготовителем аппаратуры перед монтажом схемы на плату. Таким образом, проблемы, связанные с сохранением формы и компланарности выводов, переложены с изготовителей ИМС на разработчиков аппаратуры.

По сравнению с монтажом в отверстия технология монтажа на поверхность создает в компонентах в процессе пайки более высокие термомеханические напряжения. При пайке оплавлением в пластмассовых корпусах больших размеров в результате испарения поглощенной ранее влаги возможно возникновение эффекта "воздушной кукурузы", что может привести к появлению трещин как в корпусе, так и в кристалле. По этой причине ИМС в больших корпусах обычно поставляются во влагонепроницаемой упаковке.

10.3 Требования к конструкции корпусов

Развитие ИМС, увеличивающаяся их сложность и увеличение количества выводов, связывающих ИМС с внешней сетью, потребителями и источниками входящей информации, повышающиеся с каждым годом требования к надежности ставят очень трудные проблемы перед разработчиками корпусов ИМС.

Корпуса должны удовлетворять требованиям по минимизации размеров и массы, высокой надежности при большом количестве выводов и малых расстояниях между ними. В мировой практике установлены две категории требований для корпусов:

а) требования, способствующие совершенствованию работы изготовителей корпусов:

- уменьшение стоимости изготовления;
- возможность размещения больших кристаллов;
- большое количество выводов;
- улучшенные частотные характеристики;
- улучшенные электрические характеристики;
- повышенное теплорассеяние;
- повышенное качество и надежность;
- использование новых технологий для уменьшения размеров;

б) требования для удовлетворения запросов изготовителей ИМС:

- уменьшение затрат на сборку;
- увеличение плотности расположения компонентов на кристалле;
- уменьшение массы;
- повышение качества и надежности;
- улучшение электрических характеристик;
- автоматизация сборки ИМС.

При создании высоконадежных корпусов ИМС, оптимальных как по характеристикам, так и по стоимости, необходимо иметь в виду ограничения по пяти группам параметров: геометрическим, электрическим, тепловым, механическим и стоимостным как при изготовлении, так и при обслуживании.

Электрические и тепловые параметры корпусов выдвигают два основных требования к используемым. Это, по возможности, высокие значения диэлектрической проницаемости материала и повышенная теплопроводность материала. Теплопроводность определяет возможность отвода тепла через корпус, выделяемого при работе микросхемы на кристалле; диэлектрическая проницаемость определяет задержку сигнала при прохождении его в корпусе и из корпуса, либо в корпус, т.е. определяет возможность реализации быстродействия ИС.

10.4 Металлокерамические корпуса

Совершенная по качеству, разнообразная по химическому составу и физико–химическим характеристикам керамика стала важнейшим конструкционным материалом для полупроводниковых изделий.

Разработка и широкое применение металлокерамических (в последнее время их стали называть просто керамическими) корпусов для ИМС имеют огромное значение для создания надежных, герметичных, быстродействующих изделий. Развитие этих корпусов привело к разработке керамических корпусов со штырьевыми выводами, позволивших существенно увеличить число выводов ИМС.

На рис. 10.1 показан металлокерамический корпус типа КТ-97С (ТО-258). Корпуса данного типа применяются в основном для мощных полупроводниковых приборов с рабочими напряжениями до 1500В и токами до 50А.

Металлокерамический корпус типа КТ-97С изготовлен следующим образом. Металлическое основание 1 изготавливают из бескислородной меди, закрепляют на нем термокомпенсатор 2 из материала МД40 пайкой. Обечайку 3, изготовленную из профильной медной трубы, присоединяют к металлическому основанию 1 серебрясодержащим припоем. В обечайке 3 выполняют два сквозных отверстия 4 требуемого диаметра и выемку 6 для третьего вывода 7. В отверстиях 4 и 6, снаружи обечайки, выполняют разгрузочные канавки 16. Полые керамические изоляторы 8 покрытые слоем молибдена толщиной от 20 до 40 мкм за исключением торцов, располагают в сквозных отверстиях 4 обечайки 3. Выводы 5 с медным сердечником 10 и траверсами 11 располагают в полых изоляторах 8 так, что траверсы 11 выходят внутрь корпуса, а другой конец вывода 5 выходит наружу. Выводы 5 присоединяют серебрясодержащим припоем к внутренней части полых изоляторов 8. Ободок 12 из кобальта присоединяют к внешней части обечайки 3 серебрясодержащим припоем, затем все элементы корпуса и выводы 5, 7 покрывают слоем никеля 13 и слоем золота 14. 19. Металлическую крышку 15 соединяют с ободком 12, присоединенным к обечайке 3, по периметру с помощью шовно-роликовой сварки. Посадку полупроводникового кристалла на поверхность термокомпенсатора 2 производят контактно-реактивной пайкой с помощью эвтектики золото-кремний.

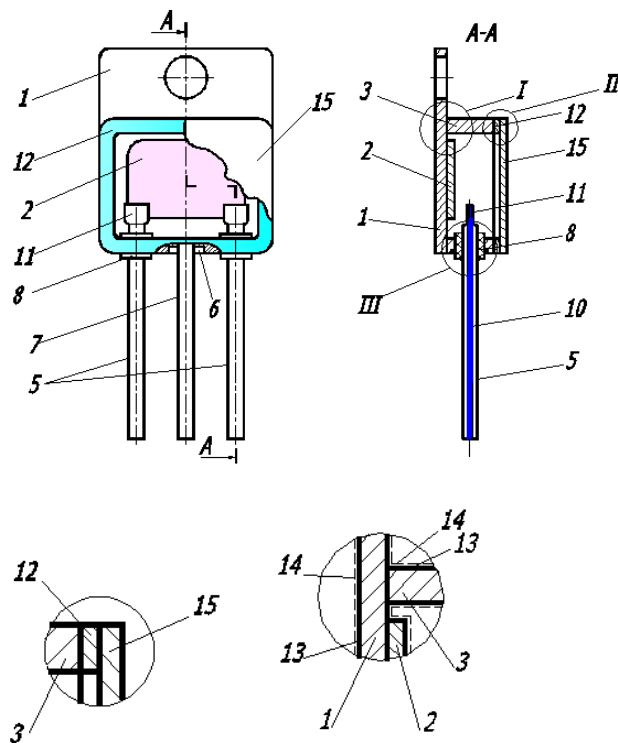


Рис.10.1. Металлокерамический корпус типа КТ-97С

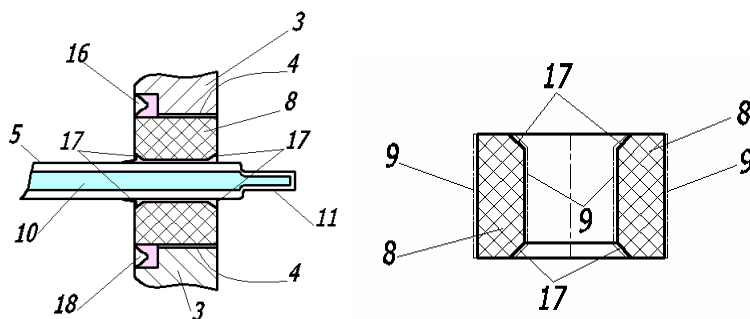


Рис.10.2. Керамический изолятор металлокерамического корпуса типа КТ–97С

На рис. 10.2 показан полый изолятор 8 из вакуум–плотной керамики с нанесенным на боковую поверхность слоем металлизации 9. На внутреннем отверстии изолятора выполнены фаски 17.

Изготовление таких керамических деталей производят горячим литьем, основанным на том, что керамический порошок и органическая связка в определенных условиях образуют устойчивую дисперсную систему – термопластичный шликер. Такая система в жидком состоянии обладает высокой подвижностью и под действием внешних сил может легко заполнять полость металлической формы. За счет теплоотвода на форму жидкий шликер затвердевает, образуя изделие заданной конфигурации.

Технологически метод горячего литья включает в себя два наиболее важных процесса – изготовление литьевого шликера и собственно литье. Процесс изготовления шликера состоит в смешивании керамического порошка с органической связкой и последующего вакуумирования смеси с целью удаления воздушных включений. Основные характеристики шликера: вязкость, литейная способность, плотность упаковки частиц, однородность – зависят от вида связки, количества порошка, метода их размешивания.

Процесс литья деталей осуществляется на полуавтомате М–902 или на машинах типов ЛМК–12, А–120–03 и других с автоматическим регулированием температуры и времени выдержки. При выборе параметров процесса литья важно правильно установить соотношение между давлением и температурой шликера, а также температурой отдельных элементов литьевой формы. Повышенные температуры и давление нарушают процесс плавного заполнения объема формы, и в теле отливки может оказаться большое количество воздушных пузырей. При повышенной температуре шликера при охлаждении отливки могут возникнуть усадочные раковины. Если отливка ведется при низких давлении и температуре, в обожженных изделиях может быть скрытый брак из–за малой механической прочности в местах выхода избытка шликера.

Наиболее важно обеспечить правильную конструкцию литьевой формы. Необходимыми условиями являются высокий класс обработки внутренней поверхности формы для обеспечения выемки деталей и достаточная толщина стенок для обеспечения нужного теплоотвода от шликера.

На примере керамического изолятора корпуса КТ–97С (рис.10.2) рассмотрим технологический маршрут изготовления керамических деталей методом горячего литья под давлением, который включает:

1. Приготовление шликера.
2. Вакуумирование шликера в течение времени до 4-х часов, обеспечивающее его однородность и удаление воздушных включений.
3. Литье керамических деталей, при температуре $T = 50\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении 20–30 МПа в течение 2–7 с. При этом производится постоянное перемешивание шликера для предотвращения расслоения составляющих компонентов шликера и вакуумирование шликера через каждые 3 часа в течении 45 минут для удаления воздушных пузырей.
4. Контроль деталей. Под микроскопом контролируют наличие пор, пустот, раковин на внутренней и внешней поверхности изделий. При обнаружении выше указанных дефектов, в шликер добавляют пластификатор для повышения пластичности массы шликера.
5. Загрузка деталей в лодочки с оксидом магния. Вкладыши ставят в лодочку с помощью пинцета вертикально, так, чтобы оксид магния входил в отверстия вкладышей, не допуская соприкосновения вкладышей друг с другом.
6. Предварительный обжиг производится при температуре $T = 1150 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8 часов.
7. Выгрузка деталей из лодочки с оксидом магния;
8. Отмывка от оксида магния;
9. Контроль деталей;
10. Нанесение металлических слоев.
11. Предварительная сушка металлических слоев;
12. Контроль деталей на наличие локальных непокрытий и замер толщины металлических слоев.
13. Загрузка деталей в лодочки с окисью магния;
14. Окончательный обжиг при температуре $T = 1580\text{--}1720\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8 часов;
15. Химическое никелирование;
16. Контроль деталей;
17. Шлифование деталей;
18. Контроль деталей.

Метод горячего литья имеет ряд важных достоинств:

- изотропность отлитых изделий;
- высокая плотность заготовки и однородность ее структуры;
- возможность одновременного формирования нескольких деталей в многоместных формах.

Основные характеристики применяемых керамических материалов для изготовления корпусов и деталей корпусов представлены в табл. 10.3.

Использование керамики в качестве изоляционного материала в корпусах ИМС обусловлено уникальным сочетанием его высоких электрофизических свойств с механической прочностью, стойкостью к воздействию температуры, влаги, химически агрессивных веществ и вакуумплотностью. Наибольшее распространение получила алюминооксидная (корундовая) керамика (80 – 96 % Al_2O_3), в меньшей степени используется бериллиевая керамика (95 – 99,5 % BeO).

Чистый корунд (α -модификация оксида алюминия Al_2O_3) плавится при температуре 2323 К. При массовом производстве деталей для электронных приборов (оснований и крышек корпусов, подложек, держателей, различных изолирующих вставок и т.д.) для снижения температуры спекания керамики до 1773–2073К к исходному порошку добавляют оксиды марганца, магния, кремния, кальция, хрома, титана, циркония. В результате содержание α - Al_2O_3 , в зависимости от марки керамики, устанавливается в пределах от 26 до 97 масс. %. Для изготовления плат и корпусов ИС разработано и освоено около 20 марок корундовой керамики.

Все марки керамики, которые идут на изготовление корпусов, имеют практически нулевое водопоглощение, удельное объемное сопротивление при комнатной температуре не менее 10 Ом·см и пробивное напряжение не менее 10 кВ/мм. При необходимости создания большой рассеиваемой кристаллом мощности алюмооксидную керамику заменяют бериллиевой, которая в 7 – 10 раз превосходит ее по теплопроводности.

Таблица 10.3. Значение основных параметров керамических материалов, используемых для производства корпусов и подложек ИМС

Параметр	Усредненные значения параметров для керамики					
	Al_2O_3 (90–96%)	BeO	AlN	SiC	BN	стеклокерамики
Объемная плотность, г/см ³	3,9	2,9	3,3	3,1	22,3	3
Коэффициент теплового расширения в диапазоне температур 293 – 673 К, 10 ⁻⁶ /К	6,7–7,3	7,2–8,0	4,3–4,5	4,2	11,2	3,0–4,2
Прочность на изгиб, МПа	300	230 – 250	350–500	450	–	150
Теплопроводность, Вт/м·К	20	240–260	100–230	67–270	55	5
Объемное сопротивление, Ом·см, не менее	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹² –10 ¹³
Диэлектрическая постоянная (частота 1 МГц)	8,5–9,7	6,5–7,0	8,8–8,9	40,0	4,2	3,9–7,8

Высокая стоимость и токсичность бериллиевой керамики препятствуют более широкому ее применению.

В последнее время стали использовать для этой цели керамику из нитрида кремния, хотя стоимость ее сейчас в десятки раз выше стоимости корунда.

В табл. 10.4 дано сравнение используемых в корпусах материалов по теплопроводности.

В прогнозах, касающихся перспектив развития керамики для подложек и корпусов ИС, особо отмечается, что наиболее быстрыми темпами будет увеличиваться производство бескислородной керамики (AlN, SiC, BN), стеклокерамических и других композиционных материалов на основе керамики, в которых сохраняются наиболее важные свойства нескольких керамических материалов. Например, можно изготавливать подложки, имеющие высокую теплопроводность нитрида алюминия и низкую диэлектрическую проницаемость муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$).

Таблица 10.4. Теплопроводность материалов.

Материал	Теплоемкость, Вт/мК
Стекло	0,7
Кварцевое стекло	1,36
Стеклокерамика	5
Ковар (Fe; 29% Ni; 17,5% Co)	10
Корунд (92 %-ный)	20
Латунь	111
Молибден	150
Вольфрам	200
Нитрид алюминия (AlN)	230
Окись бериллия (BeO)	240
Золото	308
Медь	384
Серебро	407

Переход к управлению свойствами создаваемой "электронной" керамики, к предварительному прогнозированию и расчету этих свойств станет, по-видимому, обычной практикой в технологии производства керамики в ближайшие годы.

В Японии в настоящее время резко увеличивается объем работ по получению и использованию тонких алмазных пленок. Применение алмазных пленок и алмазной керамики открывает большие перспективы в микроэлектронике благодаря их колоссальной теплопроводности (до 900 – 1000 Вт/м·К) и очень высокой электрической прочности (порядка 40 кВ/мм). Уже удается получить алмазные пленки толщиной 0,025 мкм и более, площадью до 20 – 30 см² на различных подложках. Рекордная скорость осаждения пленок (до 180 мкм/ч) достигнута в настоящее время в Японии. Алмазную керамику, получаемую прессованием при высоких температурах и давлениях и содержащую до 70 – 95 % зерен алмаза, выпускают многие фирмы Японии и США. Подложки из этой керамики используются в приборах высокотемпературной электроники.

10.5. Металлостеклянные корпуса

Другой большой группой диэлектрических материалов, применяемых в корпусах различного типа, являются стекла. Основу многих марок стекол составляет оксид кремния. Но чисто силикатное (кварцевое) стекло имеет малый КТР, порядка $(0,3 - 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, что не позволяет получать ненапряженные прочные спаи с металлами или керамикой.

Основные недостатки, присущие всем маркам стекол, – низкая теплопроводность, нестойкость к воздействию кислот. Кроме того, стекло – хрупкий материал, а его электрические свойства заметно изменяются с температурой.

Получение металлостеклянных спаев в производстве ИМС имеет специфические особенности. Одна из них – малый размер таких спаев. Другой особенностью является то, что при изготовлении полупроводниковых приборов металлостеклянный спай проходит ряд технологических операций, связанных с нагреванием, травлением, гальванической обработкой. Герметизация полупроводниковых приборов электроконтактной или холодной сваркой требует создания металлостеклянных спаев, исключаящих их разрушению под действием возникающих напряжений. Кроме того, к металлостеклянным спаям в полупроводниковом производстве предъявляют высокие требования в отношении надежности.

По кривым теплового (термического) расширения некоторых стекол, керамических материалов и металлов в зависимости от температуры можно легко определить, что согласованными будут спаи стекла С49–2, а также форстеритовой и корундовой керамики ВК94–1 с коваром. Напряжения, возникающие вследствие несовпадения КТР стекла (керамики) и металла в этих спаях, не превышают безопасных значений.

Несогласованными будут спаи стекла С87–1 с молибденом и керамики ВК94–1 с медью. Напряжения, возникающие в несогласованном спае вследствие несовпадения КТР стекла (керамики) и металла, могут достигать опасного для целостности слоя значения. Для сохранения спая в этом случае применяют особую конструкцию металлических деталей или специальные сплавы. Примером несогласованного спая может служить спай платинита со стеклом С97–1. Высокая упругость медной оболочки платинита значительно снижает напряжения, которые могут возникать вследствие разности КТР различных материалов.

Если напряжения превышают допустимые значения, происходит разрушение металлостеклянного спая, которое может быть двух видов: 1) в стекле образуются трещины; и 2) стекло отлипает от металла. Образование трещин происходит, когда сцепление между стеклом и металлом настолько велико, что превышает напряжение, разрушающее стекло (напряжение растяжения). Отлипание стекла от металла происходит, когда силы сцепления между частицами обоих материалов малы.

Различают механическое и оксидное спаивание стекла с металлом. При механическом спаивании стекло при непосредственном контакте с поверхностью металла смачивает металл и соединяется с ним. Такой спай обеспечивает хорошую герметичность, но он механически не прочен. При оксидном спаивании поверхностный оксидный слой диффундирует в

размягченное стекло, образуя промежуточный слой, в котором концентрация металла постепенно уменьшается. Отсутствие резкого перехода от металла к стеклу снижает создаваемые напряжения и увеличивает прочность спаев. При большой толщине оксида на поверхности металла спай может оказаться негерметичным.

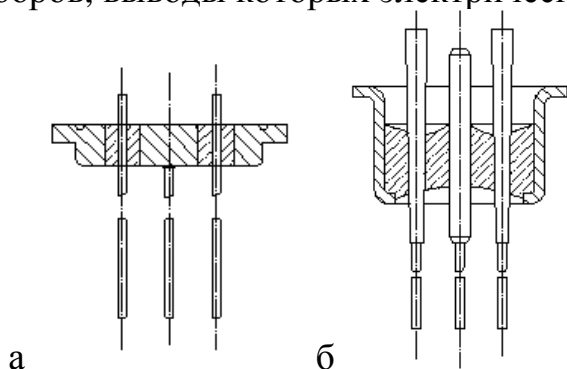
Основными условиями получения надежных металлостеклянных спаев являются:

- создание на поверхности тонкой и плотной пленки оксида и наличие у стекла хороших адгезионных свойств по отношению к металлу;
- нагрев металла и стекла до температуры спаивания;
- подбор пар стекло–металл с равными или близкими КТР в широком интервале температур;
- создание спаев, для которых напряжение, возникающие вследствие разности КТР стекла и металла, не являются опасными;
- использование металла с хорошей формоустойчивостью;
- обязательный отжиг стекла после получения металлостеклянного спаев;
- создание технологического процесса, исключающего образование газовых пузырьков в стекле, которые могут нарушить прочность и герметичность спаев.

По конструкции спаев стекла с металлом металлостеклянные ножки (корпуса) разделяют на четыре группы;

1. Ножки, имеющие металлостеклянный спай, с одиночными выводами. В этом случае стекло непосредственно спаивается с выводами и металлическим фланцем (рис. 3, а). Такие металлостеклянные спаи в основном применяют для маломощных приборов, так как они создают меньшую опасность нарушения герметичности ввиду отсутствия паек. Для надежного спаивания нужна его достаточная протяженность. При герметизации приборов электроконтактной или холодной сваркой на спай не должны передаваться опасные для его целостности напряжения. Металл по своим свойствам должен быть пригодным для получения надежного спаивания и хорошо свариваться электроконтактной и холодной сваркой.

2. Ножки, имеющие металлостеклянный спай, с несколькими выводами, проходящими через один стеклянный изолятор (рис. 10.3, б). Такие металлостеклянные спаи применяются в корпусах высокочастотных приборов, выводы которых электрически изолированы от корпуса.



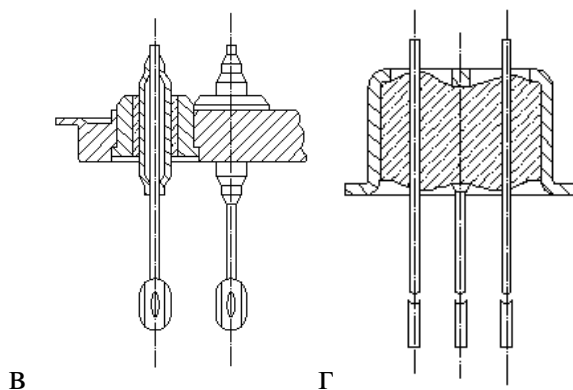


Рис.10.3 Конструктивное исполнение ножек корпусов с металлостеклянным спаем

3. Ножки имеющие металлостеклянный спай чашечного типа (рис. 10.3, в). Такие спаи применяются в корпусах малогабаритных приборов, выводы которых также электрически изолированы от корпуса. Спай достаточно протяженный, что обеспечивает его герметичность,

4. Ножки, имеющие металлостеклянный спай, с отдельными проходными изоляторами (рис.10.3, г). Такие спаи используют в корпусах мощных приборов, достоинством которых является возможность применения различных металлов для фланца и спая со стеклом. Недостатками их следует считать сложность технологического процесса изготовления, наличие паяных соединений, создающих дополнительную опасность нарушения герметичности, а также невозможность применения таких изоляторов в малогабаритных корпусах.

При подготовке стеклянных деталей к спаиванию с их поверхности удаляют грязь, жир, металлическую пыль и другие загрязнения, которые могут способствовать образованию газовых пузырей в стекле, затруднять спаивание и ослаблять сцепление стекла с металлом.

Стеклянные бусы травят в течение 1,5–2 мин в 28%–м водном растворе плавиковой кислоты. После травления бусы тщательно промывают холодной, а затем горячей водой в течение 5–10 мин и сушат на фильтровальной бумаге в сушильном шкафу. Более эффективным способом очистки поверхности стекла от механических загрязнений является ультразвуковая мойка.

Таблетки из стеклопорошка перед спаиванием промывают в насыщенном растворе дихромата калия в течение 2–3 мин, а затем в горячей и холодной проточной воде до удаления окраски дихромата калия и сушат 30 мин в сушильном шкафу при температуре 100–110 °С.

Если окажется, что на стеклянных бусах и таблетках имеются следы металлической пыли, их травят 3–5 мин в водородном растворе азотной кислоты (в соотношении 1:1), осторожно перемешивая, а затем промывают и сушат. Стеклянные детали должны быть чистыми, без следов глифталевой замазки и дихромата калия. Хранить обработанные детали следует в чистой таре с крышками.

Коваровые детали для очистки травят в водородном растворе серной и соляной кислот (1:1:1) при 60–80 °С в течение 10–20 мин (в зависимости от

толщины их стенок). При травлении вместе с оксидами и другими загрязнениями снимается тонкий слой металла. Затем детали последовательно промывают в проточной горячей и холодной дистиллированной воде, осушают в спирте и сушильном шкафу 10–15 мин.

После травления коваровые детали отжигают, а так как газовые пузырьки ослабляют спай и нарушают герметичность, наибольшее распространение нашел отжиг в водороде.

Для получения надежного спая стекла с металлом необходимо, чтобы шероховатость поверхностей металлических деталей была 5–7-го классов. Установлено, что сцепление стекла с шероховатой поверхностью металла значительно прочнее, чем с гладкой, но шероховатая поверхность легко загрязняется и трудно отмывается. Глубокие следы обработки нежелательны, так как спай может получиться негерметичным.

В производстве полупроводниковых приборов и ИМС в основном применяют два метода изготовления металлостеклянных спаев: в конвейерных печах и высокочастотным нагревом.

Метод получения спаев в конвейерных печах является наиболее распространенным, так как обладает высокой производительностью, воспроизводимостью результатов при стабилизированных технологических режимах, возможностью независимого регулирования газового и температурного режимов, а также режимов огневой полировки стекла, сравнительной простотой технологической оснастки и возможностью механизации сборки кассет.

Приготовленные к соединению стеклянные и металлические детали загружают в графитовые кассеты. Загрузку выполняют вручную пинцетами или используют напальчники, чтобы загрязняющие вещества не попадали на детали. При механизированной загрузке используют графитовые кассеты на 50–80 мест. При этом кассету ставят на стол вибростенда и накладывают на него металлический кондуктор с ящиком, в котором находятся стеклянные бусы. Отверстия в кондукторе совпадают с отверстиями кассеты, но по диаметру немного больше диаметра бус. Под действием вибрации в течение нескольких секунд в каждое отверстие кондуктора, а следовательно, и кассеты попадает только по одной бусине. Вибростенд включают и, предварительно наклонив кассету с кондуктором и ящиком на 90° , снимают их. Затем на место снятого ставят другой кондуктор с ящиком, в котором находятся выводы. Процесс повторяют. После этого загружают фланцы и собранную кассету передают на операцию спаивания.

Технологический процесс получения металлостеклянного спая определяется температурным, газовым и временным режимами работы конвейерной печи. Различают три этапа получения спая стекла с металлом в конвейерной печи.

На первом этапе осуществляется разогрев стеклянных и металлических спаев. При повышении температуры происходит размягчение стекла и окисление коваровых деталей кислородом, содержащимся в азоте. Скорость подъема температуры на этом этапе $60^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и может быть увеличена до $80\text{--}100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и более.

На втором этапе происходит спаивание стекла с металлом в атмосфере азота. Температура в печи достигает максимального значения. Расплавленное стекло смачивает окисленную поверхность коваровых деталей, оксидная пленка растворяется в нем и частично в самом коваре, образуя промежуточный слой. Время образования спая несколько минут. Хорошая смачиваемость ковара расплавленным стеклом С49–2 происходит в интервале температур 900 – 1000 °С.

На третьем этапе восстанавливается оксидная пленка на поверхностях коваровых деталей, свободных от стекла, и выполняется отжиг стекла в атмосфере водорода. Температура снижается со скоростью примерно 50–60 °С/мин до температуры верхней границы зоны отжига. Для стекла С49–2 верхняя граница зоны отжига 575 °С.

В интервале температур зоны отжига охлаждение производится со скоростью 6–10 °С/мин до температуры 110 °С. Вблизи нижней границы зоны отжига скорость снижения температуры желательнее иметь еще ниже, поэтому ниже зоны отжига стекла скорость снижения температуры составляет 3 °С/мин. Время прохождения зоны (20 мин) можно считать достаточным для снятия остаточных напряжений в стекле. При скорости движения конвейерной ленты печи от 0,1 до 0,12 м/мин получение спая происходит примерно за 1 ч. Вышедшие из печи кассеты охлаждаются до комнатной температуры, разгружаются и передаются на последующие операции.

Качество спая стекла с металлом зависит от стабильности давления газов в магистралях и рабочем туннеле цепи. В связи с тем что водород в семь раз легче азота, возможно разложение атмосферы и проникновение водорода в зону образования спая. Водород, попавший в зону спаивания, восстанавливает оксидную пленку на коваровых деталях и увеличивает хрупкость стекла. При смещении восстановленной водородной зоны по туннелю возможны выбросы пламени. При смещении защитной азотной зоны в сторону восстановительной зоны возможны потемнения спекаемых деталей вследствие окисления. Поэтому необходимо следить, чтобы водород в зону спекания не попадал, а газовый режим был стабилен.

Водород и азот, применяемые в конвейерных электропечах, необходимо контролировать на влажность (по точке росы) и содержанию кислорода. Пригодным для работы считают водород и азот с содержанием кислорода соответственно до 0,3–1%. Температура точки росы для водорода составляет –30 °С, а для азота –25 °С.

Водород имеет большую скорость диффузии в стекле, поэтому подача его в процессе охлаждения кассет при высокой температуре (выше 600 °С) может вызвать восстановление оксида ковара и снижение прочности спая. При подаче водорода в зону печи с меньшей температурой (при охлаждении кассет) прочность спая увеличивается.

Метод получения спаев высокочастотным нагревом имеет ограниченное применение и используется в основном для изготовления баллонов диодов. Основные достоинства этого метода – сравнительная чистота процесса получения спая, а также механизация загрузки деталей и автоматизация процесса спаивания стекла с металлом, а недостаток – сложность оборудования.

10.6. Пластмассовые корпуса

В настоящее время во всех странах ИМС широкого применения выпускаются в пластмассовых корпусах, которые обеспечивают низкую себестоимость и простоту организации автоматизированного производства.

Пластмассовые корпуса применяются для изделий массового и серийного производства, к которым не предъявляются повышенные требования к эксплуатации (повышенная защита от окружающей среды, повышенный теплоотвод и др.). Влагоустойчивость таких корпусов ниже, чем вакуумплотных. Поэтому для изделий с повышенными требованиями к эксплуатации применяют вакуумплотные металлокерамические, стеклокерамические или металлостеклянные корпуса. К недостаткам данного типа корпусов следует отнести также их относительно малую прочность, нагрузки на корпус передаются кристаллу, что резко снижает надежность ИМС по сравнению с аналогичными ИМС в металлокерамических и металлостеклянных корпусах.

ИМС в пластмассовых корпусах изготавливают посредством герметизации полупроводникового изделия пластмассой.

На рисунке 10.4 для примера показан полупроводниковый прибор в корпусе ТО–220. Корпус ТО–220 представляет собой пластмассовый корпус со следующими габаритными размерами: ШхВхД $10,5\pm 0,5$ мм х $4,5\pm 0,3$ мм х $29,05\pm 1,35$ мм.

Герметизация полупроводниковых приборов методом прессования пластмасс основана на свойстве ряда полимерных материалов расплавляться и течь под действием температуры и давления, заполняя при этом пустоты металлической формы с изделиями.

К пластмассам (пресс–материалам) предъявляются следующие основные требования:

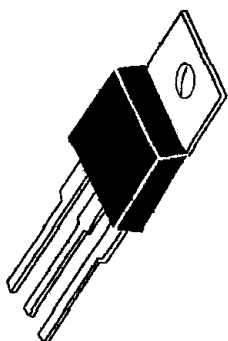


Рис. 10.4. Внешний вид полупроводникового прибора в корпусе ТО–220

- 1) хорошая текучесть при минимальном давлении для сохранения целостности полупроводникового прибора в процессе заливки;
- 2) строго определенное время сохранения текучести (до заполнения прессформы);
- 3) стабильность при хранении в течение 4–6 месяцев;
- 4) отсутствие абразивного воздействия на пресс–форму;
- 5) малая адгезия к стенкам формы (легкая выгрузка залитого прибора);
- 6) влагостойкость;

- 7) совместимость по коэффициенту температурного расширения (КТР) с материалом выводов;
- 8) отсутствие ионных примесей;
- 9) высокая теплопроводность;
- 10) достаточная механическая прочность, обеспечивающая определённые ударные нагрузки, вибрацию и ускорение;
- 11) высокие диэлектрические свойства (малые диэлектрические потери, высокое удельное сопротивление и высокая электрическая прочность);
- 12) способность к хорошему измельчению;
- 13) низкая стоимость;
- 14) способность обеспечивать товарный вид изделия.

Основные свойства пресс-материалов определяются их компонентами: смолой, отвердителем, катализатором, пластификатором, модификатором, наполнителем, аппретом и другими необходимыми добавками.

Смолы выполняют роль связки. Сейчас при герметизации полупроводниковых приборов широко применяются эпоксидные смолы благодаря таким техническим характеристикам, как низкая стоимость и высокая производительность процессов переработки. Эпоксидные смолы отличаются прочностью, высокими вязкостью и температурой стеклования, электроизоляционными свойствами, не изменяющимися при старении, негорючестью, хорошей адгезией к различным материалам, малым КТР, незначительной усадкой, а при отверждении – высокой химической стойкостью. Наиболее часто используются эпоксиноволачные смолы, реже бифенольные.

Отвердители служат для полимеризации эпоксидных смол и перевода их структуры в трехмерную сетку. Они обеспечивают вязкотекучие свойства до начала отверждения и необходимую скорость этого процесса.

Катализаторы ускоряют протекание реакций, приводящих к пространственному сшиванию полимера, и влияют на диэлектрические и влагопоглощающие свойства композиций. В качестве катализаторов часто используются амины.

Пластификаторы (полисульфид, полибутадиион и др.) снижают напряжение усадки, увеличивают пластичность компаундов, сокращают время литьевого прессования.

Модификаторы способствуют уменьшению остаточных напряжений, одновременно повышая ударопрочность. В качестве модификаторов применяют различные каучуки.

Наполнители вводятся для увеличения модуля упругости, твердости, теплопроводности, уменьшения КТР, коэффициента сжатия при отверждении, а также для улучшения перерабатываемости и снижения стоимости. На долю наполнителя приходится до 70% общей массы пресс-композиции. Максимально возможное количество наполнителя в системе определяется допустимой вязкостью композиции. Наиболее часто в качестве наполнителя применяют диоксид кремния (кварц) в двух аллотропических формах: аморфной и кристаллической (или в их сочетании). Введение наполнителей может сопровождаться загрязнением композиции различными примесями.

Аппреты усиливают сцепление между органическими полимерами и поверхностями неорганических наполнителей. При этом образуется система с улучшенными механическими свойствами, повышенной влагостойкостью и стойкостью к старению в неблагоприятных условиях. В качестве аппретов часто используют силаны.

Для надежной герметизации полупроводниковых приборов необходимо, чтобы пресс-материалы обладали достаточно высокой эластичностью, КТР, сопоставимым с материалами конструкции полупроводниковых приборов, повышенными теплостойкостью, теплопроводностью, влагостойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами и к тому же не содержали загрязняющих примесей. При создании пресс-композиций с заданными свойствами необходимо учитывать влияние различных, порой противоречивых, факторов. Например, при большой усадке облегчается извлечение материала из прессформы и уменьшается влагопоглощение. Но этого можно достичь и применением пластификаторов или аппретов. Их введение в компаунд уменьшает модули упругости и вязкости, повышает прочность на изгиб. Пластификаторы снижают хрупкость эпоксидной смолы, увеличивают стойкость пластмассового корпуса к механическим воздействиям и улучшают работоспособность его конструкции. В то же время они уменьшают термохимическую стойкость, увеличивают диэлектрические потери, снижают температуру стеклования, что ухудшает тепловые характеристики пресс-композиций и ведет к увеличению водопоглощения. Иными словами, создать универсальную, на все случаи жизни, пресс-композицию невозможно. Необходимая пресс-композиция выбирается исходя из ее физико-химических свойств и возможности обеспечить технологический процесс герметизации.

Основные марки пресс-материалов, используемых в серийном производстве, и их основные характеристики представлены в таблице 5.

Таблица 10.5. Основные характеристики пресс-материалов

Марка пресс-материала	Температура предварительного нагрева таблетки пресс-материала, °С	Температура герметизации, °С	Давление прессования, Па (кГ/см ²)	Давление смыкания пресса, Па (кГ/см ²)
MG40F, MG40F-25, MG40F-40	85-100	150-180	294·10 ⁴ – 707,6·10 ⁴ (30-72)	1364·10 ⁴ – 1840·10 ⁴ (150-300)
MG17F – 0309, MG20F – 0340	77-94	160-190	294·10 ⁴ – 882·10 ⁴ (30-90)	
ЕМЕ 9100ХК	70-90	160-180	196·10 ⁴ – 686·10 ⁴ (20-70)	

Плоскон S-7, Плоскон 3400	93–104	160–180	294·10 ⁴ 588·10 ⁴ (30–60)	–	
------------------------------------	--------	---------	---	---	--

В производстве дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем применяются в основном два способа герметизации прессованием: прямое и литьевое.

При прямом прессовании пресс-материал помещают непосредственно в пресс-форму, при литьевом – в загрузочную камеру.

Герметизация прямым прессованием (рис. 10.5) происходит следующим образом. В пресс-форму 2 загружают арматуру изделия и таблетированный или порошкообразный материал 3. При смыкании пресс-формы пресс-материал под воздействием теплоты и давления, развиваемого прессом, переходит в пластическое состояние и заполняет полость 4. По окончании выдержки опрессованные изделия вынимают из пресс-форм. При компрессионном прессовании давление не остается постоянным. В начале прессования, когда пресс-материал переходит в пластифицированное состояние, заполняет полость пресс-формы и начинает полимеризоваться, давление достигает максимума. К этому времени полость заполняется полностью, но пластмасса еще не затвердела. При дальнейшей выдержке высокое давление сохранять не нужно. Выдержку проводят при незначительном давлении, необходимом для противодействия давлению паров летучих веществ и воды, выделяемых пресс-материалом.

Основными операционными параметрами технологического процесса прессования являются:

- 1) температура;
- 2) удельное давление;
- 3) продолжительность выдержки герметизируемых изделий под давлением в пресс-форме.



Рис. 10.5. Последовательность операций герметизации методом прямого прессования: *а* – арматура, *б* – размещение арматуры в пресс-форме; 1 – арматура выпрямительного диода, 2 – пресс-формы, 3 – пресс-материал, 4 – полость пресс-формы

Оптимальные технологические режимы прессования выбираются в результате предварительных расчетов и оценки качества

загерметизированных образцов (визуально, сравнением физико-химических показателей и полноты отверждения). Давление прессования определяют по формуле

$$P_{пр} = P_{уд} \cdot S_{зк} / (\eta \cdot S_{пл}) \quad (10.1)$$

где $P_{уд}$ удельное давление прессования (зависит от размеров и конфигурации корпуса, конструкции пресс-формы, партии пресс-материала, предварительного подогрева); $S_{зк}$ – площадь горизонтальной проекции загрузочной камеры; η – КПД гидравлического пресса; $S_{пл}$ – площадь поперечного сечения плунжера пресса.

Наиболее широкое применение в условиях серийного производства полупроводниковых приборов нашел метод литьевого прессования.

При литьевом прессовании (рис. 10.6) загрузочная камера пресс-формы отделена от формообразующей полости. Пресс-материал помещают в загрузочную камеру, где он подвергается воздействию теплоты и давления. Переходя в полужидкое состояние, пресс-материал по специальным каналам – литникам поступает в формообразующую полость пресс-формы, в рабочих гнездах которой размещена арматура и полупроводниковые изделия. При этом обеспечивается полный равномерный прогрев всего пресс-материала.

Технологический процесс литьевого прессования на съемных пресс-формах состоит из подготовки пресс-форм и размещения в них рамок выводных (арматур) с напаянными и разваренными кристаллами полупроводниковых приборов, собственно литья, доделочных операций, контроля качества опрессованных приборов.

При заполнении пресс-формы достаточно вязкими жидкими композициями, могут происходить повреждения изделий и монтажных соединений. Эти повреждения могут появиться в результате возникновения механических воздействий на детали изделий из-за гидравлического сопротивления протеканию пластмассы в формообразующей полости пресс-формы.

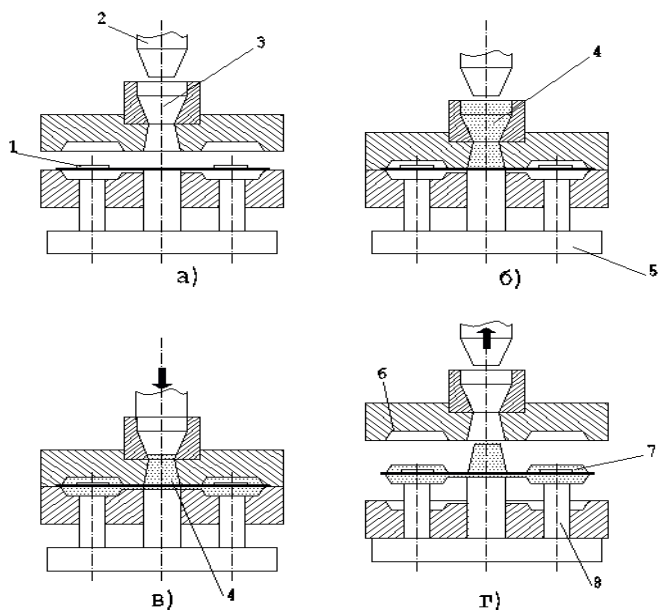


Рис. 10.6. Последовательность операций при герметизации методом литьевого прессования:

a – размещение арматуры в пресс–форме, *b* – загрузка пресс–материала, *в* – прессование; *г* – извлечение изделия из формы, *1* – рамка выводная с кристаллами, подлежащими герметизации, *2* – пуансон, *3* – загрузочная камера, *4* – пресс–материал, *5* – выталкиватель, *6* – матрица, *7* – загерметизированный прибор, *8* – колонки выталкивателя

При герметизации пластмассами способом литьевого прессования большое значение приобретает точная дозировка пресс–материала, загружаемого в загрузочную камеру. Такая дозировка обычно обеспечивается предварительным таблетированием пресс–материала, т.е. его механическим прессованием в твердые таблетки определенной формы и размеров на специальных таблеточных машинах.

К преимуществам таблетирования порошкообразных материалов относят: уменьшение объема исходного материала, а, следовательно, и размеров загрузочных камер прессформы и упрощения их загрузки; сокращение потерь сырья; ускорение процесса предварительного подогрева и сокращение цикла прессования.

Наиболее удобно герметизировать прессованием полупроводниковые приборы, собранные на рамках, где имеются специальные технологические отверстия, которые совмещают с фиксирующими штырьками пресс–форм для точной посадки арматуры в формирующие полости.

Качество герметизации в большой степени зависит от конструкции пресс–форм, которые являются сложным и дорогостоящим технологическим приспособлением.

Устройство пресс–форм разнообразно и зависит от конструкции герметизируемого изделия, имеющегося оборудования и требуемой производительности. Пресс–формы, используемые для литья, по характеру эксплуатации могут быть съемными и стационарными; по количеству одновременно прессуемых изделий – одно– и многогнездными; по положению плоскости разъема – с одной или несколькими плоскостями разъема.

В одногнездных пресс–формах за один цикл прессования герметизируется одно изделие, в многогнездных – сразу несколько и даже несколько десятков или сотен.

10.7. Корпуса чашечного типа

В последнее время наиболее широко применяются стеклокерамические корпуса (СКК) чашечного типа, обеспечивающие высокую надежность ИМС. Кристалл и проволочные соединения размещены во внутренней полый зоне, что значительно снижает долю отказов ИМС из–за обрывов. Однако герметизация СКК происходит при довольно высокой температуре (порядка 450 °С) в течение 7–10 мин. Например, исследования показали, что воздействие указанного режима герметизации на ИМС с диодами Шоттки на основе алюминия приводит к возрастанию прямого напряжения от 10 до 40 мВ. Это снижает процент выхода годных изделий по электропараметрам ИМС на 5 – 10 % по сравнению с теми же ИМС, герметизируемыми при более низких

температурах. В результате повышается себестоимость их производства. Еще более чувствительны к воздействию высокой температуры герметизации ИМС на основе МОП–транзисторов.

С целью повышения процента выхода годных изделий, повышения качества и надежности ИМС при эксплуатации разработаны металлополимерные и керамикополимерные корпуса чашечного типа, конструкция которых выполнена аналогично конструкции стеклокерамических корпусов, с той лишь разницей, что герметизация осуществляется не стеклом, а полимером при низкой температуре (не выше 180 °С). Наличие полых зон внутри корпусов позволяет отбраковывать негерметичные ИМС стандартными методами.

Чашечные металлополимерные (МПК) и керамикополимерные (КПК) корпуса состоят из основания, крышки и выводной рамки. Основание и крышка в МПК изготовлены из алюминиевого сплава и покрыты изоляционной пленкой оксида (Al_2O_3), а в КПК – из керамики, применяемой для стеклокерамических (СКК) и металлокерамических корпусов (МКК).

На рабочих поверхностях основания и крышки, имеющих в центре несквозные углубления для формирования внутренней полости в корпусе, содержится слой частично отвержденного термореактивного компаунда. В процессе герметизации МПК и КПК основания, выводная рамка и крышка совмещаются, и при температуре не выше 180 °С происходит полное затвердевание компаунда с образованием узкого полимерного шва площадью не более 0.8 см^2 . Внешние выводы МПК и КПК проходят сквозь полимерный шов. В качестве термореактивного компаунда применяют порошкообразный эпоксидный полимер. Его достоинства: высокая влагостойкость, обусловленная более низкими, чем у других полимеров, коэффициентами сорбции, проницаемости и диффузии; низкое содержание ионных примесей (на уровне лучших пресс–материалов); высокая технологичность при нанесении и герметизации; высокое содержание наполнителя, обеспечивающее необходимую вакуумную плотность полимерного материала, что позволяет проводить контроль герметичности корпусов не только жидкостным, но и гелиевым методами.

Глава 11. СБОРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

11.1 Разделение пластин на кристаллы

Технология производства интегральных микросхем на стадии подготовки кристаллов и плат к сборке в корпусах предусматривает разделение полупроводниковой пластины или диэлектрической подложки с функциональными элементами и компонентами на отдельные кристаллы. Полупроводниковая пластина со сформированными интегральными микросхемами или дискретными полупроводниковыми приборами, поступающая на операцию разделения и аккумулирующая в себе значительные трудовые и материальные затраты, обладает большой стоимостью. Это обстоятельство налагает

высокую ответственность на операцию разделения, определяет ее важное место во всей технологической цепочке производства.

Требования к операции разделения пластин на кристаллы формируются в соответствии с требованиями, предъявленными к кристаллу. Основными из них являются высокий процент выхода годных кристаллов; геометрическая точность кристаллов; сохранение целостности функциональных слоев на кристалле и низкий уровень сколов по краям кристаллов.

Традиционные методы резки, применяемые в металлообрабатывающей промышленности, не всегда могут быть использованы, т.к. полупроводниковые материалы отличаются высокой твердостью и хрупкостью. Кроме того, традиционная механическая резка сопряжена с большими потерями дорогостоящего полупроводникового материала. В технологии микроэлектроники применяют следующие способы разделения пластин на кристаллы: резка пластин диском с наружной режущей кромкой; резка пластин стальными полотнами и проволокой с применением абразива; разделение пластин скрайбированием алмазным резцом или лазерным лучом с последующей ломкой; ультразвуковая резка пластин; разделение пластин травлением.

Из перечисленных способов наибольшее распространение нашли резка алмазным режущим диском, скрайбирование алмазным резцом и лазерное скрайбирование с последующей ломкой. Резка алмазным режущим диском наиболее простой и легко осуществимый в производственных условиях способ резки полупроводниковых материалов. Алмазная кромка диска обладает высокой режущей способностью.

Механизм резки полупроводникового материала ДАР (диск алмазным режущим) следующий: каждое алмазное зерно представляет собой микрорезец, который снимает мельчайшие стружки с обрабатываемой поверхности полупроводникового материала. Резка производится на высоких скоростях (до 30 000 об/мин), с одновременным участием большого количества алмазных зёрен, в результате чего достигается высокая производительность обработки. При резке выделяется большое количество тепла, поэтому ДАР необходимо охлаждать водой или специальной охлаждающей жидкостью.

Схема резки полупроводниковой пластины диском с наружной алмазной режущей кромкой приведена на рис. 11.1. Диск 1 устанавливается на шпинделе станка и зажимается с двух сторон фланцами 2. В процессе резания алмазный режущий диск вращается с большой скоростью и охлаждается жидкостью 3. Разрезаемую полупроводниковую пластину 4 закрепляют клеящей мастикой 5 на основании 6. Для увеличения производительности на шпинделе станка через прокладку размещают несколько ДАР. Толщину прокладок выбирают в зависимости от требуемых размеров кристаллов.

Основным недостатком резки диском с наружной режущей кромкой является невысокая жесткость инструмента (ДАР), зависящая в основном от соотношения его размеров (толщины и внешнего диаметра). Один из путей повышения жесткости инструмента (ДАР) – увеличение скорости его вращения. Возникающие при этом центробежные силы действуют по радиусу ДАР, стремясь разрушить диск, при этом при большом числе оборотов (свыше 10000 об/мин) возникают вибрации станка и режущего инструмента.

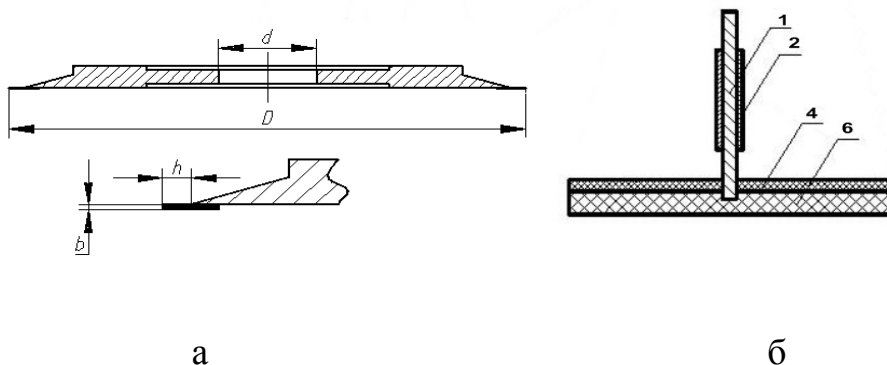


Рис. 11.1. ДАР (а): b – толщина лезвия; h – высота лезвия; d – посадочный диаметр; D – внешний (рабочий) диаметр и схема резки пластины (б)

Для увеличения жесткости применяют более толстую основу ДАР, однако при этом получается большая ширина пропила, что увеличивает потери полупроводникового материала. Жесткость инструмента может быть увеличена также за счет уменьшения разности внешнего диаметра ДАР и прижимных фланцев или прокладок. Установлено, что ДАР будет обладать большей жесткостью, если режущая кромка выступает за края прокладок не более чем на 1,5 толщины разрезаемого материала. Современный ДАР имеет алюминиевый корпус, на котором электрохимическим методом осажден никель (в качестве связующего материала) с различными абразивными включениями (для разделения пластин используют мелкие зёрна алмаза размером 3 – 5 мкм). Для вскрытия режущей кромки с части корпуса никель удаляется химическим травлением.

При резке пластин ДАР на скоростях вращения инструмента выше 45000 об/мин вследствие интенсификации гидромеханических процессов возрастает величина сколов в зоне реза. Проблема устранения этих явлений была решена в конструкции диска, где за счёт введения тонкого слоя алмазного адгезионного материала между абразивным слоем режущей кромки и опорным кольцом диска обеспечивается поглощение энергии колебаний стоячих волн в режущей кромке, что обеспечивает более высокое качество реза.

Усовершенствованным вариантом ДАР является конструкция, представляющая собой тончайшее лезвие в форме круга, основой которого является эластичный компаунд с равномерно распределёнными в нём по объёму алмазными зёрнами. Тонкое лезвие зажимается между двумя обкладками, придающими ему жёсткость. Такой диск обеспечивает получение ширины реза, равной его толщине.

Алмазный режущий диск – своеобразный абразивный инструмент, и поэтому боковые плоскости кристалла имеют вид шлифованной поверхности. Благодаря использованию высоких скоростей движения ДАР можно резать хрупкие, твёрдые и другие материалы. Качество разделения пластин и износостойкость дисков определяется, в первую очередь, точностью оборудования и правильным выбором технологических режимов резания. Выбор оптимального технологического режима резания определяется

свойствами обрабатываемых и обрабатываемых материалов, глубиной резки и допустимым уровнем сколов.

При разделении полупроводниковых пластин на кристаллы с сохранением ориентации кристаллов, заданной на пластине, дисковую резку проводят на эластичных адгезионных носителях, представляющих собой полимерные ленты с адгезионным слоем на поверхности, либо на жёстких подложках, в качестве которых могут использоваться бракованные кремниевые пластины, графит, керамика и другие материалы. Для закрепления пластины чаще всего используют "электронный" воск.

При использовании гибкого носителя пластины надрезаются до минимальной перемычки (~ 10 мкм). Операция разламывания на кристаллы, характерная при скрайбировании, отсутствует, а осуществляется непосредственно на операции монтажа, где каждый из кристаллов снимается с адгезионного носителя с подколом. Качество этого процесса в значительной степени определяется свойствами адгезионного носителя, обеспечивающего сохранение ориентации кристаллов при обработке и межоперационной транспортировке. Адгезионный носитель по физико-химическим свойствам должен быть совместим с кремниевым, а также обладать исключительной равномерностью клеевого покрытия, стабильностью адгезионных свойств в воде (отмывка в воде после резки), высокой пластичностью (растягиваться в 1,5–2,0 раза) и способностью сохранять напряжённое состояние при растягивающих усилиях.

При выборе типа адгезионного носителя необходимо учитывать размеры кристаллов: чем больше кристалл, тем меньшей адгезией должен обладать носитель. Это требование определяется необходимостью беспрепятственного съёма при монтаже.

Полупроводниковая пластина, наклеенная на адгезионный носитель – ленту для сохранения ориентации разделённых кристаллов, закрепляется в кассете, обеспечивающей натяжение ленты. Такие кассеты выпускаются двух типов в различном конструкторском исполнении: кольцеобразные и прямоугольные.

Скрайбирование является одним из методов деления пластин на кристаллы, заключающееся в том, что на поверхность полупроводниковой пластины резцом, лазерным лучом или другими способами наносят неглубокую риску (англ. scribe), вокруг которой концентрируются остаточные напряжения, ослабляющие прочность материала. Основным достоинством метода скрайбирования наряду с высокой производительностью и культурой производства является малая ширина прорези, а, следовательно, и отсутствие существенных потерь полупроводникового материала, которых невозможно избежать при использовании других методов деления пластины на кристаллы. Наиболее широко скрайбирование используют в планарной технологии изготовления ИМС, когда на пластине уже сформированы полупроводниковые структуры.

Разделение осуществляется в две стадии: вначале пластины скрайбируют, для чего риски наносят между готовыми структурами по свободному полю в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а затем разламывают по

рискам на прямоугольные или квадратные кристаллы. Операция разламывания производится на специальном технологическом оборудовании.

Качество скрайбирования при механическом создании риски резцом и последующей ломки в значительной степени зависит от состояния рабочей части алмазного резца. Работа резцов с изношенным режущим ребром или вершиной приводит к сколам при скрайбировании и некачественной ломке. Обычно скрайбирование выполняют резцами, изготовленными из натурального алмаза, которые по сравнению с более дешёвыми резцами из синтетических алмазов имеют большую стойкость. Наибольшее распространение получили резцы, имеющие режущую часть в форме трёхгранной или усечённой четырёхгранной пирамиды, режущими элементами которой являются ребра.

Средняя стойкость резца (одного режущего ребра) при скрайбировании кремния составляет 25 – 40 пластин диаметром 100 мм (3500 резов), после чего или при появлении сколов на пластине резец необходимо проконтролировать под микроскопом. Как показывает опыт, применять резцы с износом режущего ребра более 10–15 мкм нецелесообразно, так как они не обеспечивают качественного скрайбирования. Кроме того, при чрезмерном износе вершин и режущего ребра их восстановление при переточке резца затруднено. К быстрому износу резца приводит скрайбирование пластин с покрытием из оксида кремния или другого диэлектрика. На таких пластинах необходимо предусматривать специальную (без покрытия) дорожку из полупроводникового материала шириной 50–75 мкм.

При скрайбировании образуется дефектная зона, шириной 10–15 мкм, содержащая сколы и другие дефекты (рис. 11.2). В таком случае, учитывая ширину скрайберной дорожки, ширину пропила и ширину дефектной зоны, получают соотношение:

$$b \leq D - 2 X_d \quad (11.1)$$

где b – ширина пропила (равна ширине режущей кромки ДАР), D – ширина скрайберной дорожки, X_d – ширина дефектной зоны.

Например, для разделения пластины на кристаллы с шириной скрайберной дорожки 50 мкм необходимо выбрать ДАР4–А с толщиной лезвия 20 мкм.

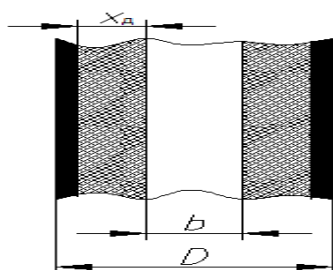


Рис. 11.2. Скрайберная дорожка и пропил

Широкое применение нашло также лазерное скрайбирование полупроводниковых пластин, при котором надрез (риска) образуется не механическим, а электрофизическим способом – испарением узкой полосы

полупроводникового материала с поверхности пластины с помощью сфокусированного лазерного пучка, имеющего большую мощность излучения.

Принципы разделения пластин на кристаллы с помощью лазерного луча основаны на локальном взаимодействии луча лазера с материалом полупроводниковой пластины, расплавлении и испарении его на линии разделения. Преимуществами процесса являются: универсальность, высокая производительность (скорость скрайбирования может быть увеличена в несколько раз (до 100 – 200 мм/с) благодаря тому, что луч лазера всегда контактирует с поверхностью пластины), малая ширина реза, отсутствие механических повреждений (на рабочей поверхности пластины не происходит образования микротрещин и сколов вследствие отсутствия выкрашивания кремния в зоне взаимодействия лазерного луча с полупроводниковым материалом, возможно скрайбирование пластин с любыми, в том числе с диэлектрическими покрытиями, возможно сквозное разделение пластины без последующего разламывания их на кристаллы.

Размеры риски – ширина и глубина, зона термического влияния лазерного луча, а также скорость скрайбирования и равномерность удаления материала по всей длине риски определяется скоростью перемещения пластин относительно лазерного луча, мощностью, частотой и длительностью импульсов лазерного излучения, а также размером сфокусированного пятна.

Современные установки лазерного скрайбирования позволяют получать риски шириной около 30 мкм и глубиной не менее 50 мкм при скорости скрайбирования свыше 50–100 мм/с. Зона термического воздействия лазерного излучения составляет не более 50–75 мкм, включая ширину риски. Скрайбирование на большую глубину, в том числе сквозное разделение (на глубину до 200 мкм), выполняют с меньшей скоростью (5–10 мм/с).

К недостаткам лазерного скрайбирования следует отнести большую сложность и стоимость оборудования, а также необходимость специальных мер защиты рабочей поверхности от продуктов лазерной обработки, образующихся в процессе испарения материала под воздействием лазерного излучения.

Чтобы разламывание было оптимальным, алмазный резец должен проникать в материал пластины на достаточную глубину, создавая однородную линию скрайбирования без избыточного количества стружки. Напряжения в подложке, вызванные образованием качественной глубокой борозды достаточны, чтобы раскалывание было лёгким. Для этого при скрайбировании должна образоваться вертикальная трещина, перпендикулярная поверхности подложки. Режущая кромка алмазного резца представляет собой вершину трёхгранника (рис. 11.3). Ведущая кромка (позиция 3), называемая хребтом трёхгранника или четырёхгранника, должна быть расположена по направлению движения резца. Отклонение от этого направления называется аксиальным углом. Если аксиальный угол отличается достаточно сильно от нуля, резец при движении будет вибрировать. Угол между хребтовой кромкой и направлением движения называется углом реза (5° – 10°). Хребтовый угол – это угол между двумя ведомыми кромками, который определяет отношение ширины реза к глубине.

Настройка угла реза позволяет изменять глубину бороздки. При малых углах реза глубина бороздки мала, большие углы реза позволяют получить

более глубокие бороздки. Для наилучших результатов скрайбирования необходимо подобрать оптимальный угол реза. Большое значение имеет вес груза или давление, прикладываемое к резцу, так как оно тоже влияет на глубину реза. При недостаточном давлении образуется неглубокая бороздка без вертикального растрескивания, необходимого для хорошего разламывания. Подбор веса груза для каждого конкретного реза производится методом проб и ошибок. Величина нагрузки зависит от конфигурации алмазного резца.

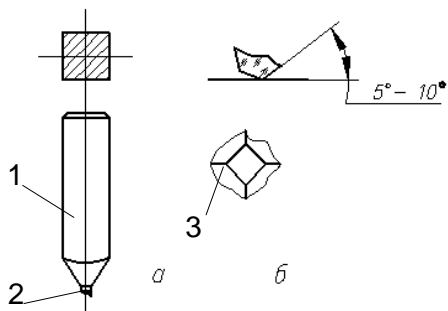


Рис. 11.4. Алмазный резец: а – схематичное представление, б – геометрия заточки: 1 – корпус резца; 2 – алмаз, 3 – ведущая кромка

Хотя существует много типов алмазных резцов и геометрии заточки алмаза, наилучшим образом зарекомендовала себя геометрия заточки кристалла с коническим остриём радиусом 1,2–2,3 мкм. Такая геометрия позволяет исключить ряд отмеченных выше факторов, влияющих на качество скрайбирования.

С увеличением радиуса кривизны увеличивается требуемая нагрузка. В производстве используются минимальные радиусы заточки, необходимая нагрузка для которых составляет 28–140 г. Дополнительное преимущество использования малых нагрузок с такими остриями проявляется при поперечном скрайбировании, так как при малых нагрузках образование излишней стружки при пересечении линии скрайбирования минимально.

Разламывание выполняется машинным или ручным способом. Ручное разламывание обычно позволяет получать больший процент выхода годных кристаллов, чем машинное. Так как при использовании многолезцовой головки производится одновременное скрайбирование всей пластины, ручное разламывание позволяет, если это понадобится, производить разламывание в любой последовательности. Обычное разламывание производится таким образом, чтобы на разделение одной пластины приходилось наименьшее число разламываний. Однако при ручном разламывании оператор может "почувствовать", когда необходимо дополнительное усилие, и затем в соответствии с этим может изменить последовательность. Например, если оказывается, что для разламывания по одной из длинных линий необходимо большее усилие, оператор может быстро изменить последовательность и произвести сначала разламывание по более короткой линии. Поэтому после того, как пластина расколота на малые части, "трудная" линия будет разделена на части малой длины, благодаря чему разламывание коротких частей станет более простым. Другим преимуществом ручного разламывания является возможность наблюдения оператором каждой линии в процессе

разламывания, что позволяет обнаружить заблаговременно линии некачественного разлома.

Линия реза коническим алмазным резцом должна быть неглубокой, без следов образования узора из трещин. Избыточная нагрузка на резец проявляется в виде большого количества отщеплённых кусочков пластины. Образующиеся при этом трещины и сколы образуют картину, похожую на выпадение инея. В зависимости от нагрузки такая картина может возникнуть в процессе скрайбирования либо сразу после него, а иногда и несколько часов спустя. В результате при разламывании линия скола может начать распространяться вдоль линии скрайбирования, но затем может изменить направление, и распространиться вдоль любой из трещин. Поэтому необходимо, чтобы между скрайбированием и разламыванием проходило минимальное время.

Наиболее распространёнными являются методы разламывания скрайбированных пластин сферой, полуцилиндром и валиком. Разламывание пластины на цилиндрических и сферических (рис. 11.4) опорах позволяет получать кристаллы с соотношением сторон от 1:1 до 1:1,5. Радиус кривизны сферы или полуцилиндра для различных размеров кристаллов должен быть различным.

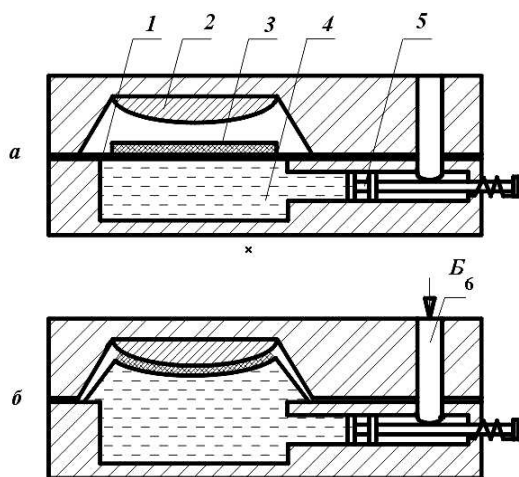


Рис. 11.5. Схема пневмогидравлической ломки пластин на сферических опорах: а – исходное положение; б – положение после разламывания, 1 – эластичная диафрагма, 2 – опора, 3 – скрайбированная пластина, 4 – рабочая жидкость (глицерин), 5 – плунжер, б – сжатый воздух

Более универсальным является метод разламывания валиком (рис. 11.5). Пластины помещают скрайбированной поверхностью на упругую опору и прокатывают последовательно в двух взаимно перпендикулярных направлениях твердым валиком диаметром 10–30 мм. Усилие нагружения подбирается в зависимости от жесткости опоры. Меньший диаметр валика и более жесткие опоры используются при меньших отношениях длины кристалла к толщине пластины (l/H). При больших значениях параметров отношения l/H вместо валика применяют клин с небольшим радиусом скругления, который последовательно ориентируют по линиям скрайбирования полупроводниковой пластины (рис. 11.6). Усилие нагружения при разламывании клином должно быть программируемым.

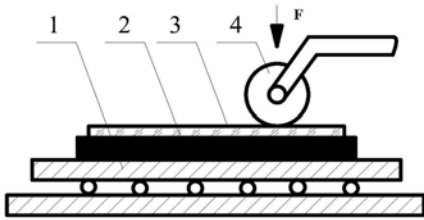


Рис. 11.6. Разламывание пластины валиком:

1 – подвижный стол, 2 – упругая опора, 3 – скрайбированная пластина, 4 – валик

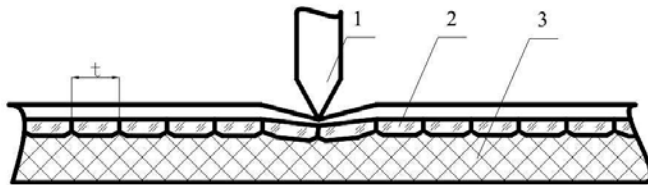


Рис. 11.7. Схема разламывания клином:

1 – клин, 2 – скрайбированная пластина, 3 – упругое основание

В настоящее время для подложек тонкоплёночных микросхем используется керамика с высоким содержанием оксида алюминия, которая является слишком твёрдой для обычного скрайбирования и разламывания. Для резки керамических подложек применяется распиливание алмазным диском, которое состоит из четырёх основных этапов: закрепление и ориентация подложки, распиливание, демонтаж и очистка.

Подложки закрепляются на металлических пластинах, поддерживающих их при распиливании. Для этого подложки приклеиваются к пластинам с помощью подогретого гликольфталата. Подложка ориентируется точно по отношению к ограничителю на пластине и будущая линия реза будет нанесена параллельно прямоугольным краям пластины. Затем пластина с наклеенной подложкой монтируется на магнитном зажимном устройстве установки для резания. В пластине имеются продольные канавки, что позволяет вести резку подложки насквозь, не задевая алмазным диском металла пластины.

Для операции резания на общей оси монтируются несколько алмазных дисков, что обеспечивает получение большого числа параллельных резов. Подгонка расстояний между дисками осуществляется с помощью металлических прокладок и клиньев из пластмассы. Первоначальная ориентация пластины по отношению к дискам осуществляется с помощью подгонки ориентацией столика. После этого предполагается, что все пластины с подложками точно совмещены, если они точно и надёжно установлены по отношению к упору магнитного зажимного устройства. Для уменьшения времени настройки используются два набора дисков, один из которых настраивается для резки в одном направлении и другой – в направлении, перпендикулярном к первому.

Обычно для получения максимальной производительности требуются высокие скорости резания. Выбор конкретной скорости определяется

следующими факторами: число дисков на оси, размеры и концентрация алмазных кристаллов на диске, требуемое качество обработки края подложки и желательный срок службы диска. Для получения чистых, близких к полированным краев, применяется резка при малой скорости с использованием дисков с мелкозернистыми алмазами. Увеличения размеров частиц и скорости реза приводит к более глубокой поверхности реза и может привести к появлению зазубрин и растрескиванию.

Так как размеры микросхемы должны точно выдерживаться и края подложки должны быть в приемлемой степени гладкими с минимальным количеством зазубрин и трещин, для использования в производстве необходимо выбирать алмазные диски высшего качества и использовать скорости резки 100–200 об/мин.

После окончания резания по обоим направлениям пластину с подложкой снимают с магнитного зажимного устройства и помещают в растворитель. Когда клеящее вещество размягчится, подложка снимается с пластины и остатки клеящего вещества удаляются растворителем, например, ацетоном.

Для резки кремниевых пластин используется полуавтомат дисковой резки ЭМ–2055, в котором имеется 25–местная кассета, манипуляторы, обеспечивающие точную и согласованную подачу пластин с одной позиции на другую, система автоматического совмещения и резки пластин. В процессе резки пластины на кристаллы осуществляется постоянный контроль за состоянием диска. По завершению резки разделённая на кристаллы пластина передаётся на очистку. Автомат оснащен системой постоянного контроля за всеми выполняемыми операциями. Программа работы автомата разработана на операционной системе Windows–95 и позволяет графически изображать на дисплее весь процесс обработки пластины. Виброзащищённость конструкции обеспечена за счет применению основания станка, выполненного из твёрдокаменных пород и перемещения предметного столика по координатам X,Y на воздушных опорах. В автомате применен бесконтактный контроль диаметра режущего диска с коррекцией глубины реза.

Универсальная установка резки подложек ЭМ–2085 предназначена для деления подложек на кристаллы в спутниках–носителях. Установка построена в соответствии с традициями общемировой практики аналогичного класса установок, оснащенных одним высокопрецизионным электрошпинделем. Установка обеспечивает автоматическую резку с ручной ориентацией подложек из кремния, германия, сапфира, керамики, арсенида галлия.

Особенностями установки являются наличие гранитного основания, обеспечивающего поглощение вибраций и сохранение точности при длительном сроке эксплуатации; перемещение предметного столика на воздушных опорах.

Установка имеет датчики обратной связи на приводе координат X,Y,Z бесконтактную систему для контроля глубины реза и износа лезвия, расширенную память процессора и закрытую зону обработки, что обеспечивает качественную эксплуатацию оборудования. Характеристики установок приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1 – Технические характеристики автомата ЭМ–2055

Максимальный диаметр пластин, мм	200
Диапазон скорости подачи предметного столика, мм/с	0,1 – 400
Число оборотов шпинделя, об./мин	14000 – 40000
Мощность шпинделя, Вт	500
Давление деионизованной воды, МПа	0,2 – 0,3
Давление сжатого воздуха, МПа	0,5 – 0,6
Вакуум, МПа	0,04 – 0,03
Электропитание и потребляемая мощность	220 В, 50 Гц, 2 кВт
Габаритные размеры, мм	1360 x 1000 x 1700
Масса, кг	800

Внешний вид установок сквозного резания пластин на кристаллы алмазным диском ЭМ–2055 ("Планар") (а), ЭМ–2085 (б) и М 918 (фирма К&S) (в) приведен на рис. 11.8. Полуавтомат дисковой резки ЭМ–2085 предназначен для резки полупроводниковых пластин диаметром до 200мм в спутниках рамочного типа на адгезионном носителе. Полуавтомат обеспечивает полный технологический цикл резки: ручную загрузку спутника с необработанной пластиной; полуавтоматическую ориентацию пластины с системой видеообработки через телевизионную видеокамеру; прецизионную резку с минимальной величиной дефектной зоны, ручной съем спутника с обработанной пластиной диаметром до 200 мм и максимальной толщиной 1 мм для передачи на последующие циклы мойки и сушки. Размер кристаллов от (0,4x0,4) мм до (20x20) мм. Функциональная система управления полуавтоматом ЭМ–2085 состоит из IBM PC совместимого компьютера, включающего в себя блок управления приводами (обеспечивает так же работу с датчиками и клапанами), видеоадаптер для обработки телевизионного сигнала от видеокамеры, плату обработки сигналов от линеек обратной связи.



Рис. 11.8 . Автоматизированные установки разделения пластин: а – ЭМ–2055, б – ЭМ–2085, в – К&S 918

11.2 Монтаж кристаллов в корпусах эвтектическими припоями или клеями

Операция монтажа кристаллов в корпуса – наиболее ответственная в технологическом процессе сборки ИМС, так как обеспечивает требуемое расположение кристалла, прочное механическое соединение, надежный электрический контакт и хороший теплоотвод. Для присоединения кристаллов применяют пайку эвтектическими низкотемпературными припоями или токопроводящими и изолирующими клеями.

При эвтектической пайке приводят в соприкосновение золотую контактную площадку кристаллодержателя и кремниевый кристалл при температуре, немного превышающей температуру образования эвтектики. Кремний кристалла взаимодействуя с золотом, образует эвтектический сплав. Для ускорения образования жидкого сплава кристалл перемещают по поверхности контактной площадки. Контактнореактивная пайка пригодна для присоединения к корпусу кристаллов небольшой площади. Для больших кристаллов применяют эвтектический сплав Au – Sn – Si с температурой плавления 280 °С. Особенности данного сплава заключаются в том, что при 0,1 весовых % Si образует эвтектический сплав с золотом с отдельными включениями золота, которые позволяют растворяться в сплаве дополнительному количеству кремния. Тем самым достигается образование жидкой фазы припоя при температуре, соответствующей образованию эвтектики, что особенно важно для кристаллов, не выдерживающих высоких температур.

Существенное влияние на характеристики соединения оказывает состояние поверхности и толщина золотого покрытия корпуса. Установлено, что для образования качественного соединения требуемая толщина золотого покрытия составляет 6–9 мкм. При малых размерах кристалла, менее 0,7х0,7 мм толщину покрытия можно уменьшить. При недостаточной толщине золотого покрытия или для ускорения процесса образования соединения между кристаллом и корпусом может помещаться таблетка из эвтектического сплава или прокладка из эвтектики кремний–золото.

Для интенсификации процесса образования соединения в зону образования соединения вводят механические колебания с частотой от нескольких Гц до (40–60) кГц. Оптимальные режимы присоединения кристалла кремния размером 1х1 мм к золоченой поверхности: температура 390–420 °С, время 3–5 с., давление на кристалл $(29,43–49,05) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$.

Основным недостатком контактнореактивной пайки эвтектикой золото–кремний является значительный расход золота. Поэтому вместо золотой прокладки используют сплав 75% Au, 25% Sn, 1–2% Bi или сплавы, не содержащие драгоценных металлов, которые плавятся при 355–410 °С и эффективно смачивают кремний при температуре пайки 390–410 °С. Одним из таких сплавов является Zn–Al–Ge. Этот сплав предварительно наносят на подложку в виде пятна диаметром 4,5 мм и толщиной 10 мкм методом электрического взрыва фольги. Прочность присоединения кристаллов увеличивается в 2–4 раза за счет более высокой адгезии к керамике этого сплава по сравнению с эвтектикой золото–кремний, а остаточные

напряжения в кристаллах уменьшаются после пайки на 10–15% и уменьшаются на 20–25% после термоциклирования при этом прочность соединения кристалла и корпуса не уменьшается.

Монтаж кристаллов в корпуса с помощью клеев получил широкое распространение при сборке приборов, что объясняется рядом преимуществ клеевых соединений. Склеиванием соединяют разнородные материалы, включая тугоплавкие и хрупкие, электропроводящие и диэлектрики. Свойства и структура материалов при склеивании не изменяются, швы получают герметичные с равномерно распределенными остаточными напряжениями, при этом их величина в ряде случаев намного меньше напряжений, возникающих при пайке. Технология склеивания проста, не трудоемка и производительна, легко поддается автоматизации. К недостаткам клеевых соединений следует отнести сравнительно низкую стойкость при повышенных температурах, пониженную прочность при неравномерном отрыве, необходимость применения давления, дефицитность, а также токсичность составляющих клеевых композиций, газовыделение. Другим недостатком клеев является выделение различных летучих соединений и влаги. Так сорбция влаги клеевыми материалами приводит к увеличению влажности в корпусах приборов при повышенных температурах, поэтому их выбор должен осуществляться с учетом заданных значений влажности. Выделения летучих соединений из клеевых материалов оказывают влияние на содержание влаги в герметичных корпусах, на качество микросварных соединений, на электрофизические характеристики кристаллов.

Для монтажа кристаллов применяют эпоксидные, акриловые, анаэробные, силиконовые клеи, цианакрилаты, клеи со специальными свойствами: электроизолирующие и теплопроводные клеи. Для посадки кристаллов в корпус широко применяется клей ВК–32–200, который представляет собой смесь лака ФЛ–5111 (раствор фенолформальдегидной смолы в этиловом спирте) и пластификатора (синтетическая резиновая смесь на основе синтетического бутадиеннитрильного каучука в бутилацетате), который обеспечивает большую эластичность.

Соединения токопроводящими клеями позволяют получить надежный электрический контакт на различных подложках. В качестве основы для токопроводящих клеев используют эпоксидные, полиимидные, силиконовые, полиамидоимидные смолы. Эпоксидные смолы являются лучшими в силу того, что они имеют большую адгезию к соединяемым материалам, стойки к действию растворителей и химикатов, а процесс их отверждения может протекать с большой скоростью. В качестве наполнителя в электропроводящих композициях чаще всего используют тонкие и ультратонкие порошки серебра, никеля, меди, золота, графита. Минимальное электрическое сопротивление клея зависит от дисперсности токопроводящих наполнителей. Высокая дисперсность наполнителя обеспечивает большое число контактов между токопроводящими частицами, создавая тем самым условия для беспрепятственного протекания электрического тока. Оптимальные размеры частиц составляют для сажевых 0,05 мкм, для графитовых 2–2,0 мкм, для металлических 2–7 мкм. Свойства

двухкомпонентных электропроводящих клеев с металлическим наполнителем и эпоксидной смолой, разработанные американскими фирмами, приведены в табл.11.2. Жизнеспособность клеев 45–60 минут, отверждение за 48 часов при 20°С или за 2 часа при 150°С.

Таблица 11.2. Свойства электропроводящих клеев

Клей	Ag, %	$\rho_v = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$		$R, \text{ Ом}/\square$	
		25°С	150°С	25°С	150°С
A	77	336	195	0,0110	0,0083
B	85	169	103	0,0188	0,7100
C	76	368	184	0,0140	0,0070
D	85	427	1573	0,0200	0,0590
E	60	43	28	0,0089	0,0070

Для расчета остаточных напряжений, возникающих при охлаждении кристалла полупроводника размером L , приклеенного слоем клея толщиной X , до температуры T , предложено уравнение:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_s - \alpha_{si}) \cdot (T_g - T) \sqrt{\frac{E_a E_s L}{X}}, \quad (11.2)$$

где K – безразмерная константа, зависящая от формы и числа граней кристалла; E_a – модуль упругости при растяжении адгезива при температуре 520К, E_s – модуль упругости подложки при температуре 298К, α_s , α_{si} – коэффициенты линейного расширения подложки и кристалла, соответственно, град⁻¹.

Согласно этому уравнению, величина остаточных напряжений прямо пропорциональна корню квадратному из отношения L/X , т.е. возрастает по мере увеличения размера кристалла и снижается с увеличением толщины клеевого шва. Поэтому при монтаже кристаллов больших размеров рекомендуется наносить клей толщиной не менее 25 мкм.

Для сохранения требуемой толщины слоя клея в процессе отверждения и снижения возникающих при этом остаточных напряжений в композицию клея, содержащего 60–75 % по массе порошка серебра, добавляют 1–4 % стеклянных шариков размером 20–25 мкм.

11.3 Монтаж кристаллов в корпусах легкоплавкими припоями

При пайке кристаллов легкоплавкими припоями ПОС 61, ПСр 2,5 на обратную сторону кремниевого кристалла наносят тонкую пленку не окисленного металла, хорошо смачивающегося припоем (золота и серебра). Для меди и никеля в зону пайки необходимо вводить флюс, что нежелательно. Пленки толщиной 0,05 мкм в процессе пайки быстро растворяются в Pb–Sn припое с образованием интерметаллических соединений. С увеличением содержания свинца в припое степень растворения пленок серебра и золота снижается, при этом уменьшается доля

интерметаллидов в паяном шве, а следовательно, повышается качество и надежность соединений.

Металлические слои непланарной стороны кристалла позволяют существенно улучшить качество соединения, снизить переходное сопротивление кристалл–подложка, увеличить прочность соединения, улучшить металлургическую совместимость паяемых материалов и повысить воспроизводимость параметров соединений. На обратную поверхность кремниевого кристалла наносят в вакууме слои хрома или титана, а затем золота. Хром образует прочное низкотемпературное соединение с кремнием, а золото – с хромом. Сплавление золота с кремнием происходит за счет диффузии золота через слой хрома.

При монтаже кристаллов большой площади на непланарную поверхность кристаллов наносят двухслойное покрытие Ti – Au или V–Au, а в качестве припоя используют сплав Pb – 2,5Ag с температурой плавления 304⁰С. Минимальная длительность обработки соединения составляет 8–10 минут. Разработаны различные припойные пасты, обеспечивающие возможность автоматизации процесса в массовом производстве. Фирма DuPont производит пастообразные припои на основе золота, свинца, олова и др. металлов, состоящие из мелкодисперсных порошков металлов и органических добавок, выполняющих функцию флюса. Температуры плавления припоев лежит в интервале 200–450⁰С (табл. 11.3). Припои наносят с помощью трафаретной печати или дозатором.

Таблица 11.3. Припои для посадки кристаллов и подложек в корпусах

Состав припоев	Температура, ⁰ С	
	ликвидуса	солидуса
80% Au 20%Sn	280	280
92,5%Pb 2,5%Ag 5%In	300	300
97,5%Pb 1,5%Ag 1%Sn	309	309
95%Pb 5%Sn	314	310
88%Au 12%Ge	356	356
98%Au 2%Si	800	370
100%Au	1063	1063

Тепловую модель мощного транзистора с напаянным кристаллом на кристаллодержатель можно представить в виде трех многослойных параллелепипедов, которые имитируют кристалл с плоским источником тепла на его поверхности, слой припоя заданной толщины и участок кристаллодержателя, ограниченного размерами паяного соединения (рис. 11.11). Тепловое сопротивление напаянного кристалла, исходя из тепловой модели, можно определить из выражения:

$$R_{thjc} = \sum_{i=1}^3 R_{ti} = \frac{1}{\lambda_{Si}} \int_0^{L_{xp}} \left(\frac{dL}{B + LtgB} - \frac{dL}{A + LtgB} \right) + \quad (11.3)$$

$$+ \frac{L_{np}}{\lambda_{np} \cdot S_{np}} + \frac{1}{\lambda_{cb}} \ln \frac{B + 2L}{A - B} \cdot \frac{A}{B}$$

где λ_{Si} , λ_{np} , λ_{Cu} – теплопроводность кристалла, припоя, кристаллодержателя; L_{Si} , L_{np} , L_{Cu} – толщина кристалла, припоя, кристаллодержателя; a и b – размеры источника тепла; tgB – тангенс угла растекания теплового потока.

При толщине паяного соединения, равной 50 мкм, расчетное значение R_{thjc} составляет 0,545°C/Вт и при этом выполняется необходимое условие $R_{thjc} \text{ расч} < R_{thjc} \text{ норм} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. На зарубежных образцах изделий фирм Siemens, International Rectifier толщина припоя под кристаллом составляет 45–60 мкм.

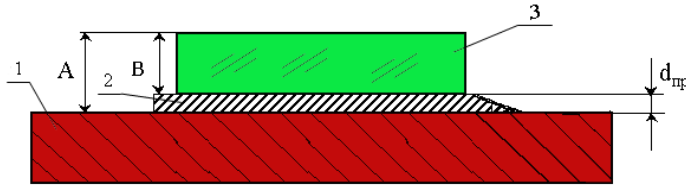


Рис. 11.11. Схема монтажа кристалла: 1 – кристаллодержатель; 2 – припой; 3 – кристалл

При выборе нижнего предела следует иметь в виду то, что существует критическая величина паяного соединения, ниже которой резко снижается надежность изделий в экстремальных условиях эксплуатации из-за возникновения остаточных механических напряжений, превышающих допустимый уровень для данной конструкции прибора. Для полупроводниковых приборов с площадью кристалла более 25 мм минимальная толщина припоя должна быть не менее 25 мкм. Максимальное напряжение, возникающее при охлаждении кристалла, равно:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0) \sqrt{\frac{E_1 E_2 L}{X}}, \quad (11.4)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение; α_1, α_2 – коэффициенты линейного термического расширения припоя и кремния; E_1, E_2 – модули упругости припоя и кремния; T, T_0 – температуры пайки и окружающей среды; L – длина кристалла, X – толщина припоя, K – безразмерная константа, зависящая от конструкции корпуса.

Остаточные напряжения в напаянном кристалле могут достигать 50–65 МПа и при воздействии термоциклических нагрузок привести к образованию трещин в кристалле. Так как при уменьшении толщины припоя остаточные напряжения возрастают, то с целью обеспечения надежности изделий целесообразно выбирать толщину припоя в пределах 25 – 50 мкм.

11.4 Автоматизированный монтаж кристаллов в корпусах вибрационной пайкой

Монтаж полупроводниковых кристаллов методом эвтектической пайки и на клей при сборке ИМС, диодных и транзисторных матриц, СВЧ приборов и многокристальных модулей ведут на установке присоединения кристаллов ЭМ–4025АМ (рис. 11.9). Установка оснащена 8–инструментальной револьверной головкой, нагреваемым рабочим столом с двумя зонами

нагрева, чашечным или пневматическим дозатором для нанесения клея, двумя газовыми паяльниками для локальной пайки в атмосфере защитного. Привод вертикального перемещения по координате Z обеспечивает мягкое касание при монтаже кристаллов. Производительность – 2000 кристаллов/час, размеры кристаллов от 0,4×0,4 до 20×20 мм, диаметр полупроводниковой пластины – 100 мм, рабочее поле перемещения координатного стола – 400×200 мм, температура нагрева рабочего стола 150–650°C.



Рис. 11.9. Установка присоединения кристаллов ЭМ–4025АМ

В крупносерийном производстве для присоединения кристаллов к корпусам полупроводниковых приборов широкой номенклатуры с наложением колебаний используют автомат ЭМ–4085–14М (рис. 11.13), в состав которого входят микропроцессорный контроллер, оптико–телевизионная система распознавания кристаллов, линейный шаговый двигатель перемещения кристаллов, двухкоординатный стол, сварочная головка, магазинный механизм автоматической подачи корпусов. Производительность автомата при эвтектической пайке – 2000 кристаллов в час, при посадке на клей – 3500 и на стеклоприпой – 600. Размеры присоединяемых кристаллов от 1×1 до 5×5 мм.

Автоматизированный процесс монтажа кристаллов на припой на автомате модели ЭМ–4085–14М обладает рядом особенностей, позволяющих осуществлять монтаж на выводные рамки из медного сплава, с никелевым покрытием. Нагреватель туннельного типа содержит 12 зон контролируемого и регулируемого нагрева до 450⁰ С, блок формирования защитно–восстановительной атмосферы смешивает поступающие газы Н₂ и N₂ в соотношении 10:90 (формир–газ) для активирующего воздействия на процесс монтажа кристаллов.

Нанесение дозы расплавленного припоя в зону монтажа кристалла осуществляется автоматически проволочным дозатором, при этом программируется не только скорость вращения центрального распределительного вала, но также скорость движения вакуумного захвата и скорость съема кристаллов.

При монтаже кристаллов используется припой марки ПСрОСу в виде проволоки диаметром 1_{-0,07мм}, намотанный на пластмассовую катушку, закрепленную в дозаторе. Подача припоя в зону монтажа осуществляется

линейным шаговым двигателем (ЛШД), на который поступают управляющие импульсы, количество которых предварительно программируется.

При расчете дозы припоя учитывается, что минимальная толщина припоя под кристаллом должна быть 25–30 мкм.



Рис. 11.13 Автомат присоединения кристаллов ЭМ–4085–14М

В процессе вибрационной пайки часть припоя выдавливается за пределы кристалла, что составляет порядка 30% от полезного объема припоя, тогда общий объем припоя при дозировке должен быть примерно равен:

$$V_{\Sigma} = V_k + V_n \quad (11.5)$$

где V_k – объем капли припоя; V_n – потери припоя.

При подаче одиночного импульса на дозатор ЛШД перемещает проволоку припоя в активную зону на расстояние K , равное, 8 мкм, поэтому доза припоя, задаваемая количеством импульсов на ЛШД, составляет:

$$D = m \cdot L \quad (11.6)$$

где L – расстояние, на которое необходимо переместить проволоку припоя, m – масса припоя в каждой дозе ($m = V \cdot \rho$).

$$L = \frac{V_{\Sigma}}{S_{np}} \quad (11.7)$$

где V_{Σ} – объем припоя, S_{np} – сечение проволоки припоя.

Оптимальный диапазон дозирования припоя в пределах 120–225 имп., расстояние $L = 1,2–1,3$ мм, а температура монтажа кристаллов должна быть на 20–30 °С выше температуры плавления припоя ($T_{п} = 410^{\circ}\text{C}$) $T_{м} = 380 + 30 = 410^{\circ}\text{C}$.

11.5 Контроль качества сборочных операций

Качество паяных соединений по внешнему виду проверяется при помощи бинокулярного микроскопа типа МБС–9 с кратностью увеличения $\times 56$. Соединения с гладкой блестящей поверхностью без трещин и следов перегрева, с полностью заполненным зазором между паяемыми деталями (при угле смачивания 5–10°) считаются высококачественными. Одновременно отмечают такие дефекты, как холодный непрогретый спай,

избыток или недостаток припоя. Визуальным контролем обнаруживаются трещины в кристалле в результате значительных остаточных напряжений в нем, возникших на операции монтажа кристаллов в корпус (рис. 11.11).

Для повышения объективности визуального контроля и удобства в работе используют стереомикроскопы Mantis фирмы Macro Vision Engineering с хорошими эргономическими показателями, увеличением в 2,5–5,0 раз, освещением рабочего поля 9500 люкс, возможностью безочулярного наблюдения (рис. 11.15) или рабочие места визуального контроля VS8.

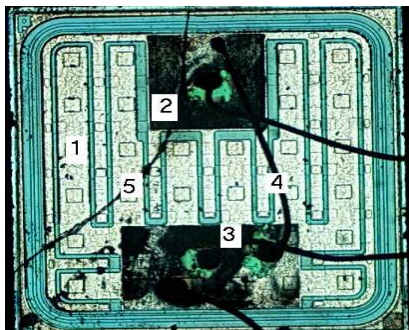


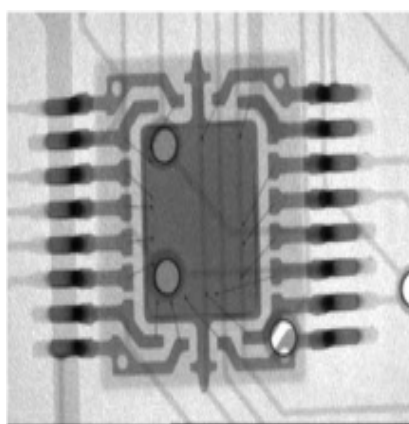
Рис. 11.14. Внешний вид кристалла: 1– кристалл, 2,3 – контактные площадки, 4 – проволочное соединение, 5 –трещина

Недостатками визуального контроля являются: ограниченные возможности зрения, человеческий фактор, невозможность выявления скрытых или потенциальных дефектов.

Применение систем рентгеновского контроля является эффективным средством диагностики скрытых технологических дефектов, повышения качества и надёжности выпускаемых изделий за счёт обеспечения контроля каждого паяного соединения и целостности интегральных микросхем. Система рентгеновского контроля нового поколения с нанофокусной трубкой и разрешением 0,5 мкм (рис. 11.16,а) позволяет надёжно диагностировать общий вид структуры прибора (рис. 11.16,б) и локализовать следующие типы дефектов: качество разварки соединительного проводника кристалл–рамка; наличие пустот между подложкой и кристаллом; наличие пустот в корпусе.



а



б

Рис. 11.12. Нанофокусная система рентгеновского контроля (а) и изображение полупроводникового прибора (б)

Для выявления скрытых дефектов в изделиях, анализа напряженно-деформированного состояния материалов применяют акустическую микроскопию с фото– или телерегистрацией результатов анализа. Акустическая микроскопия использует высокочастотные (от 5 до 200 МГц) УЗ колебания и осуществляется методами сквозной передачи и отраженного сигнала. Метод отраженного сигнала, требующий доступа только к одной стороне изделия, позволяет обнаруживать скрытые дефекты после монтажа кристаллов, разварки проволочных соединений, герметизации электронных модулей.

Для бесконтактного возбуждения и приема акустических колебаний в исследуемых объектах часто используются различные термо– и оптико–акустические эффекты. Если быстро нагреть какой–либо участок твердого тела, то другие его участки нагреваются спустя некоторое время. Локальный нагрев изделия вызовет появление термомеханических напряжений и акустических волн, так как тепловое возмущение распространяется значительно медленнее упругого. В качестве источников нагрева могут быть использованы любые модулированные по интенсивности источники электромагнитного излучения: лазерные, электронные, ионные. Выбор источника нагрева и частоты модуляции определяется свойствами объекта, необходимой мощностью, чувствительностью и разрешающей способностью аппаратуры, размерами пятна, в которое необходимо сфокусировать излучение.

Термоупругие деформации объекта приводят к возникновению акустических колебаний, регистрация которых осуществляется с помощью пьезоэлектрических датчиков, регистрация деформации области нагрева – с помощью интерферометров и координатных приемников, однако в отличие от «мираж–эффекта» вспомогательный лазерный луч отражается от поверхности в области нагрева.

Принцип действия фотоакустического микроскопа основан на явлении генерации и распространения в объекте тепловых волн, возбуждаемых зондирующим лазерным излучением или электронным пучком, модулированными по интенсивности I_0 . Поглощенное излучение I_a приводит к нагреву освещенной области и генерации периодических тепловых потоков Q_s и Q_g , распространяющихся соответственно в объекте и от его границы в окружающую газовую среду (рис. 11.13, а). Решением уравнения термодиффузии, отвечающим данной ситуации, являются температурные волны, затухающие в e раз на длине распространения тепла $\mu_{s,g}$ в твердом теле и окружающей среде (рис. 11.13 б):

$$\mu_{s,g} = \left(\frac{2k_{s,g}}{\rho_{s,g} c_{s,g} \omega} \right)^{\frac{1}{2}}, (11.8)$$

где $k_{s,g}$ – теплопроводности, $\rho_{s,g}$ – плотности, $c_{s,g}$ – теплоемкости твердого тела и газа соответственно, ω – угловая частота модуляции излучения.

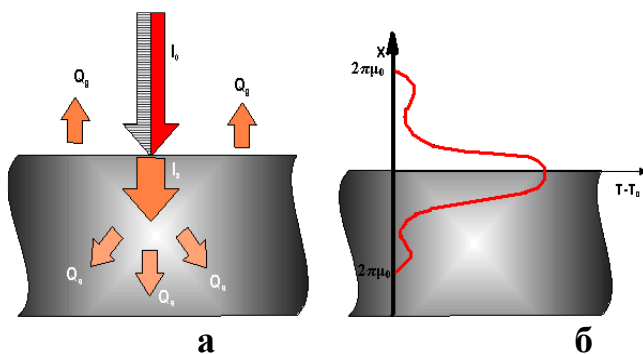


Рис. 11.13. Механизм формирования фотоакустического сигнала

Вследствие периодического нагрева и тепловой деформации локальной области объекта в нем также возбуждаются и распространяются акустические волны той же частоты, что и температурные волны. Это явление получило название фотоакустического эффекта в твердом теле. Акустические колебания объекта регистрируются датчиком. Фотоакустический сигнал, снимаемый с датчика, для каждой выделенной области объекта зависит от ее локальных физических свойств. При сканировании лазерным лучом в двух взаимно ортогональных направлениях формируется фотоакустическое изображение объекта.

Акустические методы диагностики – акустическая микроскопия (АМ), сканирующая лазерная акустическая микроскопия (СЛАМ) и фотоакустическая микроскопия (ФАМ) – наиболее перспективны при контроле контактных микросоединений в изделиях микроэлектроники и электронной техники как на этапе разработки, так и в их производстве.

В акустической микроскопии и сканирующей лазерной микроскопии первичная информация получается в результате генерации, взаимодействия и приема чисто акустических колебаний, а в лазерной фотоакустической микроскопии она возникает при оптическом взаимодействии импульсного лазерного излучения с поверхностью твердого тела. Амплитуда генерируемых акустических колебаний в ФАМ определяется, во-первых, коэффициентом оптического поглощения лазерного излучения в каждой точке поверхности сканируемого объекта и, во-вторых, мощным фоновым сигналом, который возникает вследствие удаления с поверхности объекта различных оксидов и загрязнений при первичном сканировании лазерным лучом. Однако оптические, акустические и фоновые составляющие фотоакустического сигнала создают на результирующей топограмме достаточно сложные изображения, для расшифровки которых требуется опыт и специальные методические разработки.

Лазерная фотоакустическая микроскопия имеет следующие преимущества:

- бесконтактное возбуждение акустических колебаний в твердом теле сфокусированным лучом лазера открывает широкие возможности сканирования объектов сложной конфигурации и относительно больших площадей;

- во многих случаях зависимость фотоакустического сигнала от величины оптического поглощения сканируемой поверхности позволяет получать одновременно и топограммы распределения оптического

поглощения, а при использовании лазера с перестройкой по длине волны – видеоспектральные топограммы поглощения;

– конструкции АМ и СЛАМ и методики их применения требуют иммерсионного контакта акустической части с объектом, что в случае применения АМ значительно ограничивает площадь сканирования (не более 2х2 см), а для СЛАМ требует полного погружения объекта в ванну с жидкостью. Эти требования исключаются при исследованиях с использованием ФАМ.

По диапазону возможных применений в электронике фотоакустическая микроскопия является универсальным методом, обеспечивающим решение множества задач контроля, ранее требовавших использования многих и к тому же разрушающих методов. Бесконтактность и локальность оптического возбуждения акустических колебаний позволяют производить быстрое зондирование ответственных зон и участков изделия, а также топографировать распределение характеристик. Благодаря запоминанию различных промежуточных состояний контролируемого образца, последовательно подвергаемого различным воздействиям, открываются возможности исследования динамики разрушения соединений и определения запасов их прочности.

В концерне «Планар» (Республика Беларусь) создан и эксплуатируется комплекс лазерного фотоакустического диагностирования и неразрушающего контроля качества сварных, паяных и адгезионных соединений в изделиях электроники. В основе данного метода используется фотоакустический эффект, который возникает при точечном сканирующем воздействии модулированного лазерного излучения на исследуемый объект. Основные технические характеристики комплекса:

- увеличение геометрическое – от 1:1 до 2500:1крат;
- число градаций отображаемого параметра – 16;
- максимальное поле сканирования – 100х100 мм;
- размеры образца – до 10 мм (микро–) и до 65 мм;
- разрешающая способность – от 0,5 мкм до 100 мкм;
- чувствительность к нарушению структуры – до 10 нм;
- число строк сканирования – 256.

Обработка параметров электрического сигнала обеспечивает возможность получения достоверной информации о неоднородностях структуры исследуемого объекта. Для интерпретации результатов контроля данная информация визуализируется в виде цветной 16–градационной двухмерной фотоакустической топограммы, на которой уровень максимальной сплошности (диффузия, адгезия, смачиваемость) материалов представлен чёрным цветом, а по мере увеличения несплошности (расслоения, полости, инородные включения) цветовая гамма меняется вплоть до белого цвета, проходя все цветовые оттенки, показанные на шкале (рис. 11.14):



Рис. 11.14. Цветная 16–градационная шкала

Комплекс лазерного фотоакустического диагностирования (рис. 11.15) позволяет производить диагностику и неразрушающий контроль качества:

- присоединения кристаллов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем к основанию корпусов припоями и клеевых композиций;
- микросварных соединений золотой, алюминиевой, медной и др. проволокой различными видами микросварки;
- сварных и паяных швов корпусов изделий электроники; герметизации пресс–компаундами;
- монтажа электронных компонентов (SMD, COB);
- адгезии металлизированных покрытий к подложкам.



Рис. 11.15. Лазерный фотоакустический комплекс неразрушающего контроля

Внешний вид контролируемых соединений ленточными перемычками в приборах силовой электроники показан на рис. 11.16. Для большей наглядности проводят совмещение изображений, а именно: на оптическое изображение микросварного соединения (рис. 11.17,а) поверх с соблюдением масштаба накладывают соответствующую ему лазерную фотоакустическую топограмму (рис. 11.17,б).

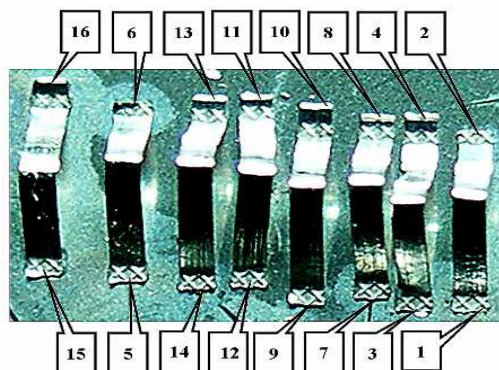


Рис. 11.16. Внешний вид контролируемых соединений ленточными перемычками

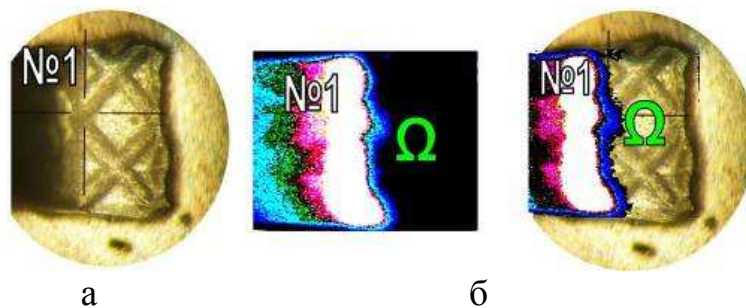


Рис. 11.17. Внешний вид (а) качественного микросварного соединения №1 и соответствующая ему лазерная фотоакустическая топограмма (б); (в) – совмещение изображений а и б

Эта операция позволяет количественно оценить площадь омического контакта, образовавшегося при микросварке.

Глава 12. МИКРОМОНТАЖ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

12.1 Проволочный микромонтаж изделий интегральной электроники

Одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса, применяемых в настоящее время, является соединение с помощью проволочных выводов. Проволочный монтаж остается одним из основных методов сборки ИМС, что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическими размерами ИМС. Прогресс в развитии методов формирования межсоединений в изделиях интегральной электроники позволил существенно снизить трудоемкость этих операций и добиться заметных успехов на пути к их полной автоматизации. Однако трудоемкость операций формирования межсоединений остается определяющей в процессе производства изделий микроэлектроники и для разных типов приборов составляет от 30 до 60 % всей трудоемкости сборки. На долю разрушения межсоединений приходится значительный процент отказов микросхем в процессе эксплуатации.

В настоящее время применяются следующие технологические процессы формирования межсоединений: соединение проволокой; ленточными носителями и сборка методом перевернутого кристалла.

Метод соединения проволокой для монтажа полупроводниковых микросхем, впервые примененный в производстве транзисторов фирмой Bell Laboratories (США) в 1956 г., часто подвергался сомнению в отношении его экономичности при монтаже микросхем в корпуса. На протяжении длительного времени различные технологии группового присоединения, например, методом перевернутого кристалла, с помощью балочных выводов, группового монтажа с помощью «паучковых» выводов, являлись основными его конкурентами. Однако большинство этих методов не нашли широкого применения в основном из-за недостаточной универсальности и большого количества дополнительных требований, предъявляемых к кристаллам и выводам приборов. Основное достоинство групповых методов – обеспечение

высокой производительности—стало практически незаметным после появления высокоскоростных полностью автоматических установок присоединения проволочных выводов.

Процесс сварки состоит из трех стадий: активации контактных поверхностей, образования физического контакта, и объемного взаимодействия. При сварке одноименных металлов первые две стадии сливаются в одну: одновременно с образованием физического контакта вокруг дефектов структуры: дислокаций, вакансий образуются активные центры и наступает объемное взаимодействие. Развитие первых двух стадий образования соединения зависит от скорости пластической деформации. Независимо от характера и интенсивности деформационного и термического воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта природа образования соединения одинакова. Различна кинетика протекания отдельных стадий процесса, которая определяется условиями нагрева, характером и интенсивностью деформации проводника, степенью локализации деформации и особенностями развития релаксационных процессов в приконтактной зоне. Длительность процесса образования прочных связей по всей площади взаимодействия определяется скоростью пластической деформации и, следовательно, третий параметр процесса микросварки – время, влияющий на его производительность, является зависимым. Поскольку сварка в твердой фазе – процесс трехстадийный, перспективными можно считать способы сварки с циклическим повышением усилия нагружения и температуры для термо–компрессионной сварки (ТКС), усилия нагружения и амплитуды колебаний для ультразвуковой сварки (УЗС) и совокупного воздействия этих факторов при термо–звуковой сварки (ТЗС). Это позволяет использовать наиболее эффективные стадии активной деформации и неустановившейся ползучести.

12.2 Процессы термокомпрессионной микросварки

Термокомпрессионная сварка (ТКС) – это метод соединения металлов в твердом состоянии при контролируемой диффузии, относительно высоких удельных давлениях и нагреве до температуры ниже температуры образования жидкой фазы соединяемых материалов. Поскольку в обычных условиях реальные поверхности свариваемых материалов покрыты оксидными пленками, то образование прочного сварного соединения может произойти при условии деформации в зоне контактирования. Деформация может обеспечить механический контакт соединяемых материалов и разрушение оксидных и адсорбированных поверхностных пленок. При соприкосновении чистых поверхностей свариваемых элементов может произойти «схватывание». Области «схватывания» возникают на участках, где возможны взаимодействия между свободными элементами двух разнородных атомов и образование межатомной связи. Необходимая энергия для преодоления энергетического барьера поверхностными атомами, т. е. повышения их энергии до определенного уровня, при котором может произойти взаимодействие, вводится в результате пластической деформации и нагрева.

При деформации присоединяемого проводника в местах максимальных касательных напряжений возникают дислокации на контактных поверхностях тонкопленочных покрытий. Повышение плотности дислокаций приводит к развитию участков «схватывания» и площади взаимодействия, однако увеличение температуры, давления и длительности процесса может вызвать образование дислокации и в полупроводнике. Это явление особенно нежелательно при сборке ИМС и полупроводниковых приборов с небольшой глубиной залегания p - n -перехода.

В качестве материалов выводов могут использоваться только высокопластичные металлы (алюминий, золото, серебро, медь), присоединение которых может осуществляться при температуре до $320\text{ }^{\circ}\text{C}$, что несколько ниже температуры образования дислокации в полупроводниках (для кремния $T_{\text{дис}} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Наиболее эффективным при термокомпрессии является одновременный нагрев прибора и инструмента, так как он позволяет обеспечить точное поддержание температуры в зоне сварки. Установлено, что при температурах более $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушение оксидной пленки при сварке происходит с последующим образованием интерметаллических фаз, богатых золотом. Последние имеют плохую адгезию с поверхностью оксида кремния, вызывают хрупкость соединения и снижают надежность контактов. Диффузионные процессы при образовании интерметаллических соединений способствуют появлению трещин и пор в контакте, образованию тройной эвтектики Si-Al-Au с невысокой температурой плавления. Полностью избежать этого можно, применив однородные материалы, например Al-Al .

При термокомпрессии "внахлестку" инструмент с усилием около 25 г прижимает золотую проволоку к нагретой до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ контактной площадке кристалла на подложке. После приварки проволоки к внешнему выводу корпуса происходит ее отрезание с одновременным формированием "сапожка" для следующего присоединения. Метод применяют в технологии ИМС, где требуется присоединение проволоки к нескольким контактным площадкам без ее обрыва. Общим недостатком метода является то, что он не рекомендуется для приварки плоских проводников, так как при их деформации недостаточно течение металла в направлении плоскости контакта, что затрудняет образование соединений.

Сварка давлением с импульсным косвенным нагревом находит применение для сборки микросхем. Столик установки, где крепится микросхема, подогревается до $50 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сварочный электрод разогревается до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Используется два электрода: один служит для присоединения проводника к контактной площадке микросхемы, второй – к внешним выводам корпуса. Длительность теплового импульса $0,3-3,0\text{ с}$. Преимущество способа состоит в том, что он исключает нагрев изделия до температуры, близкой к температуре плавления эвтектики золото-кремний, применяемой для припайки кристалла интегральной схемы к корпусу. Характеристика способов автоматизированной сварки микропроволокой приведена в табл. 12.1.

Таблица 12.1. Способы сварки микропроволокой

Способ сварки	Материал микропроволоки	Параметры сварки				Изделия
		Т, °С	Давление, г	Амплитуда УЗК, мкм	Длительность сварки, с	
ТКС	Золото	300–400	40–200	–	0,07–1,0	ИМС в пластмассовых и в многослойных керамических корпусах
УЗС	Алюминий золото	–	20–60	0,2–0,9	0,04–0,1	ГИС, ИМС в керамических и металлостеклянных корпусах
ТЗС	Золото	200–225	15–80	0,05–0,6	0,05–0,5	БИС, СИС, ГИС, приборы на арсениде галлия

12.3 Ультразвуковая и термозвуковая микросварка

Ультразвуковая сварка (УЗС) – это метод соединения металлов в твердом состоянии, отличающийся от других видов сварки способом введения энергии в зону сварки. Сближение свариваемых изделий и образование соединения происходит при пластической деформации материалов от совместного воздействия усилия напряжения и тепловой энергии за счет процессов трения и воздействия на материалы УЗ полем частотой, как правило, 66 ± 10 % кГц для микросварки. Этот метод признан наиболее перспективным при выполнении технологических операций сборки различных типов полупроводниковых приборов алюминиевой проволокой. К основным достоинствам метода УЗС следует отнести: возможность соединения широкой номенклатуры материалов; получение соединений материалов с окисленными поверхностями.

При УЗ сварке в то время как проволока находится под нагрузкой, механическое перемещение, или вибрация инструмента вызывает скачок уплотнения на алюминиевой контактной площадке (рис. 12.1).

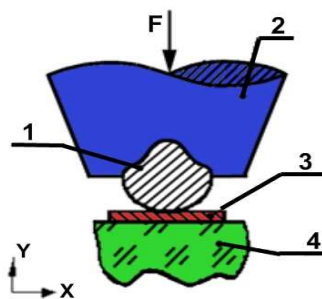


Рис. 12.1. Схема УЗ сварки: 1–проволока; 2–сварочный инструмент; 3–контактная площадка; 4–кристалл

Распространение волнового фронта по проволоке обуславливает образование волнистой структуры посредством воздействия напряжения сдвига в алюминиевой контактной площадке перпендикулярно направлению вибраций. До начала (или во время) движения волнового фронта ультразвуковая энергия поглощается проволокой, при этом последняя размягчается и под действием нагрузки течет, разрывая поверхностный оксид и оставляя незащищенной свежую поверхность проволоки и контактной площадки. Эта свежая незащищенная поверхность металла быстро сваривается. Соединение образуется в тороидальной области вокруг центра контактной площадки и проволоки внутри области волнистой структуры.

Поскольку проволока размягчается и деформируется, вертикальное напряжение уменьшается во времени. В то же время вибрирующее воздействие инструмента для ультразвуковой сварки вызывает появление горизонтального напряжения. При большой величине вертикального напряжения соединения произойти не может из-за больших касательных напряжений. При среднем вертикальном напряжении происходит соединение, и свариваемая область растет со временем, так как вертикальное напряжение уменьшается.

Взаимодействие золота с алюминием во время соединения золотой проволокой широко исследовано, особенно для процесса термокомпрессионной сварки, где происходит значительный рост образования интерметаллических соединений. При сварке обычно обнаруживается пурпурная интерметаллическая фаза $AuAl_2$, называемая «пурпурной чумой». Ранее считали, что эта фаза является неустойчивой и может привести к хрупкому разрушению свариваемой проволоки. Хотя до сих пор существуют противоречивые мнения о скорости роста возможных интерметаллических соединений и роли ускорителей этого роста (кроме температуры), полагают, что хрупкость соединения вызвана объединением вакансий в полостях, известных как полости Киркендала, вдоль линии сварки. Генерирование вакансий происходит за счет значительного повышения температуры в зоне контакта, а также из-за разной скорости диффузии алюминия в золото и наоборот.

Образование сварного соединения определяется, с одной стороны, колебательной скоростью, давлением сварочного наконечника и временем сварки. С другой стороны, механизм сварки определяется свойствами свариваемых металлов и состоянием поверхности. Ввод энергии ультразвука

в сопряженные на малом участке металлы вызывает повышение температуры в зоне их контакта, растрескивание твердых и выгорание жировых пленок, пластическое деформирование материала, диффузию, рекристаллизацию, плавление и другие явления.

Наиболее существенным условием свариваемости металлов в твердом состоянии является разница в диаметрах атомов свариваемых металлов, которая не должна превышать 15–18 %. При различии диаметров от 19 до 44 % схватывания металлов не происходит. Предельная величина относительной разности диаметров совпадает с общим условием существования твердых растворов металлов, что дает возможность установить свариваемость из фазовой диаграммы для данной пары металлов. Металлы свариваются в случае полной, а в отдельных случаях и ограниченной растворимости в твердом состоянии. Сварка возможна и при отсутствии растворимости, если удастся подобрать третий растворяющийся металл, который наносится на один из свариваемых металлов. В общем случае ровные и чистые (тщательно обработанные) контактные поверхности свариваются лучше. И, наоборот, грубая механическая обработка свариваемых поверхностей, наличие различных поверхностных пленок, плакирование, как правило, ухудшают свариваемость металлов, а в ряде случаев и исключают её. Благоприятными условиями для схватывания является совпадение зерен с близкой кристаллографической ориентацией.

Процесс УЗС в технологическом плане обусловлен параметрами режима сварки: мощностью колебательной системы, контактным давлением, амплитудой колебаний сварочного наконечника и временем сварки. Сварка сопровождается увеличением температуры в зоне сварки до 190 °С при усилии сжатия до 2–2,5 Н. Это подтверждает предположение о том, что источником тепла при УЗС является трение между свариваемыми металлами при их относительном перемещении.

Электрическая мощность, передаваемая от генератора к преобразователю, определяет амплитуду механических колебаний инструмента и величину сдвиговых напряжений в зоне сварки, под действием которых преодолевается первичное схватывание, вызванная сжатием соединяемых элементов. При малых значениях амплитуды колебаний сварное соединение не образуется, поскольку сдвиговых напряжений не хватает для разрушения оксидных пленок в зоне контакта, а при больших – в свариваемых элементах возникают усталостные процессы, приводящие к разрушению соединения. Оптимальные значения амплитуды колебаний инструмента составляют 1,5 – 2 мкм, однако контроль таких колебаний технически затруднен.

При малых перемещениях инструмента и времени сварки передача УЗ колебаний в зону монтажа недостаточно эффективна, при больших значениях амплитуды колебаний снижается сила сцепления двух металлов вследствие эффекта скольжения. При большом времени сварки происходит разрыв проволочного проводника по “шейке” из-за его чрезмерной деформации. При исследовании зон схватывания под микроскопом установлено, что глубина объемного взаимодействия свариваемых металлов возрастает с увеличением времени микросварки до 0,8 с. Однако при более длительном

времени сварки наблюдается снижение прочности соединения вследствие появления трещин в зоне микросварки.

Важной задачей в совершенствовании технологии УЗС является изыскание параметров, позволяющих контролировать качество соединений в процессе сварки. Решение этого вопроса дало бы возможность одновременно с автоматизацией значительно повысить воспроизводимость результатов сварки, а также оценить прочность соединений без их разрушения.

Выбор частоты ультразвуковых колебаний для микросварки основан на необходимости ограничения амплитуды колебаний, что уменьшает знакопеременные напряжения в соединяемых деталях и опасность разрушения соединений.

Основное влияние на механическую прочность сварных соединений оказывают мощность колебательной системы, амплитуда смещений инструмента, усилие сжатия и время сварки. Функцию контроля качества соединения можно осуществлять, контролируя амплитуду колебаний рабочего инструмента в процессе сварки, но такой метод контроля затруднен сложностью фиксации амплитуды при сварке, а также зависимостью её от других параметров процесса. Влияние амплитуды на сварку необходимо рассматривать только с учетом мощности системы, а не её конструктивного исполнения, когда за счет изменения коэффициента усиления концентратора можно изменить амплитуду смещений инструмента. Известно также, что между мощностью и амплитудой колебаний инструмента имеет место линейная зависимость, поэтому некоторые исследователи отдают предпочтение именно этому параметру. Амплитуда колебаний сварочного инструмента должна быть такой, при которой могли бы возникнуть относительные перемещения в контакте между деталями. Помимо мощности, она зависит в процессе сварки от усилия сжатия свариваемых изделий и времени сварки, которые в свою очередь зависят от неё.

Особенностью амплитуды колебаний инструмента является её зависимость от внешней нагрузки, которая изменяется как в течение цикла сварки, так и при переходе от сварки к сварке. Изменение внешней нагрузки выражается в изменении амплитуды колебаний инструмента в процессе сварки. Из этого следует, что изменение амплитуды колебаний в процессе сварки связано с прочностью сварного соединения.

Одним из основных параметров, влияющих на поглощение акустической мощности в зоне соединения при УЗ микросварке, является входной механический импеданс соединения. Его изменение в процессе микросварки приводит к рассогласованию с выходным импедансом ультразвуковой системы, что значительно снижает качество контактов интегральных микросхем, поэтому важно определить зависимости входного механического импеданса соединений от режимов УЗС: длительности процесса и мощности подводимых колебаний, а также от режимов термообработки – температуры и времени отжига полученных контактов. Прямо измерить механический импеданс микросварных соединений трудно, поэтому представляют практический интерес методы косвенного его определения по электрическим параметрам соединений: контактному сопротивлению и индуктивности области стягивания линий тока в контакте.

Время УЗ микросварки определяется скоростью процессов разрушения оксидных пленок на соединяемых элементах и объемного взаимодействия материалов в твердой фазе. Оптимальное время схватывания материалов составляет 0,2–0,3 с, увеличение времени сварки лишь в течение 1,5 с приводит к изменению глубины зоны объемного взаимодействия за счет диффузионных процессов, однако столь длительное время воздействия ультразвуковых колебаний может вызвать усталостное разрушение соединений. Предварительный подогрев свариваемых элементов до 190 °С уменьшает продолжительность воздействия ультразвука до 0,25 с и способствует образованию более прочных соединений.

Статическая нагрузка на сварочный капилляр непосредственно влияет на усилие сжатия соединяемых элементов и определяет деформацию проволочного вывода, а в конечном итоге и стабильность сварного соединения. Для алюминиевой проволоки диаметром 35 мкм нагрузку на инструмент выбирают ориентировочно в диапазоне 2–4 Н. Важным технологическим фактором также является форма рабочей части инструмента. В связи с многообразием типоразмеров инструмента, предназначенного для выполнения различных технологических операций (пайки кристаллов, проволочного монтажа, групповой сварки), поиск места сопряжения инструмента с волноводом, чтобы не вызывать расстройки системы по частоте и ненужный вид колебаний, представляет определенную сложность.

Качество соединений определяется в основном физико–химическими свойствами поверхностей соединяемых материалов. Изменение микрорельефа поверхностей и структуры материалов, наличие окисных и адсорбированных пленок приводит к дестабилизации процессов микросварки (что требует корректировки технологических режимов), ухудшению качества и надежности сварных соединений, снижению производительности процесса.

Термозвуковая сварка (ТЗС) – этот способ сварки находит все возрастающее применение при сборке изделий микроэлектроники. В ТЗС соединения формируются в результате совместного действия температуры, энергии ультразвуковых колебаний сварочного инструмента и усилия нагружения инструмента. Данный способ сварки как бы объединяет отдельные качества ТЗС и УЗС и дает хорошие соединения при существенном смягчении режимов сварки, прежде всего температуры. ТЗС используется в первую очередь при автоматизированной сборке приборов, критичных к температурам выше 200–250 °С. К таким относятся быстродействующие приборы на арсениде галлия, заказные БИС и СБИС. Применим этот способ сварки и для сборки толстопленочных ГИС. Качественные, устойчивые к повышенным температурам (150 °С в течение до 3000 ч) и термоциклированию (100 циклов при температурах – 55...+150 °С) соединения золотой проволоки с медными печатными проводниками получают ТЗС при температуре подложки 105–200 °С. Практически ТЗС начинают широко применять и для сборки ИМС массовых серий с целью смягчения режимов и снижения критичности сварочного процесса к колебаниям качества соединяемых материалов.

Термозвуковая сварка "шариком" используется для соединения золотой

проволоки с алюминиевыми и золотыми контактными площадками (рис. 12.2). Нагрев подложки производится до 300 °С, прикладываемое усилие до 50 г. Соединения, полученные "шариком", более прочные, чем полученные методом "клина"

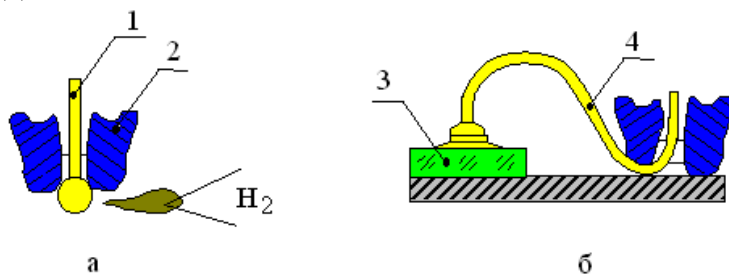


Рис. 12.2. Термозвуковая сварка золотой проволоки методом шарика – клина: а – образование шарика с помощью водородной микрогорелки – золотая проволока (1) в капилляре инструмента (2); б – соединение с кристаллом (3), проволока согнута в петлю (4) и присоединена клином.

12.4 Автоматическое оборудование и инструмент

Разработаны автоматы присоединения выводов для ИМС массовых серий ЭМ – 4060П и ЭМ – 4020П, в которых используется единая стойка управления, состоящая из однотипных блоков управления, распознавания, питания ультразвуковых генераторов (УЗГ). В автомате применены также однотипные загрузочно–разгрузочные устройства (ЗРУ) и оптико–телевизионные системы.

Система технического зрения (СТЗ) позволяет распознавать и определять положение кристаллов ИМС и траверс. Положение корпуса определяется по одной траверсе при смещении только по линейным координатам, и по двум траверсам – при смещении по линейным координатам и углу. СТЗ может определять положение каждой траверсы индивидуально.

Усовершенствованная УЗ система автоматов имеет непрерывную амплитудно частотную характеристику (АПЧ) в полосе не менее 5 кГц с погрешностью отслеживания частоты резонанса УЗ преобразователя (УЗП) не более 20 Гц и времени захвата не более 20 мс.

Встроенная модернизированная система контроля функционирования и компенсации ошибок позволяет вдвое (по сравнению с ЭМ– 4020Б) уменьшить максимальную длительность компенсации ошибок (время модуляции), увеличивает устойчивость резонанса и обеспечивает заблаговременную сигнализацию об отказе системы. Имеется датчик, сигнализирующий о создании требуемого акустического контакта между инструментом и соединяемыми деталями и позволяющий не только определить позицию сварки по координате Z, но и увеличить воспроизводимость качества соединений.

Подача на инструмент ультразвука (дежурного сигнала) в промежутках между сварками снижает трение между инструментом и проволокой при формировании петли, облегчает отделение инструмента от сформированного соединения. Встроенное устройство контроля сварочных систем, программно

и аппаратно поддержанное управляющей системой установки, позволяет осуществить функциональное диагностирование системы и непрерывное наблюдение за ходом процесса формирования каждого сварного соединения и на этой основе осуществить 100%-й контроль качества при обработке ИМС любого типа и в любом корпусе.

Автоматическое уменьшение амплитуды колебаний инструмента по мере образования соединения в сочетании с малой длительностью сварки позволяет устранить усталостное разрушение материалов в зоне сварки, что увеличивает процент выход годных изделий и стойкость инструмента.

Новая система согласования генератора и параметров ультразвуковой пайки в совокупности с широкой полосой амплитудо-частотной характеристики обеспечивает стабильность эксплуатационных свойств УЗ – системы. Использование сварочных автоматов, работающих при повышенных скоростях перемещения ИМС, а также в отсутствие оператора повышает требования к гарантированному совмещению проволоки с контактной площадкой, требуемой деформации соединения и обеспечению заданной формы петли проволочной перемычки.

Автомат ЭМ–4020б предназначен для присоединения по заданной программе проволочных выводов внахлестку к контактным площадкам кристалла и корпуса полупроводниковых приборов интегральных микросхем с числом выводов до 128 методом УЗС без подогрева изделий внахлестку. Автомат оснащен системой распознавания для автоматического считывания информации о неточностях расположения кристалла. Ввод координат сварных точек на кристалле и корпусе осуществляется в режиме «Самообучение». Имеется система самодиагностики основных функциональных устройств. Структурная схема установки присоединения проволочных выводов приведена на рис. 12.3.

Основными режимами установки являются: автоматический, полуавтоматический, ремонт, а также ряд вспомогательных, позволяющих запрограммировать установку на разварку определенного типа прибора.

В автоматическом режиме загрузочно–разгрузочное устройство (ЗРУ) осуществляет подачу в рабочую зону прибора предназначенного к разварке проволочными выводами. Система технического зрения распознает и определяет положение кристалла и корпуса. По окончании разварки ЗРУ подает очередной прибор в рабочую зону.



Рис. 12.3. Структурная схема установки УЗС проволочных выводов

В полуавтоматическом режиме введение коррекции на положение кристалла или прибора относительно инструмента выполняется оператором, который совмещает визир сначала с первой, затем со второй, наиболее удаленной от первой контактной площадкой кристалла ИМС. Оператор дает команду на выполнение разварки прибора после окончания совмещения, а также подачу очередного прибора на рабочую позицию после окончания разварки проволочных выводов.

При ремонте прибора оператор разваривает выборочную проволочную перемычку. Если ремонт одного или нескольких выводов осуществляется на том же приборе, на котором производится автоматическая разварка, и коррекция на его положение введена, то от оператора требуется определить только номер ремонтируемого вывода и удалить, если это необходимо, оборванный вывод. В противном случае он с помощью визиров вводит поправки на неточное положение кристалла и корпуса прибора.

Количество вспомогательных режимов может быть достаточно большим, и связаны они с изменением циклограммы работы, введением данных в систему технического зрения, проверкой работоспособности установки и т.д.

В оборудовании УЗС используются системы управления: централизованные, иерархические, распределенные (с различными управляющими устройствами от комбинированных микросхем до микропроцессоров). Их отличительной особенностью является большое количество преобразований координат (пространственная, в которой расположен объект, механическая система координат привода, пространственная система после оптического преобразования изображения объекта, электрическая система ТВ датчиков, электрическая система после дискретизации и квантования видеосигнала).

Автомат ЭМ–4260 (рис. 12.4, а) предназначен для автоматического присоединения проволочных выводов из золота к контактным площадкам и выводов корпусов ИМС методом термозвуковой сварки. Двухкоординатный X – У линейный шаговый двигатель с датчиками обратной связи обеспечивает высокую точность и скорость перемещения сварочной головки, Перемещение сварочного инструмента по координате Z осуществляется с помощью " звуковой катушки " с обратной связью. Автомат оснащен системой контроля качества сварки. Основные параметры технологического процесса (скорость перемещения, диаметр шарика, усилие сварки и др.) программируются. Встроенная программно управляемая библиотека петель и высокая точность исполнительных механизмов обеспечивают разварку различных типов изделий с длиной перемычки до 7 мм, в том числе многовыводных СБИС в тонких корпусах. Подача обрабатываемых рамок – магазинная с программируемой переналадкой, при этом конфигурация рамок не регламентируется.

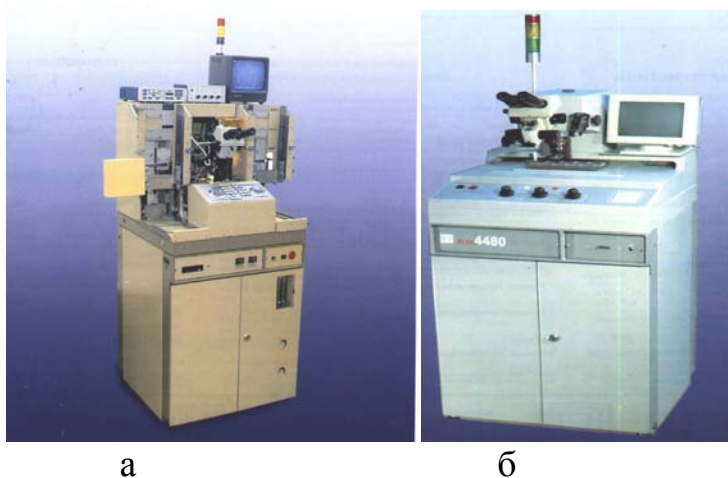


Рис.12.4. Автоматы присоединения проволочных выводов: ЭМ–4260 (а) и ЭМ–4480 (б)

Автомат ЭМ – 4480 (рис. 12.4, б) предназначен для автоматического присоединения алюминиевых проволочных выводов большой номенклатуры изделий, требующих большого поля, повышенной точности монтажа выводов, в том числе многокристалльных и многоуровневых ГИС, методом ультразвуковой сварки внахлестку. Автомат обеспечивает требуемую динамику формообразования выводов, снижение влияния механических вибраций инструмента и "мягкое" касание за счет применения легкой, размещенной отдельно от приводов X, Y, Z – вращающейся сварочной головки, а также автоматическое определение положения контактных площадок кристаллов, траверс и многоуровневых изделий, индивидуальное программирование режимов присоединения и формы петель для каждого вывода. Автомат универсален за счет использования многоместных матричных кассет и большого рабочего поля и имеет самодиагностику работы основных функциональных устройств.

Установка 1484 фирмы Kulicke and Soffa Industries (США) для монтажа проволочных выводов, созданная в 1990–ые годы, обладает высокими уровнями скорости, точностью, надежностью и производительностью. В ней используется микропроцессорное управление, которое в сочетании с

вращающейся соединяющей головкой и телевизионной системой контроля с программируемым фокусом делают модель исключительно удобной в эксплуатации. Установка 1484 обеспечивает термозвуковую сварку при сравнительно низких температурах (200–240°C). Такие же возможности имеются и у установки ЭМ–4360К при температуре нагрева 100–400°C (рис.12.5).



а

б

Рис. 12.5. Автоматы ТЗС модели 1484 (а) и ЭМ–4360К (б)

Комплексным и основным показателем, характеризующим установки в наибольшей степени, является производительность.

Часовая производительность для приборов, имеющих перемычки не более 1,5 мм, ориентировочно может быть рассчитана по формуле

$$n_r = \frac{3600}{t_{\text{н}} + t_n + N(t_o + t_1 + t_2)}, \quad (12.1)$$

где t_o – время формирования одной перемычки; t_c – время автоматического определения положения кристалла ИМС; $t_{\text{п}}$ – время подачи прибора в рабочую зону; N – количество выводов; t_1 – время сварки на кристалле, с; t_2 – время сварки на траверсе, с.

Общие требования, предъявляемые к инструментам: обеспечение концентрации энергии в зоне сварки; возможность визуального контроля процесса сборки прибора; высокая механическая прочность и износостойкость; удобство в эксплуатации. В зависимости от назначения и конструкции инструмента общие требования подразделяются на более конкретные частные, например, при термокомпрессионной сварке холодным инструментом для обеспечения концентрации энергии в зоне сварки он должен иметь минимальную теплопроводность, при сварке нагретым инструментом, наоборот, максимальную и т.д. Требования к инструменту для УЗС с точки зрения особенностей этого вида сварки можно сформулировать следующим образом:

- форма и размеры инструмента должны обеспечивать эффективную передачу энергии УЗ колебаний;

- материал инструмента должен обеспечивать минимальное затухание УЗ колебаний и не должен вступать во взаимодействие с материалами проволоки вывода.

Для сохранения спектра собственных частот и вида колебаний (в частности, изгибных) необходимо соблюдать условие

$$\frac{\lambda}{d} > (8-10), \quad (12.2)$$

где λ – длина волны изгибных колебаний; d – макс. диаметр сечения инструмента.

Для расчета длины инструмента УЗС используется уравнение Олсона:

$$f = \frac{1,133\pi \cdot k}{L^2} \sqrt{\frac{E}{P}} = \frac{3,56 \cdot k}{L^2} \sqrt{\frac{E}{P}}, \quad (12.3)$$

где f – частота; L – длина инструмента; E – модуль Юнга; k – радиус инерции поперечного сечения; P – плотность.

Часто длина инструмента, определенная из уравнения 12.3, оказывается слишком малой. Инструмент должен иметь отверстие для подачи проволоки и достаточную длину для закрепления на концентраторе. В этом случае рекомендуется рассчитывать инструмент на частоту, для которой основная частота УЗ генератора является второй гармоникой:

$$f_p = \frac{f_0}{5,404}, \quad (12.4)$$

где f_0 – основная частота, f_p – расчетная частота.

Практика показывает, что при этих частотах наиболее стабилен в работе инструмент длиной 21 мм. В этом случае длину инструмента определяют с использованием формулы формулы:

$$f = \frac{(7,85)^2 k}{2\pi^2} \sqrt{\frac{E}{P}}. \quad (12.5)$$

Множитель $7,85^2$ соответствует первой нечетной гармонике.

Форма заточенной части инструмента также имеет существенное значение для обеспечения стабильности сварки. При использовании инструмента с длиной клиновидной части 5–7,5 мм плоскости пучностей и узлов изгибной волны смещаются по длине инструмента, приводя к нестабильности. Длину клиновидной части инструмента рекомендуют выбирать не более 2,8 мм.

Для термозвуковой сварки рекомендуется изготавливать в инструменте рубиновые капилляры, имеющие более высокую износостойкость рабочих поверхностей, коррозионную стойкость и чистоту поверхности (рис. 12.6, а). Обозначение капилляра: КТ51 – 25 – 150 – 2 – 30: К – капилляр, Т – термокомпрессионная сварка, 25 – диаметр проволоки, 150 – диаметр на выходе капилляра D , 30 – радиус рабочей части инструмента R .

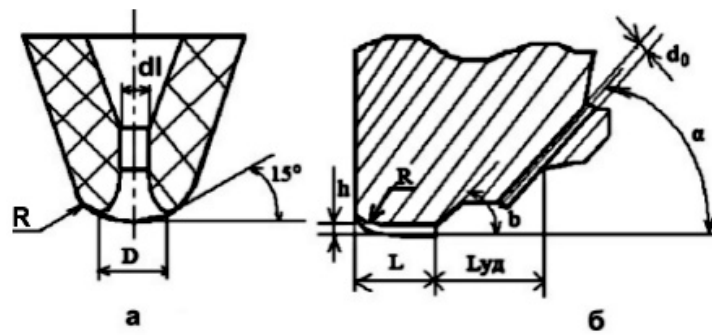


Рис. 12.6. Рабочая часть инструмента для ТКС (а) и УЗС (б)

Функциональные особенности инструмента для УЗС определяются следующими факторами (рис. 12.6, б):

– диаметр направляющего отверстия – устранением возможности засорения его материалом привариваемой проволоки:

$$d_o \geq 1.5 d_{\text{пр}}, \quad (12.6)$$

d_o – диаметр капилляра, $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки

– угол наклона направляющего отверстия – условиями перемещения инструмента на вторую сварку, зависит от высоты и длины проволочной перемычки:

$$a = \arctg(h/g), \quad (12.7)$$

где h – высота проволочной петли; g – длина шага перемещения стола,

– длина рабочей части инструмента h – длиной деформируемой при сварке проволоки и выбирается из соотношения

$$L = (2)d_{\text{пр}} \quad (12.8)$$

Оптимальная величина $h = 0,1$ мм для проволоки 27 мкм и 0,2 для 60 мкм;

– глубина продольного паза – коэффициентом деформации $k_d = 0.5-0.6$:

$$R = 0,01 - 0,05 \text{ мм}; \quad (12.9)$$

– для обеспечения симметрии петли проволочной перемычки удаление выхода отверстия от задней кромки рабочей площади должна удовлетворять соотношению

$$L_{\text{уд}} = 8d_{\text{пр}} \quad (12.10)$$

– угол наклона задней кромки рабочей площадки b – обеспечением подрезки проволоки после второй сварки без остаточных напряжений в ней (60 градусов).

Для присоединения внахлест проволоки из алюминиевых сплавов УЗ микросваркой используют капилляры из твердых сплавов типа ВК 20 с упроченной рабочей поверхностью, имеющие обозначение КУТ32 – 27 – 95 – 15 (капилляр для УЗ и термозвуковой сварки: 27 – диаметр проволоки, 95 – размер h , 15 – размер R).

12.5 Монтаж жесткими объемными выводами

Стоимость присоединения проволочных выводов составляет большую часть общей стоимости и, поэтому потребность в автоматизации этого процесса очень велика и продолжает расти с увеличением степени

интеграции ИМС. Стоимость присоединения кристалла ниже стоимости присоединения проволочных выводов, но по мере усложнения схемы она растет. Кроме того, сам кристалл БИС очень дорог, поэтому для повышения производительности сборочных операций и процента выхода годных изделий большое внимание уделяется обеспечению полной автоматизации присоединения кристаллов и выводов.

Одним из необходимых условий для реализации беспроводного метода является создание на кристаллах ИМС специальных контактных выступов в виде балок или шариков. Технологический процесс производства ИМС с объемными выводами состоит из следующих основных стадий:

- на пластине кремния изготавливаются с использованием стандартных планарных методов требуемые полупроводниковые приборы, для чего используются специальные фотошаблоны, в которых изменена геометрия контактных окон;

- для защиты планарной структуры от механических и химических воздействий в процессе изготовления сборки и эксплуатации на поверхность структуры наносят дополнительные защитные слои диэлектриков, например, SiO_2 , Si_3N_4 ;

- изготавливаются металлические контакты к структуре и объемные выводы, выступающие над кристаллом (шарики) или за пределы кристалла (балки). Объемные выводы изготавливают сразу ко всем контактам всех структур на пластине, например, электроосаждением металлов, оплавлением либо раскладкой готовых шариков через трафарет.

Отказ от индивидуальной термокомпрессии и замена ее групповой операцией осаждения выводов на всей пластине обеспечивает основное экономическое преимущество объемных выводов по сравнению с проволочными выводами, уменьшение затрат ручного труда.

Готовая пластина разрезается на отдельные приборы, которые затем поступают на сборку в ГИС или БИС. Качество и механическая прочность объемных контактов выше, чем при индивидуальной термокомпрессии, поскольку в конструкциях отсутствуют длинные резонансные элементы ИМС, что очень важно для применения в военной и космической технике.

Существующая технология предусматривает создание шариковых выводов на всей пластине. В случае ТТЛ ИМС или КМОП ИМС, для которых выход годных на пластине достаточно высок, такой подход оправдан. Однако для более сложных приборов с низким выходом годных на пластине стоимость создания шариковых выводов для всех структур на пластине при условии использования только небольшого процента годных структур может оказаться столь высокой, что она сведет на нет экономию, связанную с использованием ленты–носителя. Новый метод фирмы Mostek заключается в том, чтобы шариковые выводы создавать не на пластине, а на ленте. Для БИС, у которых невысокий процент выхода годных, этот метод с экономической точки зрения себя оправдывает. Кроме того, лента с шариковыми выводами может быть использована для сборки стандартных кристаллов со структурами ИМС.

Для монтажа в гибридные ИМС крупногабаритных кристаллов, особенно если в качестве платы используется материал с КТР, значительно

отличающийся от КТР кремния, могут быть рекомендованы ИМС со столбиковыми выводами. Оригинальный метод сборки приборов “Unibond”, разработан фирмой Fairehild Semiconductor, в котором для соединения кристалла с внешними выводами используются кристаллы с шариковыми выводами с контролируемой деформацией и система балочных выводов для присоединения к внешней рамке.

Изготовление ИМС по методу “Unibond” начинается с формирования шариковых контактов диаметром 125 мкм на контактных площадках кристалла. Этот процесс, в ходе которого создаются двухслойные шариковые контакты, проводится сразу на всех структурах до скрайбирования пластины. Двухслойная структура шариковых контактов гарантирует, что в процессе прохождения кристалла и рамки с выводами через печь шарики деформируются на заданную величину. После изготовления шариковых контактов пластина скрайбруется и кристаллы помещаются в кассету с 10 углублениями, которая вибрирует, смещая кристаллы к определенным углам гнезд. Затем на кристаллы, расположенные лицевой стороной вверх, накладывают рамки с выводами.

Рамки представляют собой штампованные детали круглой формы, содержащие прямые металлические “балки”, расходящиеся радиально от расположенного в центре кристалла. На рамку с выводами накладывается груз, и вся сборка – кассета, кристаллы, лента, в которой отштампованы рамки с выводами, и грузы пропускается через конвейерную печь.

Контролируемая деформация расплавляющегося верхнего слоя шариковых контактов допускает несколько неточное совмещение кристалла и рамки с выводами. При расплавлении этого слоя поверхностное натяжение расплава стремится установить рамку в правильное положение. Когда приборы выходят из печи, они заливаются в пластмассовые “таблетки”. В этом виде прибор почти готов. На этом этапе изделие может использоваться само по себе или монтироваться в гибридные ИМС. Помимо этого, оно может поступать дальше в технологический цикл для завершения сборки по системе “Unibond”.

Если таблеточный корпус поместить на облуженную рамку с выводами, размеры которой соответствуют стандартному корпусу с двухрядным расположением выводов, и пропустить опять через печь, то все выводы таблеточного корпуса соединятся с внешними выводами, а прибор можно будет поместить в стандартный пластмассовый корпус типа DIP.

Система “Unibond” не только исключает дорогую и не очень надежную проволочную сборку но и обладает дополнительными преимуществами. Прежде всего готовый прибор может рассеять на 25% больше тепла, чем прибор в стандартном пластмассовом корпусе DIP. Это связано с тем, что балочные выводы больше по размерам, чем обычно используемые проволочки диаметром 25 мкм. Поэтому через них могут проходить большие токи. При использовании системы “Unibond” сборка прибора с 14–16 выводами, расположенными в два ряда, ускоряется примерно в 50 раз по сравнению с ручной. Пластмасса для таблетки подбирается таким образом, чтобы она защищала кристалл, а пластмасса для наружного корпуса – так, чтобы обеспечивала устойчивость к внешним воздействиям. В результате

приборы становятся более надежными, чем с проволочными выводами, а экономия времени на операциях сварки и контроля составляет до 50 раз.

В ИМС с балочными выводами, впервые разработанными фирмой Bell Telephone Laboratories, система проводников, полученных осаждением золота, не только служит для соединения отдельных компонентов схемы друг с другом, но и обеспечивает связь ИМС с внешними схемами и устройствами. Золотой балочный вывод имеет относительно большую толщину (12 мкм) и выступает за границы кремниевого кристалла подобно консольной балке. Выступающий конец балочного вывода служит для присоединения к контактной площадке монтажной платы или подложки.

Открытые площадки ИМС соединяются друг с другом при помощи золотых выводов, осажденных электролитическим путем поверх структуры, состоящей из последовательных слоев силицида платины, титана и платины. Силицид платины обеспечивает хороший омический контакт с кремнием, обладающий малым переходным сопротивлением, слой титана служит для обеспечения хорошей связи расположенного над ним слоя платины с нитридом, покрывающим поверхность кремния по сторонам от контактной площадки, а платина защищает расположенные под ней слои от миграции золота. Для приборов с балочными выводами достигнут выход годных, равный 99% по механическим и более 90% по электрическим параметрам.

Метод фирмы AEG–Telefunken напоминает сборку с помощью паучковых выводов, но имеет ряд отличий:

- использование выращенных гальванически на контактных площадках золотых "шариков";

- металлизация слоями титана, вольфрама и золота;

- облуженная никелевая рамка с "паучковыми" выводами, служащая для соединения кристалла с выводами корпуса;

- теплопроводящий клей на основе эпоксидной смолы для крепления кристалла в корпусе.

В методе "Sicon" для "паучковых" выводов использовался луженый никель, который дает возможность осуществлять пайку твердым припоем, что в свою очередь исключает упрочняющее покрытие смолой. Прочность контактов на отрыв примерно в 10 раз больше значений, полученных при приварке проволочных выводов диаметром 25 мкм.

Фирма AEG–Telefunken, разработавшая метод "Sicon", в широких масштабах применяет металлизацию на основе системы титан–вольфрам–золото. По сравнению с алюминием металлизация на основе тяжелых металлов уменьшает электромиграцию по крайней мере на два порядка величины и позволяет избавиться от проблемы "пурпурной чумы". Это явление при приварке проволочных выводов вызывается образованием интерметаллических соединений алюминия с золотом. Оно накладывает ограничения на температурный диапазон работы приборов.

Наиболее успешным методом обработки пластин при автоматизированном соединении на ленточном носителе является создание столбиков из золота, полученных электролитическим осаждением, или меди, покрытой золотом, на алюминиевых контактных площадках кристалла при его монтировании на одно-, двух- и трехслойной ленте (рис. 12.7).

Критической стадией, влияющей на выход годных приборов, является селективное травление слоев, полученных методом вакуумного испарения или ионного распыления. При химическом травлении этих слоев травитель может проникать в пассивирующее покрытие и растворять легкокорродирующее алюминиевое межкомпонентное соединение.

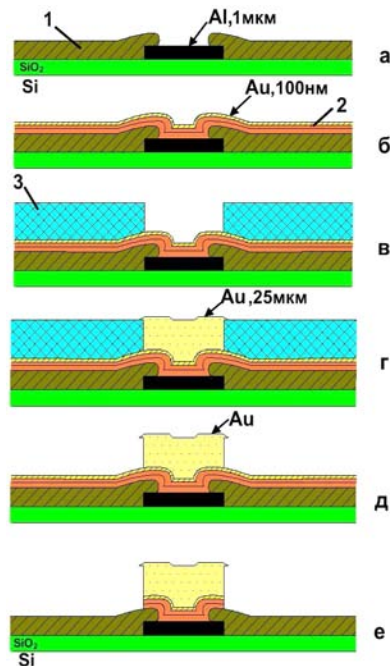


Рис. 12.7. Процесс формирования золотых столбиков на алюминиевых контактных площадках: а–пластина с предварительно сформированной ИМС, подвергнутая операциям очистки и ионного травления; б–создание контактного барьерного слоя (служащего также проводящим слоем при электролитическом осаждении золота методом ионного распыления) со слоем золота для предотвращения окисления; в–нанесение толсто пленочного фоторезиста; г – электролитическое осаждение слоя золота для образования столбиков; д–снятие резиста; е–удаление проводящих тонких пленок химическим травлением: 1 – окисел кремния 1–1,5 мкм; 2 – контактный барьерный слой 100 нм; 3 – фоторезист 25 мкм

Во избежание связанных с этим явлением технологических потерь применяется несколько процессов, включая плазменное травление. Стоимость всех дополнительных процессов обработки пластин входит в стоимость годного кристалла на пластине. Это повышение стоимости кристалла и технологические потери из-за травления алюминия делают процесс создания столбиков на пластине менее привлекательным, чем выполнение проволоочного соединения.

Автоматизированное соединение на ленточном носителе используется для монтажа кристаллов небольшого размера в плоском корпусе с двухрядным расположением вертикальных выводов, где стоимость процесса создания столбика на прибор низка и невелики потери из-за травления металлизации (вследствие малых размеров кристалла), а также для подсоединения кристаллов СБИС.

Примером применения автоматизированного соединения на ленточном носителе может служить многокристальный модуль для ЭВМ, где кристаллы сформированы на ленте, подвергаемой впоследствии тестированию. Каждый

кристалл может быть тщательно испытан или отбракован перед сборкой, что невозможно в случае использования приборов с проволочным соединением к незащищенной алюминиевой контактной площадке.

Технологический процесс сборки методом перевернутого кристалла, по которой выполнено соединение кристалла шариками припоя начинается с последовательного напыления Cr, Si и Au через металлическую маску на все алюминиевые контактные площадки на пластине.

Контактные площадки могут быть расположены в любой области на поверхности кристалла, с некоторыми ограничениями. Золото предохраняет тонкопленочную структуру от окисления до нанесения на покрытие Cr–Cu–Au последующих слоев Pb–Sn. Пленку Pb–Sn осаждают на большей площади по сравнению с площадью, занимаемой контактными площадками с покрытием Cr–Cu–Au. Площадь и толщина этой осажденной пленки определяют окончательные размеры шарика. Структура, полученная осаждением Pb и Sn, показана на рис. 12.8 штриховой линией. После напыления готовую структуру помещают в камеру с пониженным давлением, где с пленки Pb–Sn благодаря силам поверхностного натяжения удаляется окисный слой и образуется шарик припоя с площадью основания, определенной размерами покрытия Cr–Cu–Au.

Целью оптимизации конструкции является сведение к минимуму деформации сдвига в объеме припоя во время термоциклирования и достижение максимально возможной прочности соединения на поверхности раздела между кристаллом и подложкой. Прочность соединения поверхностей раздела кристалл – припой и подложка – припой на разрыв оптимизируется выбором такой контактной площади подложки, чтобы при испытаниях на термоциклирование и скручивание эти две поверхности раздела разрушались в равной степени. Это условие достигается выравниванием поверхностных напряжений.

Величину r_1 устанавливают на основании многих факторов, включая сведение к минимуму области кремния, на которой локализовано соединение. Оптимальное соотношение r_0/r_1 обозначим через K . Тогда размер квадратной контактной площадки области определится из соотношения

$$2 \cdot r_0^* = \sqrt{K \cdot r_1}, \quad (12.11)$$

где $2 \cdot r_0^*$ – краевая длина контактной области.

Возникновение осложнений для кристаллов СБИС связано с тем, что не все столбики припоя расположены на равном расстоянии от нейтральной точки. Кроме того, поскольку расстояние d увеличивается, а размеры соединений остаются неизменными, время до разрушения в цикле усталостных испытаний уменьшается. Если необходимо поддержать это время на прежнем уровне, то для сохранения оптимальных условий может быть увеличен радиус r_1 вместе с другими размерами. Чем больше радиус r_1 , тем больше область для осаждения припоя и, следовательно, больше расстояние между контактными площадками. Увеличение этого расстояния требует большей площади кремния. Выбор размера и формы шарика припоя в этом случае можно сделать с учетом стоимости кремния, надежности, быстродействия схемы, а также многих других параметров.

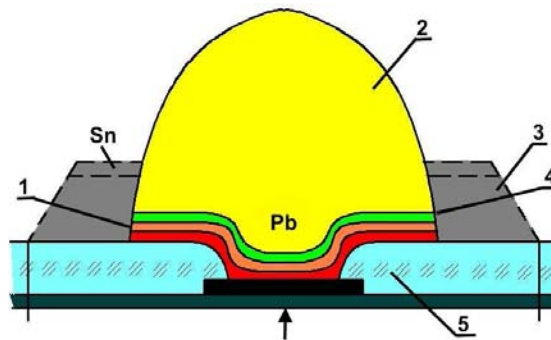


Рис. 12.8. Поперечное сечение контакта при монтаже ИМС методом перевернутого кристалла: 1 – слой фазового состава Sn+Cu 2 – шарик припоя 5% Sn – 95%Pb, 3 – осажденный припой, 4 – интерметаллическое соединение Cu-Sn, 5 – стекло

Основными преимуществами технологии сборки методом перевернутого кристалла являются возможность матричного расположения контактных площадок (по сравнению с контактными площадками, расположенными по краю кристалла) и очень малая протяженность межкомпонентных соединений, что сводит к минимуму величину их индуктивности. Основные недостатки этой технологии – худшие тепловые характеристики (по сравнению с кристаллом, присоединенным обычным способом) и трудность герметизации матрицы контактных площадок.

Преимуществам "паучкового" метода сборки являются:

- легкость контроля качества;
- "паучковые" выводы могут легко применяться в ИМС с неограниченным количеством контактных площадок;
- применение алюминиевых выводов позволяет получать надежное сварное соединение методом УЗ сварки;
- технологический процесс получения выводов не связан с обработкой пластины, благодаря чему их получение не сказывается на цикле изготовления ИМС;
- увеличение производительности в 30–50 раз по сравнению со сборкой проволочными выводами.

Недостатком "паучковых" выводов является трудность замены кристалла.

12.5 Монтаж кристаллов на плате

Потребности в уменьшении массы и габаритов конструкций электронной аппаратуры обусловили интерес к методам непосредственного монтажа кристаллов микросхем на плату (DCA – Direct Chip Attach): это «кристалл на плате» – COB (Chip-on-Board) или многокристальные модули (MCM – Multi-Chip-Module).

При оценке возможности использования этих методов необходимо вновь принимать во внимание разные температурные коэффициенты расширения кристаллов из кремния и монтажной подложки. Кроме прямого решения этой

проблемы – выбора соответствующего материала подложки, используется и другой путь: заливка эпоксидной смолой пазухи, разделяющей кристалл и плату. Подобный прием позволяет выровнять деформации кристалла и подложки и за счет этого существенно улучшить надежность таких сборок.

При непосредственной установке кристаллов на монтажные подложки не всегда есть возможность предварительно убедиться в их правильной работе до их монтажа на подложку. К настоящему времени существует несколько технологий для решения этой проблемы. В зарубежной терминологии она имеет название – «заведомо исправный кристалл». Один из путей ее решения – использование микрокорпусов, размеры которых лишь ненамного превышают размеры кристалла. Но это позволяет выполнить функцию защиты от внешней среды и перераспределить выводы кристалла на матрицу выводов микрокорпуса. В свою очередь, применение микрокорпусов позволяет юстировать микросхему до установки ее на монтажную подложку. На микросхемах с программируемой логикой (ПЛИС) создается возможность программировать их пережиганием перемычек в соответствии с требованиями. Типовой пример микрокорпусов – CSP–корпус (CSP – Chip–Scale Packaging). Поскольку для некоторых CSP–корпусов размер матричных выводов составляет 0,5 мм и менее, требуется использование специальных технологий производства печатных плат, позволяющих обеспечить разводку сигнальных цепей в узких пространствах между элементами монтажного поля.

С момента возникновения идеи «скрестить» гибридную и SMD–технологии основные усилия специалистов были направлены на снижение себестоимости изделий при сохранении преимуществ гибридной технологии. В результате проведенных работ оказалось, что печатная плата может быть использована в качестве носителя для кристаллов. Для перехода на монтаж кристаллов на печатную плату потребовалась доработка технологии ее производства. На рис. 12.9 показана типичная конструкция прибора, при изготовлении которого применен COB монтаж.

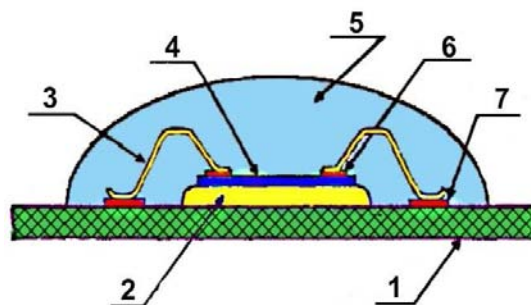


Рис. 12.9. Конструкция прибора с применением COB монтажа: 1 – плата, 2 – адгезив, 3 – проволока(Al, Au), 4 – кристалл, 5 – заливочный компаунд, 6 – контактная площадка на кристалле, 7 – контактная площадка на плате

COB используется при создании 100% видеокамер, карманных калькуляторов, телефонных и смарт–карт. Более сложные применения, это головка лазерного принтера с массивом из 5000 кристаллов светодиодов и соответствующего количества кристаллов драйверов, 32–битный компьютер HP 9000, в составе которого 22 кристалла СБИС и модем на одной плате.

Глава 13. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

13.1. Герметизация корпусов сваркой

Герметизация – одна из завершающих операций технологического процесса производства изделий интегральной электроники, так как обеспечивает их долговечную работу при механических и климатических воздействиях. Кроме того, она является завершающей операцией сборки полупроводниковых приборов, от качества которой зависит процент выхода годных изделий.

Постоянное стремление к повышению компактности, миниатюризации и быстродействию электронных систем вызывает увеличение плотности рассеиваемой мощности, что усложняет теплоотвод от активных компонентов и предъявляет дополнительные требования к конструкции корпусов и способам их герметизации. Герметизация и конструктивное исполнение корпусов являются не менее сложной проблемой, чем создание работающего кристалла.

Под герметизацией прибора понимают комплекс мер по обеспечению работоспособности изделий при их изготовлении, хранении и последующей длительной эксплуатации. Для этой цели могут быть использованы широкая номенклатура материалов и различные способы герметизации, реализованы разные конструктивные решения. При этом все герметизируемые изделия можно разделить на две группы: полые конструкции, в которых рабочая поверхность изделия не контактирует непосредственно с герметизирующим материалом, и конструкции без внутренних газовых полостей, в которых герметизирующий материал контактирует с рабочей поверхностью изделия (монокристаллы).

К первой группе относят металлокерамические, металлокерамические, пластмассовые и другие корпуса, ко второй – бескорпусные изделия и монокристаллы.

Особенностями герметизации в полых корпусах с воздушной или другой газовой средой являются отсутствие воздействия на герметизируемые изделия механических напряжений, возможность расположения внутри корпусов геттеров для регулирования состава газовой среды и влажности, а также возможность заполнения при необходимости внутреннего объема инертным газом.

Однако герметизация изделий в полых корпусах не всегда обеспечивает требуемую механическую прочность элементов конструкции изделия. В таких случаях изделия предварительно покрывают эластичным материалом для механического крепления и электрической изоляции проводников друг от друга и от металлической крышки корпуса.

Следует учитывать также возможность влияния на работоспособность изделий летучих веществ, попадающих во внутренний объем герметичного корпуса на стадии изготовления или эксплуатации изделий. В результате в таких корпусах эксплуатационная надежность изделий может резко

снижаться. Поэтому материалы, используемые для изготовления полых корпусов, должны обладать высокой нагревостойкостью, а технология сборки должна гарантировать от попадания внутрь корпусов летучих веществ при герметизации (сваркой или пайкой).

Наиболее надежны корпуса и покрытия на основе неорганических материалов; очень распространена герметизация изделий, помещенных в металлостеклянные или металлокерамические корпуса. Такие корпуса могут иметь самую различную форму и любое число выводов в зависимости от типа герметизируемого изделия.

Хотя герметизация в полые корпуса является технически оправданной, использование их усложняет сборку изделий, затрудняя ее механизацию и автоматизацию. Объем и масса корпусов часто в десятки, а иногда в сотни раз превышают объем и массу герметизируемых изделий, что не согласуется с требованиями микроминиатюризации.

В зависимости от типа корпуса и предъявляемых требований герметизация может осуществляться пайкой, холодной сваркой, электроконтактной сваркой, сваркой плавлением и др. В электронной промышленности наиболее распространены способы герметизации холодной и электроконтактной сваркой, пайкой и пластмассами.

Среди различных способов получения неразъемных соединений большое распространение получила холодная сварка. Отличаясь простотой и доступностью, она позволяет осуществлять прочные и надежные соединения. Холодной сваркой можно соединять не только однородные, но и разнородные металлы. Этот способ применяется в основном для герметизации металлостеклянных корпусов транзисторов и диодов средней и большой мощности.

В основу холодной сварки положена пластическая деформация свариваемых металлов при нормальной температуре под действием большого давления, при которой чистые поверхности, вступая в контакт друг с другом, образуют цельнометаллические соединения с непрерывной кристаллической структурой. Достоинством способа холодной сварки является отсутствие нагрева при герметизации и сопровождающего его явления – выделения газов внутри объема.

Для герметизации корпусов применяют чаще холодную сварку, образующую соединение внахлест – точечную холодную сварку по замкнутому контуру (периметру) силами P , направленными перпендикулярно свариваемой поверхности (рис. 13.1), и значительно реже – холодную сварку сдвигом или продавливанием при одновременном действии нормальных и тангенциальных усилий.

Сварка по замкнутому контуру может быть с одно– и двухсторонним деформированием. Сварку с односторонним деформированием применяют для соединения деталей из разнородных металлов, так как устраняется опасность образования сильно подрезанного участка шва с наружной стороны более мягкой детали, хотя прочность на отрыв получается меньшей, чем при сварке с двухсторонним деформированием.

Сварку с двухсторонним деформированием используют для соединения однородных металлов. Недостатком ее является необходимость точной

фиксации выступов пуансона и матрицы. Смещение выступов при сварке разнородных металлов вызывает подрезание (утонение) более мягкого из них.

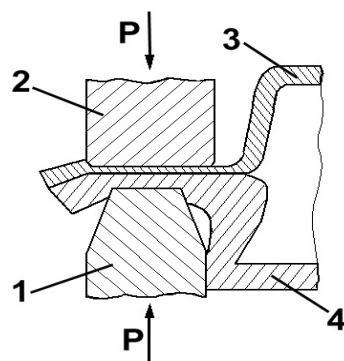


Рис. 13.1. Схема холодной сварки корпусов
1, 2 – нижний и верхний пуансоны, 3 – крышка, 4 – корпус прибора

Режим холодной сварки по замкнутому контуру определяется степенью относительной деформации:

$$K = \frac{(S_n - S_k) - h}{S_n + S_k} \cdot 100\%, \quad (13.1)$$

где S_n – толщина буртика ножки; S_k – толщина буртика баллона; h – толщина шва.

Деформация должна быть не ниже определенного значения, характерного для данного металла. Усилие для создания такой деформации зависит от многих факторов и может меняться в широких пределах. При заданном значении относительной деформации можно определить толщину сварного шва:

$$h = (S_n + S_k) \cdot (1 - K/100). \quad (13.2)$$

Усилие сжатия при холодной сварке

$$F = kpS, \quad (13.3)$$

где k – коэффициент, учитывающий упрочнение материала (1,5–2,0); p – удельное давление; S – площадь проекции поверхности рабочей части пуансона.

При сварке однородных металлов удельное давление можно определить (приблизенно) по формуле при условии, что ширина рабочей части пуансонов вдвое превышает необходимую толщину свариваемого металла:

$$p = \sigma_m \left[1,5 + 100 / (100 - K) \right], \quad (13.4)$$

где σ_m – предел текучести металла.

Значения относительной деформации при холодной сварке различных металлов толщиной до 1 мм и удельные давления для холодной сварки по замкнутому контуру некоторых металлов приведены в табл. 13.1.

Таблица 13.1. Относительная деформация и удельное давление для холодной сварки некоторых металлов

Свариваемые материалы	Относительная	Удельное давление,
	ная	

	деформация , %	$\times 10^9$ Па
Алюминий + алюминий	60	0,17 – 0,5
Медь + медь	80	1,5 – 1,8
Алюминий + медь	62	0,5 – 1,0
Медь + низкоуглеродистая сталь	80	2,0 – 2,5
Медь + ковар	80	2,0 – 2,5

Для материалов, соединяемых холодной сваркой по замкнутому контуру, требуется, чтобы величина относительной деформации находилась в интервале 75–85%. Давление обычно в 5–8 раз превышает предел прочности свариваемых металлов при растяжении. При одно- и двухсторонней сварках целесообразно толщину S буртиков выбирать одинаковой. Разная толщина буртиков допускается при отношении их толщин до 1,4.

Деформация свариваемых деталей при холодной сварке вызывает увеличение наружного диаметра прибора, уменьшение диаметра верхней детали баллона в околошовной зоне, увеличение высоты баллона.

Чтобы избежать деформации корпуса, применяют конструкции фланцев, держателей и баллонов с разгрузочными (компенсационными) элементами, способными в результате деформации снизить остаточные напряжения до безопасных значений.

Контактная (электроконтактная) сварка наиболее широко применяется для герметизации полупроводниковых приборов и микросхем в металlostеклянных корпусах круглой и прямоугольной формы со штырьковыми выводами, а также СВЧ приборов в керамических корпусах. Основными ее видами являются контактная сварка по контуру и шовная (роликовая).

Контактная сварка представляет собой процесс получения неразъемного соединения материалов нагревом свариваемых кромок до пластического или расплавленного состояния с последующим их сжатием (давлением). Нагрев свариваемых деталей производится в результате выделяемой теплоты при прохождении через них электрического тока.

Электрическая энергия накапливается при заряде конденсаторов от источника постоянного напряжения (выпрямителя), а затем расходуется при их разряде, превращаясь в процессе сварки в тепловую энергию. Нагрев металла происходит при замыкании сварочной цепи. Количество выделяемой теплоты определяют по закону Джоуля–Ленца:

$$Q = kI^2 Rt, \quad (13.5)$$

где k – коэффициент пропорциональности, I – сварочный ток; R – полное сопротивление между сварочными электродами; t – время сварки.

Из формулы видно, что количество теплоты в значительной степени зависит от силы тока в сварочной цепи. Поэтому для быстрого нагрева свариваемых кромок применяют большие токи, достигающие нескольких десятков тысяч ампер. Полное сопротивление R состоит из сопротивления

деталей, сопротивления между электродом и деталями и сопротивления сварочного контакта:

$$R = 2R_D + R_{\text{э}} + R_K, \quad (13.6)$$

где R_D , $R_{\text{э}}$, R_K – электрическое сопротивление детали, электродов и контакта соответственно.

Электрическое сопротивление прохождению тока в месте контакта свариваемых деталей особенно велико, поэтому на этом очень малом участке выделяется большое количество теплоты.

С повышением температуры металла в зоне контакта его сопротивление возрастает, следовательно, еще более увеличивается количество выделяющейся теплоты и ускоряется процесс нагрева металла. Участки контакта вначале нагреваются током неравномерно, а затем ток и температура перераспределяется между горячим и холодным металлом и нагрев выравнивается. Преимущественное тепловыделение в зоне контакта сохраняется, и между деталями корпуса появляется расплавленное ядро, которое растет в объеме, перемещается и выравнивается по составу электромагнитным полем, создаваемым сварочным током. При использовании больших сварочных токов сварку выполняют за десятые и даже сотые доли секунды.

Герметизация изделий контактной сваркой – высокопроизводительный процесс, легко поддающийся механизации и автоматизации. Режим контактной сварки характеризуется основными параметрами – током и временем его прохождения, силой сжатия и временем ее действия.

Мощность разряда, выделяемая источником питания и обеспечивающая заданную глубину проплавления по контуру, составляет от 50 до 150 кВт. Ее можно выразить через энергию, накапливаемую в конденсаторной батарее, которую регулируют изменением емкости и напряжением зарядки,

$$E = \eta Q / t_p, \quad (13.7)$$

Где η – коэффициент пропорциональности, учитывающий рассеиваемую мощность ($\eta < 1$), $Q = CU^2 / 2$ – энергия, накапливаемая в конденсаторной батарее; C – емкость конденсаторов; t_p – время разряда. Тогда напряжение зарядки конденсаторов равно

$$U = \sqrt{2Q / C}. \quad (13.8)$$

Для определения тепловых и температурных режимов пользуются часто понятием плотности тока, проходящего через контакт:

$$J = \frac{\eta CUk}{2t_p S_k}, \quad (13.9)$$

где S_k – площадь контакта свариваемых деталей.

Усилие сжатия свариваемых узлов можно определить по формуле

$$F = pkS_k, \quad (13.10)$$

где p – удельная нагрузка (обычно 10–20 МПа).

Учитывая, что плотность сварочного тока должна быть очень большой, площади контакта часто уменьшают, создавая свариваемую поверхность определенного вида или придавая отбортовкой деталям специальную

наклонную конфигурацию. Сварка осуществляется в месте контакта острой кромки отбортованной одной из деталей с плоской поверхностью отбортованной другой детали, что значительно повышает качество и стабильность контактной сварки.

Контактную сварку по контуру на конденсаторных машинах по тепловому воздействию на корпус можно отнести к разряду низкотемпературных. Длительность сварочного импульса при этой сварке настолько мала (20–80 мс), что выделяемая теплота не успевает распространиться в глубь тела корпуса, а преимущественно отводится в электроды, которые обычно выполняют из меди или медных сплавов с высокой теплопроводностью.

К достоинствам контактной сварки по контуру относятся: точная дозировка энергии; хорошая воспроизводимость процесса; слабый общий нагрев свариваемых изделий вследствие кратковременности процесса сварки и резко выраженной локализации нагрева свариваемых металлов, что особенно важно при герметизации корпусов полупроводниковых приборов и микросхем, для которых общий нагрев корпуса не допускается выше рабочей температуры прибора.

В производстве ИМС и новых типов полупроводниковых приборов все чаще применяют способы герметизации сваркой плавлением кромок соединяемых деталей (рис. 13.2).

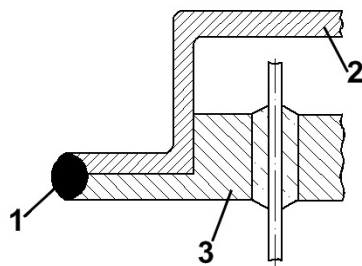


Рис. 13.2. Конструкция сварного соединения при сварке плавлением
1 – зона сварки, 2,3– соединяемые детали

Это объясняется особенностями конструкции ряда широко распространенных корпусов микросхем: боковым расположением выводов и наличием стеклоизолятора или керамического изолятора непосредственно под зоной герметизации или вблизи ее, что делает герметизацию сваркой давлением практически невозможной, а при герметизации пайкой требуется нагрев всей микросхемы. Наиболее распространены следующие способы герметизации сваркой плавлением: аргонно–дуговая, микроплазменная, электронно–лучевая и лазерная.

Герметизация аргонно–дуговой сваркой является одним из видов электродуговой сварки, при которой нагрев свариваемых кромок осуществляется теплотой электрической дуги. В зону дуги подается защитная струя аргона, которая, обтекая электрическую дугу и сварочную ванну, предохраняет расплавленный металл от воздействия атмосферного воздуха (окисления и азотирования).

Герметизация при аргонно–дуговой сварке происходит при расплавлении кромок свариваемых деталей корпуса с образованием

сварочной ванны и последующей кристаллизации металла шва. Для герметизации корпусов чаще применяется аргонно–дуговая сварка неплавящимся электродом, который служит только для возбуждения и поддержания горения дуги (рис. 13.3). Ее используют для герметизации металлостеклянных корпусов со штырьковыми выводами, периметр сварки которых превышает 50 мм, а суммарная толщина отбортованных кромок составляет 0,2–0,6 мм.

В качестве неплавящегося электрода используют прутки вольфрама, содержащие 1,5–2% тория. Диаметр электрода для импульсного режима зависит от сварочного тока. Кончик электрода должен быть заточен на конус с углом от 15 до 30°. К торцевой поверхности свариваемых кромок электрод следует располагать под углом 70°.

Для предупреждения блуждания сварочной дуги по поверхности герметизируемого корпуса используют весьма малые диаметры электродов и очень короткую (до 0,6–0,7 мм) дугу, при этом для получения стабильной глубины проплавления металла допустимое отклонение длины дуги не должно превышать $\pm 0,1$ мм. Основное преимущество аргонно–дуговой сварки – возможность применения местного нагрева деталей корпуса, а недостаток ее – повышенные требования к точности изготовления оснастки и совмещения свариваемых деталей, а также чувствительность к отклонениям рабочих параметров дуги, т. е. нестабильность ее горения.

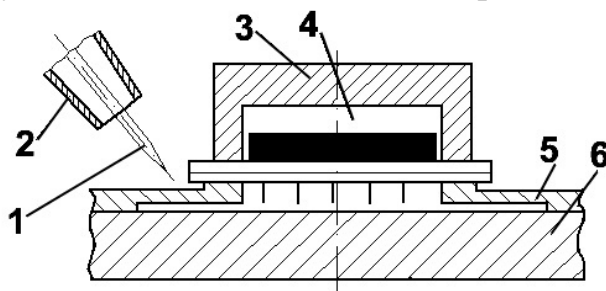


Рис. 13.3. Схема аргонно–дуговой сварки

1 – электрод, 2 – сопло горелки, 3,5 – теплоотводы крышки и основания, 4 – кристалл микросхемы, 6 – корпус кассеты

Основными параметрами технологического режима аргонно–дуговой сварки являются: сварочный ток, скорость сварки, длина дуги, давление защитного газа в рабочей камере. Сварочный ток и скорость сварки подбирают в зависимости от свариваемых металлов и толщины кромок. Давление защитного газа в сварочной камере должно быть $0,2 \cdot 10^5$ Па. Перекрытие шва происходит на длине 10–25% от его периметра с плавным снижением тока до минимального.

Кроме технологических режимов, важное значение для качества сварочного соединения имеет подбор материалов, из которых изготавливают детали корпусов. Например, если основание из сплава 29НК, крышку следует изготавливать из сплава 29НК или нержавеющей стали 1Х18Н9Т.

Разновидностью аргонно–дуговой сварки является микроплазменная сварка, применяемая для герметизации корпусов с малой толщиной. Для сварки этим способом используется сжатый дуговой разряд с интенсивным плазмообразованием (рис. 13.4). Плазменная сварка не имеет тех

недостатков, которые присущи аргоно–дуговой: сравнительно большого активного пятна и нестабильности при малых токах.

Плазменная дуга характеризуется высокими скоростями потока плазмы и температурой столба. Для получения дуговой плазменной струи используют специальные плазменные головки, или плазмотроны, в которых имеется неплавящийся вольфрамовый электрод, изолированный от канала и сопла, при этом анодом обычно служит герметизируемое изделие.

Газовая среда в плазмотроне выполняет следующие функции: защищает от окисления и охлаждает вольфрамовый электрод и сопло, обеспечивает получение стабильной плазменной струи с необходимой температурой и скоростью, а также максимальную теплопередачу к герметизируемому изделию.

Газы разделяются на плазмообразующие и защитные. В качестве плазмообразующего газа при микроплазменной сварке обычно используют смесь Ar–He или Ar–H₂, а в качестве защитного – аргон.

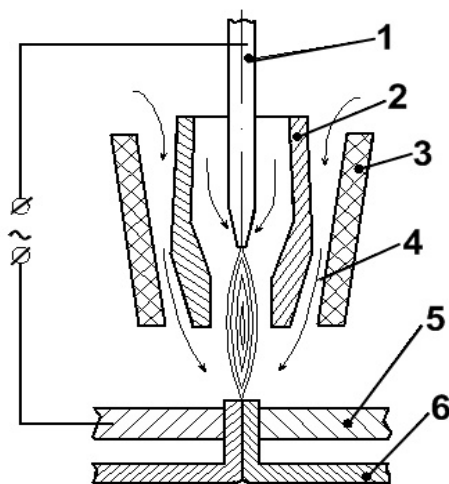


Рис. 13.4. Схема герметизации корпусов микроплазменной дугой
1 – электрод, 2 – плазмообразующий газ, 3 – корпус горелки, 4 – защитный газ, 5 – теплоотвод, 6 – свариваемые кромки корпуса

Электронно–лучевая сварка по сравнению с другими видами имеет выгодные особенности – точное регулирование и управление тепловой энергией, локальный нагрев, высокая чистота при сварке благодаря наличию вакуума, которые позволяют успешно применять ее для герметизации микросхем.

Сущность герметизации электронно–лучевой сваркой состоит в формировании непрерывного сварного шва по всему контуру корпуса за счет перекрывающихся сварных точек, образующихся в результате воздействия нагрева до температуры плавления сфокусированного электронного луча на отбортовку вращающегося корпуса (крышки и основания). Нагрев электронным лучом осуществляется вследствие превращения кинетической энергии ускоренных электронов в тепловую при торможении в свариваемых металлических деталях.

В отличие от обычных широко применяемых источников теплоты, производящих нагрев теплопередачи через поверхности металла,

высвобождение энергии при электронно–лучевой сварке происходит в самом веществе, причем наиболее интенсивное тепловыделение наблюдается на некоторой глубине (порядка 1 мкм), поэтому тепловой источник можно считать поверхностным.

Герметизацию электронно–лучевой сваркой можно выполнять в непрерывном и импульсном режимах, но предпочтительнее в импульсном, который позволяет осуществить герметизацию с малой зоной термического влияния.

Основными параметрами технологического процесса являются: ускоряющее напряжение, диаметр электронного луча, скорость сварки, длительность и частота следования импульсов (для импульсного режима).

При герметизации корпусов электронно–лучевой сваркой величина отбортованной кромки под сварку должна быть 0,4–0,8 мм, необходимая глубина проплавления, обеспечивающая герметичность корпуса, 0,5–0,8 мм, а степень перекрытия сварных точек –50–60% от их диаметра (она определяется их размером и шагом).

Шаг образования сварных точек равен

$$S = \frac{V}{T_{ц}}, \quad (13.11)$$

где V –скорость сварки, $T_{ц}$ –время цикла.

Сварные швы, полученные данным способом, имеют гладкую или мелкочешуйчатую поверхность по всей длине. Основным дефектом швов могут быть непровары, образующиеся из–за увеличения зазора между свариваемыми кромками, смещения линии стыка кромок относительно оси луча, несоблюдения технологических режимов.

Способ герметизации электронным лучом применяется реже из–за сложности конструкции установок по сравнению с другими способами, обеспечивающими качественную герметизацию.

Герметизация лазерной сваркой состоит в совместном оплавлении соединяемых материалов под действием интенсивного светового потока с образованием шва (рис. 13.5). Лазерная технология по сравнению с традиционными способами сварки, применяемыми для герметизации, обладает рядом преимуществ. Основное достоинство лазерного излучения как источника теплоты при сварке – возможность концентрации сравнительно больших энергий на малых поверхностях в короткие промежутки времени, т. е. высокая локальность процесса нагрева. В результате этого можно сваривать металл в непосредственной близости от металlostеклянных или металлокерамических спаев, проводить герметизацию практически без термического влияния на элементы и компоненты микросхем и структуры полупроводниковых приборов. Преимущества способа: возможность легкого фокусирования излучения обычными оптическими системами, не требуется создания специальных сред (вакуум, защитная атмосфера), лазерное излучение может проникать сквозь оптически прозрачные вещества (стекло, кварц).

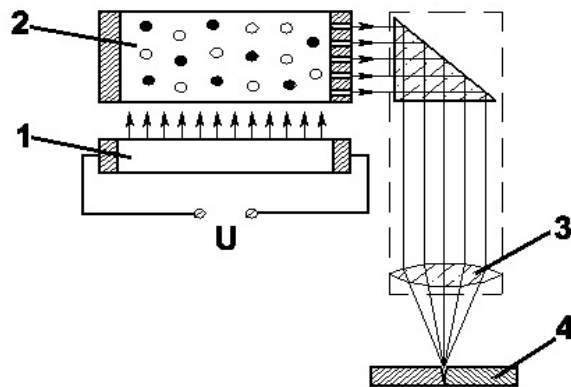


Рис. 13.5. Схема герметизации корпусов лазерной сваркой
 1 – лампа накачки, 2 – активный элемент, 3 – оптическая система, 4 – свариваемые детали

Для герметизации корпусов применяют шовную лазерную сварку, выполняемую как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы лазера, тогда как точечная сварка чаще всего используется при приварке выводов и пайке тонких деталей.

Основными параметрами режима лазерной сварки являются энергия лазерного излучения в импульсе или мощность лазерного излучения, длительность лазерного импульса, диаметр луча, частота следования импульсов и скорость сварки, которые обуславливают обобщенный энергетический параметр – интенсивность излучения в фокальном пятне:

$$E_d = \frac{4W}{\pi \cdot d \cdot \tau_u}, \quad (13.12)$$

где W – энергия лазерного излучения; d – диаметр луча; τ_u – длительность лазерного импульса.

Для каждой пары соединяемых металлов существует предельное значение интенсивности излучения в фокальном пятне, выше которого сварка будет сопровождаться значительным испарением металла из зоны нагрева или выплеском части расплавленного металла. Оптимальные условия сварки большинства сочетаний металлов (температура на границе сварочной ванны равна температуре плавления, а в центральной области меньше или равна температуре кипения) обеспечиваются интенсивностью до 10^{10} Вт/м².

Управление интенсивностью излучения в фокальном пятне осуществляется тремя способами: выходной мощностью, изменением длительности воздействия излучения на материал, площадью фокального пятна.

Для получения вакуумно–плотного шва при сварке в импульсном режиме степень перекрытия сварных точек должна составлять 50–80% от их диаметра и зависит от величины их диаметра и шага S .

$$S = V_{св} \Gamma_{ц} = \frac{V_{св}}{f_{и}}, \quad (13.13)$$

где $V_{св}$ – скорость сварки; $T_{ц}$ – время цикла; $f_{и}$ – частота следования импульсов.

Недостатками герметизации лазерной сваркой являются незначительная глубина проплавления соединения металлов при средних мощностях излучения, выплески испаряемого металла при использовании мощных лазеров, значительные потери энергии лазерного пучка при сварке металлов, обладающих высокими коэффициентами отражения.

13.2 Герметизация корпусов пайкой

Герметизация пайкой первоначально была широко распространена в производстве ИМС, но новые способы герметизации постепенно вытеснили ее, хотя некоторые типы микросхем в плоских металlostеклянных и металлокерамических корпусах продолжают герметизировать пайкой.

Сущность процесса герметизации пайкой заключается в соединении металлических или металлизированных поверхностей деталей корпусов с помощью припоя, который при температуре пайки смачивает паяемые поверхности, заполняет капиллярный зазор между ними и, кристаллизуясь, связывает их в монолитную герметичную конструкцию. Удаление оксидных пленок на соединяемых поверхностях осуществляется действием флюса. При бесфлюсовых способах пайки роль флюса выполняет газовая среда или специальные компоненты припоя. Прочность соединения, как правило, равна прочности припоя.

К преимуществу герметизации пайкой относят отсутствие значительных давлений и специального инструмента, а к недостаткам – необходимость нагрева всего прибора до значительной температуры (200–350°C) и вредное влияние флюса (остатки флюсов, которые не могут быть полностью удалены, попадая на полупроводниковые структуры, ухудшают стабильность электрических параметров), необходимость работы в атмосфере водорода или инертного газа, критичность режимов пайки, особенно при герметизации микросхем с наличием золотого покрытия.

Таблица 13.2. Состав и свойства припоев, используемых для герметизации

Марка припоя	Химический состав, %								Температура плавления, °С	Температура пайки, °С
	Sn	Pb	Cd	Bi	Zn	Ag	Au	Sb		
ПОС 61	59–61	Ост	–	0,1	–	–	–	0,8	183	200–240
ПОС 61+ 3% Ag	57–59	–”–	–	–	–	3	–	0,1	190	240–280
ПОС	57–	–”–	–	–	–	–	3	0,1	190	240–

61+ 3% Au	59										280
ПОСК 50	50	32	18	–	–	–	–	–	–	145	180
ПОСИ С 1	30	19	–	–	50	1,0	–	–	–	130	170
ПОСК 47	47	36	17	–	–	–	–	–	–	142	180
ПОС 40	39– 40	Ост.	–	0–1	–	–	–	–	< 2,0	183– 235	250
ПСр 2,5	5,5± 0,5	92±1 ,0	–	–	–	2,5± 0,3	–	–	–	295– 305	320– 350
ПСр 2	30± 0,1	63±1 ,5	5±0, 5	–	–	2±0, 3	–	–	–	225– 235	250– 260
ПОСВ 33	33,4	33,4	–	33, 3	–	–	–	–	–	130	170

Для герметизации ИМС применяют в основном два вида герметизации низкотемпературной пайкой: в конвейерных печах и струей горячего газа на специальных установках. Использование для пайки закладных деталей позволяет вводить заранее в паяемый узел определенное количество припоя и флюса, в результате чего получают однородные соединения. Выбор припоев для герметизации ограничен, так как при проведении этого процесса должны сохраняться все ранее полученные соединения. Обычно используют оловянно–свинцовые припои, особенно ПОС 61 и ПСр2,5. Состав и свойства припоев, используемых для герметизации, приведены в табл. 13.2.

Технологический процесс герметизацией пайкой включает подготовку деталей корпусов к пайке, непосредственно пайку и контроль герметизированных изделий.

Необходимым условием качественной пайки является тщательная очистка (обезжиривание в различных растворителях) паяемых поверхностей. Для лучшего смачивания паяемых поверхностей припоем используют предварительное их золочение, лужение и другие покрытия. Пайка осуществляется нагревом в печи собранных в кассеты деталей с заранее вложенным припоем, покрытым флюсом. Кассеты обычно выполняют из чистого графита или другого жаростойкого материала (нержавеющей стали), который не загрязняет арматуру и гарантирует фиксацию деталей относительно друг друга.

Весь узел подогревается в печи до температуры пайки медленно, поэтому большое значение имеет скорость, с которой подводится теплота. Температура печи должна обеспечить расплавление припоя и перегрев его на 50–60°С выше точки плавления при определенном времени выдержки. При нагреве припойная шайба расплавляется и образует припойный конус, соединяющий выводы и держатели с лужеными коваровыми втулками. После пайки детали охлаждают в холодильной камере. При этом не допускается относительное смещение свариваемых деталей, поэтому кассеты с арматурой в печи необходимо перемещать медленно.

Способ пайки в конвейерной печи обеспечивает высокое качество паяных соединений. Преимуществами способа герметизации низкотемпературной пайкой в конвейерной печи являются: отсутствие окисления поверхностей деталей и припоя при нагреве; уменьшение деформации узлов благодаря равномерности их нагрева и жесткости кассет; отсутствие пережогов, коробления, наплывов припоя, требующих зачистки; возможность сборки приборов с несколькими паяемыми выводами.

При небольших объемах выпускаемой продукции целесообразно применять пайку струей горячего газа (рис. 13.6). Этот способ заключается в нагреве паяемых деталей и расплавлении припоя направленным потоком воздуха или инертного газа (азот, аргон), температура и расход которого тщательно регулируются.

Пайка струей горячего газа обладает многими достоинствами. Инертная среда предотвращает окисление деталей при высокой температуре пайки. Ход процесса определяется температурой пайки, расходом газа и временем выдержки. Эти параметры легко поддерживаются в заданных пределах, что позволяет получать надежные паяные соединения. Оборудование просто и удобно в эксплуатации.

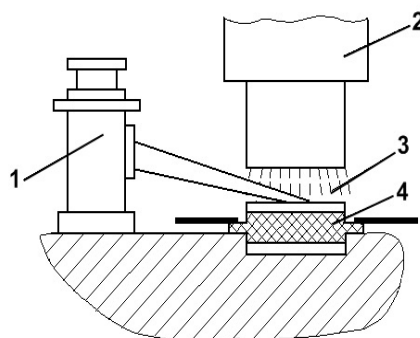


Рис. 13.6. Схема пайки горячим газом

1 – приспособление для прижима крышки к корпусу, 2 – нагреватель, 3 – горячий газ, 4 – герметизируемая микросхема

При герметизации пайкой горячим воздухом или газом возможны следующие дефекты: полное или частичное отсутствие смачивания паяемых поверхностей припоем; пустоты в паяном соединении, затекание припоя внутрь прибора; перекосы паяемых деталей.

Причинами плохого смачивания могут быть загрязнение поверхности, наличие оксидного слоя на паяемых поверхностях, дефекты покрытия на этих поверхностях, недостаточная температура в зоне пайки печи. Наличие пустот свидетельствует о чрезмерных зазорах между деталями, о глубоких царапинах на паяемых поверхностях.

Затекание припоя внутрь прибора (особенно металлостеклянной конструкции) связано с тем, что воздух (газ) внутри корпуса нагревается и увеличивается в объеме. Часть воздуха выходит из корпуса через расплавленный припой. Если затем воздух внутри корпуса охлаждается раньше, чем начинается кристаллизация припоя, внутри корпуса создается пониженное давление и припой, не успевший затвердеть, вдавливается

внутри корпуса. Перекосы деталей при пайке указывают на плохое качество кассет или их чрезмерный износ. Перечисленные виды брака могут быть устранены и предупреждены при соблюдении технологии, качественном контроле паяемых деталей и узлов и тщательной проверке кассет после их изготовления и в процессе работы.

В настоящее время в промышленности применяют способы герметизации с помощью бесфлюсовой пайки (например пайка эвтектикой золото–олово), которую осуществляют в конвейерных печах в среде инертного газа при 320–350°C (температура плавления эвтектики 280 °C). Поскольку припой обладает низкой текучестью, пайка требует длительного времени, при этом основание корпуса и крышку предварительно золотят. Сплав золото–олово очень хрупкий, поэтому изготовление прокладок из этого припоя представляет собой сложный технологический процесс.

13.3 Герметизация пластмассами

Современный этап развития электронной промышленности характеризуется значительным увеличением объемов производства надежных и дешевых полупроводниковых приборов и микросхем в пластмассовых корпусах. Такое увеличение связано с дальнейшей микроминиатюризацией, заменой дорогостоящих металlostеклянных и металлокерамических корпусов, экономией драгоценных металлов, возможностью совмещения технологических операций изготовления корпусов и герметизации и полной их механизации.

Пластмасса изолирует приборы и микросхемы от внешних воздействий и обеспечивает требуемую механическую и электрическую прочность. Различные типы ИМС герметизируют в пластмассовые корпуса разными способами, что связано в основном с их конструктивными особенностями и объемами производства. Различают следующие технологические способы пластмассовой герметизации: литьевое или трансферное прессование; компрессионное прессование; опрессовка с помощью жидких композиций; обволакивание и окунание: герметизация в полые пластмассовые корпуса; заливка во вспомогательные съемные формы; заливка в предварительно изготовленный корпус–капсулу. Способ трансферного прессования как для термопластичных, так и для терморезистивных масс, распространен в промышленности наиболее широко.

Несмотря на то, что многие полупроводниковые приборы, диодные матрицы и интегральные микросхемы, герметизированные пластмассами, успешно работают в различных электронных устройствах и аппаратуре, повышение надежности этих изделий остается актуальным вопросом. Это связано с тем, что герметизация с помощью пластмасс имеет и недостатки: ухудшение условий теплоотвода; появление остаточных напряжений, возникающих при отверждении герметика: недостаточность влагостойкости вследствие сорбции влаги полимерами; подверженность процессам старения.

Защитные свойства пластмассового корпуса характеризуются скоростью проникновения через пластмассу газов и паров, количеством адсорбируемой влаги, адгезией пластмассы к металлу рамки и выводов.

Для герметизации полупроводниковых приборов и микросхем используют различные пластичные материалы на основе эпоксидных, кремнийорганических и полиэфирных смол (эмали, заливочные компаунды, порошкообразные композиции). К ним предъявляют требования, определяемые надежной работой изделий в различных климатических условиях при электрических и механических нагрузках.

Различают две основные группы свойств пластмасс: физико–химические и технологические, характеризующие перерабатываемость пластмасс. К первой группе относятся плотность, теплопроводность, механическая прочность, термостойкость, электроизоляционные свойства и др. В зависимости от типа герметизируемых приборов отдельные электрические характеристики приобретают особое значение.

Так, при герметизации высоковольтных полупроводниковых приборов необходимо использовать материал, обладающий высокой электрической прочностью, которая служит критерием для сравнительной оценки способности данной пластмассы противостоять электрическому пробое. Для приборов, работающих в СВЧ диапазоне, большое значение имеют диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь (способность пластмассы рассеивать электрическую энергию в переменном поле). Для маломощных диодов, обладающих малыми уровнями обратных токов, необходимо выбирать пластмассы с высокими значениями поверхностных и объемных сопротивлений.

Ко второй группе относятся текучесть, скорость отверждения, усадка и др. Текучесть характеризует способность материала к переработке, т. е. способность пластмассы под действием теплоты и давления течь и заполнять пресс–форму или заливочную форму. Текучесть зависит от внутреннего трения между частицами материала (степень трения, в свою очередь, определяется вязкостью смолы, природой наполнителя и его количеством), внешнего трения (обусловленного качеством полировки пресс–формы и степенью прилипания к ней материала) и от скорости отверждения. При слишком высокой текучести материал затекает в мельчайшие зазоры между соединяемыми деталями пресс–формы, прилипает к поверхности формирующих полостей, а при низкой текучести повышается удельное давление прессования.

Усадка – это свойство пластмасс уменьшаться в размерах при охлаждении, которая зависит прежде всего от природы материала, давления и температуры прессования, изменения структуры материала при отверждении и др. Для материалов, используемых при герметизации в полупроводниковой промышленности, усадка допускается не более 0,6%.

Важным свойством пластмасс является стойкость к набуханию во влажной атмосфере. При повышенной влажности пластмасс возрастает усадка, увеличивается деформация изделий (коробление) и время выдержки при прессовании, что отрицательно сказывается на качестве герметизации. Радикальными средствами уменьшения влажности пресс–материалов являются их сушка за счет предварительного прогрева.

Герметизация прессованием пластмасс основана на особенности ряда полимерных материалов расплавляться и течь под действием температуры и

давления, заполняя при этом пустоты металлической формы с изделиями. Применяют в основном два способа герметизации прессованием: компрессионное и литьевое. При компрессионном прессовании пресс-материал помещают непосредственно в пресс-форму, при литьевом – в загрузочную камеру.

Герметизация компрессионным прессованием (рис. 13.7) происходит следующим образом. В пресс-форму 2 загружают арматуру изделия и таблетированный или порошкообразный материал 3. При смыкании пресс-формы пресс-материал под воздействием теплоты и давления, развиваемого прессом, переходит в пластическое состояние и заполняет формующую полость 4. По окончании выдержки спрессованные изделия вынимают из пресс-форм. При компрессионном прессовании давление не остается постоянным. В начале прессования, когда материал переходит в пластифицированное состояние, заполняет формующую полость пресс-формы и начинает полимеризоваться, давление достигает максимума. К этому времени формующая полость заполняется полностью, но пластмасса еще не затвердела. При дальнейшей выдержке высокое давление сохранять не нужно. Выдержку проводят при незначительном давлении, чтобы обеспечить выход летучих веществ и воды, выделяемых пресс-материалом. Основными параметрами технологического режима прессования являются температура, удельное давление и продолжительность выдержки герметизируемых изделий под давлением в пресс-форме.

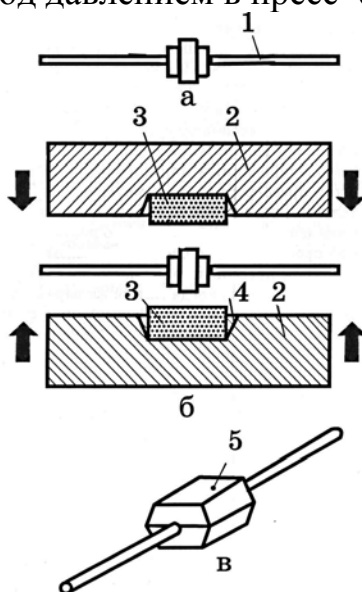


Рис. 13.7. Последовательность операций герметизации методом компрессионного прессования: а – арматура, б – размещение арматуры в пресс-форме, в – готовый прибор, 1 – арматура диода, 2 – пресс-форма, 3 – пресс-материал, 4 – формирующая полость пресс-формы

При литьевом прессовании (рис. 13.8) загрузочная камера пресс-формы отделена от формующей полости. Пресс-материал помещают в загрузочную камеру, где он подвергается воздействию теплоты и давления. Переходя в полужидкое состояние, пресс-материал по специальным каналам-литникам поступает в формующую полость пресс-формы, в рабочих гнездах которой заложена арматура полупроводниковых изделий, что обеспечивает полный

отмеривание дозы пресс–порошка и таблетирование и сушка. Эти операции направлены на ускорение технологического процесса, улучшение качества и внешнего вида пластмассовых корпусов. Указанные операции не являются общепринятыми для всех видов и марок пресс–материалов, а применяются при необходимости.

Так, при повышенном по сравнению с допустимым содержанием влаги и других летучих веществ в пресс–материалах производят сушку пресс–порошков при 80°С. При повышенных требованиях к пластмассовым корпусам приборов или микросхем пресс–порошки дополнительно просеивают через специальное сито.

При герметизации пластмассами способом литьевого прессования большое значение приобретает точная дозировка пресс–материала, загружаемого в загрузочную камеру. Такая дозировка обычно обеспечивается таблетированием пресс–материала, т. е. его механическим прессованием в твердые таблетки различной формы на специальных таблеточных машинах.

К преимуществам таблетирования порошкообразных материалов относят: уменьшение объема исходного материала, а следовательно, размеров загрузочных камер пресс–формы и упрощение их загрузки; сокращение потерь сырья; ускорение процесса предварительного подогрева и сокращение цикла прессования.

Подготовка пресс–форм для герметизации состоит из очистки и протирки рабочих поверхностей миткалем или бязью, смоченной в спирте; смазки их кремнийорганическими жидкостями во избежание прилипания материала; загрузки арматуры; предварительного прогрева пресс–формы при повышенных температурах (150–180°С).

Наиболее удобно герметизировать прессованием полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы, собранные на отрезках ленты или рамках, где имеются специальные технологические отверстия, которые совмещают с фиксирующими штырьками пресс–форм для точной посадки арматуры в формирующие полости. Загрузка арматуры для компенсации потери теплоты выполняется на рабочей плите пресса, нагретой до 180–200°С. После этого пресс–форму собирают и под прессом смыкают ее верхнюю и нижнюю части. Качество герметизации в большой степени зависит от конструкции пресс–форм, которые являются сложным и дорогостоящим инструментом. Устройство пресс–форм разнообразно и зависит от конструкции герметизируемого изделия, имеющегося оборудования и требуемой производительности. Пресс–формы, используемые для трансферного литья, по характеру эксплуатации могут быть съемными и стационарными; по количеству одновременно прессуемых изделий – одно– и многогнездными; по положению плоскости разъема – с одной или несколькими плоскостями разъема. Съемные пресс–формы в процессе прессования не закрепляются на плитах и снимаются с них для извлечения готового изделия и загрузки новой партии приборов. Стационарные пресс–формы закреплены на плитах пресса неподвижно, поэтому загрузка изделий и извлечение их после герметизации осуществляются без съема пресс–формы.

Оптимальные технологические режимы прессования выбирают в

результате предварительных расчетов и оценки качества готовых изделий (визуально, сравнением физико–химических показателей и полноты отверждения). Давление прессования определяют по формуле

$$P_{np} = P_{уд} S_{зк} / (\eta S_{пл}), \quad (13.14)$$

где $P_{уд}$ – удельное давление прессования (зависит от размеров и конфигурации корпуса, конструкции пресс–формы, партии пресс–материала, предварительного подогрева); $S_{зк}$ – площадь горизонтальной проекции загрузочной камеры; η – КПД гидравлического пресса; $S_{пл}$ – площадь поперечного сечения плунжера пресса.

Средняя скорость впрыскивания пластмассы определяется давлением прессования и сечением литников и оформляющих полостей пресс–формы. По мере увеличения давления прессования возрастает средняя скорость впрыскивания пластмассы, сокращается время заполнения пресс–формы, но одновременно возрастают динамические нагрузки, которые могут привести к нарушению целостности герметизируемой арматуры. Снижение скорости впрыскивания, а следовательно, и увеличение времени заполнения пресс–формы возможны лишь в определенных пределах, поскольку это связано с ограничением времени жизни пресс–порошка в жидком состоянии (для пресс–материалов ЭФП оно составляет 40–50 с.). Переход герметизирующего материала ЭФП из жидкого состояния в отвержденное длится 180–200 с. с момента засыпки порции порошка в загрузочную камеру. Исходя из этого и учитывая время разогрева порции пресс–порошка в загрузочной камере до подачи давления и рассчитывают время, необходимое для герметизации корпусов.

Герметизация приклеиванием крышки к основанию (рис. 13.9) – наиболее простой способ, не требующий применения сложного специализированного оборудования. При этом к клеевому составу предъявляются следующие требования: высокая адгезия к материалу корпуса; максимально близкое согласование в значениях коэффициента температурного расширения клея и материала корпуса; невысокая вязкость, обеспечивающая получение клевого шва толщиной 0,1–0,2 мм; умеренная температура отверждения (не выше 70–80°C). Наиболее полно удовлетворяют таким требованиям эпоксидные клеи и компаунды с минеральным наполнителем.

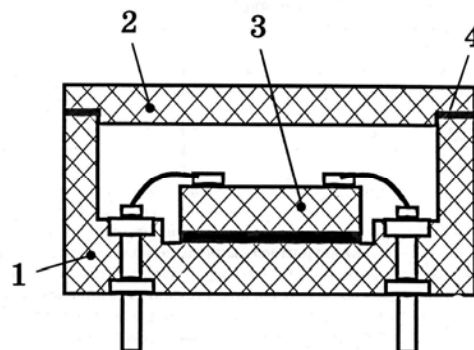


Рис. 13.9. Микросхема в полем пластмассовом корпусе –основание корпуса, 2– крышка, 3 – микросхема, 4– клеевой шов

Перед нанесением компаунда торцы боковых сторон основания и край крышки по периметру зачищают для получения шероховатой поверхности. После приклеивания крышки к основанию корпуса их плотно зажимают.

Основными видами брака при данном способе герметизации могут быть щели в клеевом соединении крышки и основания корпуса, перекося крышки относительно корпуса, значительные раковины, пузыри, посторонние включения в клеевом шве.

Способ герметизации свободной заливкой во вспомогательные съемные формы обычно применяют для приборов мелких серий со сложной арматурой. Сущность способа состоит в заполнении жидким компаундом специальных форм, в которых размещены блоки арматур полупроводниковых приборов или микросхем. В качестве заливочных компаундов используют чаще жидкие компаунды на основе эпоксидных смол. В зависимости от конструкции прибора или микросхемы применяют два способа заливки во вспомогательные формы.

13.4 Бескорпусная герметизация

Полупроводниковый кристалл в изделии должен быть изолирован от внешней среды защитным слоем. Обычно эту функцию выполняет корпус, он же выполняет роль носителя межкомпонентных соединений с внешней электрической цепью изделия. Стандартные корпуса приборов, несмотря на кажущееся богатство вариантов, предоставляют конструкторам довольно скудный выбор: регламентировано количество и расположение выводов, размер и форма корпуса. Кроме этого, многие производители корпусов поставляют их только после проведения дорогостоящей разработки и подготовки производства. Если кристалл содержит 190 выводов, а ряд стандартных корпусов состоит из вариантов с 188 и 244 выводами, то естественно придется монтировать кристалл в гораздо больший по габаритам и более дорогой корпус. При таком подходе страдают изготовители специальной и мелкосерийной продукции, разработчики новой техники. Корпуса с количеством выводов от 100 довольно дороги (стоимость металлокерамических корпусов с 256 выводами достигает 250 евро). Зачастую стоимость сложного специализированного кристалла меньше, чем стоимость корпуса для него. Вследствие особенностей расположения контактных площадок в стандартных корпусах разработчику кристалла, и особенно технологу сборочного производства, приходится проявлять чудеса изобретательности, чтобы провести сварку. Кристаллы специализированных ИМС, например, GPS-контроллер, производятся, как правило, в небольших количествах, а ассортимент корпусов для них еще меньше, чем для стандартных функциональных микросхем (к примеру, для RAM-памяти или логических преобразователей).

Технология COB предлагает гибкий, недорогой и универсальный путь, альтернативный применению корпусов. С некоторыми оговорками он может заменить корпусные изделия. Печатную плату с заданным количеством выводов можно неоднократно модифицировать, изменяя топологию. Применение COB

позволяет разработчикам на этапе проектирования и отработки конструкции выпускать функционально–годные изделия серий от 10 штук, не затрачивая при этом больших средств на производство заказных корпусов.

После сварки кристалл и зона сварки заливаются компаундом, который надежно герметизирует чувствительную к внешней среде часть изделия. Применяются силиконовые составы, сохнувшие при комнатной температуре; эпоксидные составы, требующие отверждения при температурах от 60 °С, и полимеры ультрафиолетового и инфракрасного отверждения. Заливка непрозрачным компаундом кристалла, помимо утилитарной, имеет еще одну функцию: она затрудняет идентификацию, разборку изделия и копирование примененных в нем технических решений, в то время как корпус позволяет легко получить доступ к топологии микросхемы или специализированного ASIC–кристалла. Дополнительным преимуществом COB монтажа является возможность «спрятать» или разместить на той же плате, что и кристалл, пассивные и вспомогательные компоненты практически без ограничений. Таким образом, технология COB, помимо миниатюризации изделия, снижения его массогабаритных показателей, уменьшает время и стоимость разработки нового изделия, сохраняя сравнительно высокий уровень безопасности интеллектуальной собственности.

Для герметизации кристаллов на печатной плате компаундом применяют установку УГ–1, которая обеспечивает температуру подогрева платы и компаунда 40–150°С, время герметизации 5 с, программируемую траекторию нанесения слоя компаунда толщиной 0,4 мм.

13.5 Контроль герметичности изделий

Для контроля герметичности корпусов применяется целый ряд методов: насыщения гелием, вакуумный, вакуумно–жидкостной, люминесцентный и радиоактивный. Выбор метода контроля герметичности определяется уровнем требований к степени герметичности испытуемых объектов, направлением и величиной газовой нагрузки на оболочку, пробными веществами, допустимыми к применению.

Масс–спектрометрический метод основан на разделении сложной смеси газов или паров по массам с помощью электрических и магнитных полей. Изделия наполняются гелием двумя способами: герметизацией корпусов приборов и микросхем в атмосфере гелия; насыщением загерметизированных приборов и микросхем в атмосфере гелия.

Насыщение гелием применяют для тех ИМС, корпуса которых не подвергались окраске или лакировке, так как после окраски или лакировки, микроотверстия в корпусах могут быть закрыты для доступа гелия краской или лаками. Негерметичные ИМС, не отбракованные на этапе технологического процесса, могут выйти из строя при эксплуатации.

Для насыщения гелием ИМС загружают в камеру, которую герметично закрывают, затем откачивают из камеры воздух до давления 14–7 Па. После откачки камеру наполняют гелием и выдерживают в ней ИМС при давлении $(3–5)10^5$ Па. Время выдержки ИМС в камере устанавливается по

технологической документации в зависимости от типов корпусов (размера внутреннего объема) : обычно от 3–48 ч до 3 сут. За этот период в корпуса ИМС, имеющих течи, попадает гелий, который остается в них некоторое время. После завершения цикла насыщения давление в камере понижают до нормального и ИМС переносят в измерительную камеру для контроля герметичности.

Скорость утечки гелия измеряют не позднее чем через 1,5 ч после извлечения из камеры насыщения с помощью индикаторов течи. Степень герметичности прибора определяется величиной истечения газа из определенного объема V за известный промежуток времени t :

$$\delta = VP / t , \quad (13.15)$$

где δ – истечение газа, $\text{м}^3\text{Па/с}$, P – давление газа в блоке.

Допустимая степень негерметичности оговаривается в технологической и контрольной документациях. Для пластмассовых корпусов степень герметичности составляет $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3\text{Па/с}$. Масс–спектрометрическим методом могут быть не отбракованы ИМС с большими течами, если введенный гелий выйдет раньше, чем они будут подвергнуты контролю, т. е. в корпусах не окажется пробного газа.

Сущность вакуумно–жидкостного метода состоит в том, что в испытуемом объеме создается давление газа, затем изделие погружается в жидкость. Образование пузырьков свидетельствует об истечении газа и местонахождении течи. По скорости образования и размерам пузырьков можно судить о величине отверстия в корпусе.

Испытуемые изделия выдерживают в течение 1–5 мин при давлении 10–15 Па, затем помещают в стеклянный сосуд с керосином или уайт–спиритом, который до погружения изделий вакуумируют. Если корпус контролируемого изделия негерметичен, то из–за разности давлений внутри изделия и вне его воздух, находящийся в нем, начнет выходить в керосин или уайт–спирит в виде непрерывной струйки пузырьков. Чувствительность этого метода контроля примерно $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3\text{Па/с}$

Метод погружения изделий в нагретую жидкость основан на обнаружении истечения газа из негерметичных приборов, наблюдаемого визуально. ИМС погружают в ванну с нагретым силиконовым маслом ВКЖ–94А или этиленгликолем так, чтобы верхняя часть корпуса была не менее чем на 50 мм под поверхностью жидкости. Изделие опускают в ванну по одному или группами, но так, чтобы были отчетливо видны одиночные пузырьки, выделяющиеся из отдельных негерметичных корпусов. Температура нагретой жидкости устанавливается по технологической документации в зависимости от типов и конструкций ИМС. Чем выше температура, тем больше давление внутри корпуса, а следовательно, выше достоверность испытаний. Обычно температуру нагретой жидкости выбирают от 70 до 150 °С. Методом нагретой жидкости обнаруживают скорости истечения $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3\text{Па/с}$ и более.

Для проверки герметичности корпусов блоков часто применяется более эффективный масс–спектроскопический метод отыскания течей в

герметичных объемах, имеющий наиболее высокую чувствительность $6 \cdot 10^{-15}$ м³Па/с и позволяющий автоматизировать процесс контроля.

Широкое распространение для этих целей получили гелиевые течеискатели типа ПТИ–7. Испытания на герметичность и наполнение нейтральным газом через штуцер (который запаивается или заваривается после операции заполнения газом) проводятся на специальной установке.

Испытуемый прибор, заполненный гелием, помещается в вакуумную камеру, которая откачивается до давления 10^{-3} – 10^{-4} Па, после прекращения откачки камера подключается к масс–спектрометру типа ПМ–7 и фиксируется наличие молекул гелия, вытекающего из герметизированного прибора.

Для случая молекулярного истечения газа величина течи определяется по формуле

$$B = \varepsilon \cdot U \cdot \sqrt{\frac{M}{M_{\%}}} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{m_{B. \square}}{m_2 - m_1}, \quad (13.16)$$

где ε – чувствительность схемы измерения, (лПа)/(с·мВ); U – показания милливольтметра масс–спектрометра, мВ; фиксируется превышение отсчета прибора над фоном, который определяется заранее для каждого измерения; M и $M_{\%}$ – молекулярная относительная масса наполняющего прибора газа (гелия) и воздуха (соответственно 4 и 29); γ – концентрация газа в приборе; P_1 – давление в откачиваемой камере (может быть принято равным 0); P_2 – давление газа в приборе; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление.

Для гелия формула (13.16) трансформируется в вид

$$B = \frac{282 \cdot \varepsilon \cdot U}{\gamma \cdot P_2}. \quad (13.17)$$

Обычно проверка на герметичность корпусов ИМС проводится дважды – при испытаниях корпуса и перед заполнением нейтральным газом корпуса с установленными и смонтированными ячейками и присоединительной крышкой. Заполнение газом корпуса проводится через специальный штуцер в корпусе (медная трубка диаметром 0,5–5 мм); после завершения операции наполнения газом проводится диффузионная сварка (или пайка) штуцера корпуса. Для металлостеклянных корпусов, герметизированных сваркой или пайкой, степень герметичности составляет $6,7 \cdot 10^{-9}$ м³Па/с, что обеспечивает поддержание избыточного давления внутри блока в течение 8 лет.

13.6 Основные причины снижения влагоустойчивости приборов

Повышение влагоустойчивости полупроводниковых приборов и ИМС в пластмассовых корпусах является актуальной задачей, т.к. причинами отказов микросхем являются растрескивание корпусов в процессе пайки и коррозия алюминиевых проводников и контактных площадок на поверхности кристалла. Негерметичный пластмассовый корпус – серьезная проблема защиты сложных электронных компонентов. Пластмассовые корпуса,

предназначенные для поверхностного монтажа, могут расслаиваться или растрескиваться в процессе пайки оплавлением. Эффект растрескивания корпусов обусловлен влагой, поглощенной при формировании пластмассового корпуса. Поглощенная влага имеет тенденцию собираться под кристаллом, прикрепленным к основанию, и превращаться в пар, при нагреве корпуса до температур от 218 до 230°C, которая является типичной температурой для процесса пайки оплавлением. Образующийся пар создает давление на границе кристалл – компаунд и вызывает расслаивание и растрескивание корпусов (рис. 13.10).

Существует два пути проникновения влаги и ее адсорбции не на поверхность кристаллов микросхем, защищенных эпоксидными компаундами. Первый – через поверхность раздела между компаундом и выводами; второй – диффузией влаги через материал корпуса. Все пластмассы в какой-то степени адсорбируют влагу, однако количественно влагоустойчивость зависит от структуры защитного покрытия и условий отверждения. Компаунды, содержащие в своем составе полярные гидрофильные группы, адсорбируют влагу значительно больше, чем неполярные смолы.

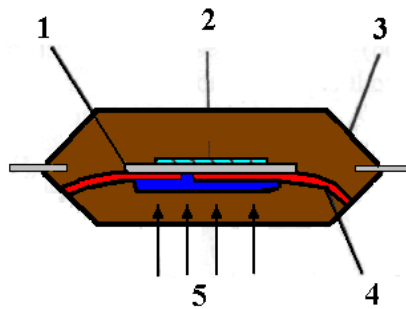


Рис. 13.10. Образование трещин на границе рамка – компаунд: 1– теплопроводящая рамка, 2– кристалл, 3– компаунд 4– трещина, 5– проникновение влаги

При определении времени влагозащиты следует рассматривать явление сорбции влаги герметизирующим материалом, т.е. постепенное повышение концентрации влаги на поверхности герметизируемого изделия и кК. Расчет обычно сводится к определению времени, в течение которого на внутренней стороне герметизирующей оболочки образуется критическая концентрация влаги, соответствующая критическому давлению паров воды. Поэтому время наступления такого состояния будет определяться толщиной оболочки, а также скоростью процесса сорбции, т. е. коэффициентом диффузии влаги в полимер. Время влагозащиты монолитных полимерных корпусов можно

определить из выражения:

$$t = \frac{0,8h^2}{\pi^2 D} \ln\left(1 - \frac{P_{кр}}{P_0}\right), \quad (13.18)$$

где D – коэффициент диффузии влаги, h – толщина пластмассы, $P_{кр}$ – критическое давление паров воды, P_0 – давление насыщения паров воды.

Температурная зависимость коэффициента диффузии D определяется выражением:

$$D = D_0 \exp(-\Delta E_D / kT) \quad (13.19)$$

где $D_0 = 1,19 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, ΔE_D – энергия активации (0,35эВ), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

В результате адсорбции влаги и ее диффузии через герметизирующую оболочку, со временем увеличивается количество адсорбированной влаги на изделиях внутри корпуса вплоть до некоторого значения, являющегося для данного корпуса критическим. Однако при образовании адгезионных связей герметизирующего материала с поверхностью теплоотвода, энергия которых превышает энергию адсорбции влаги этой поверхностью, действительное время влагозащиты превысит значение, определенное из выражения (13.18):

$$t = t_{\text{диф}} + t_{\text{адг}} \quad (13.20)$$

где $t_{\text{диф}}$ – время влагозащиты, обусловленное временем диффузии влаги через герметизирующий слой полимера; $t_{\text{адг}}$ – время влагозащиты, обусловленное наличием адгезионных связей полимера с поверхностью кристаллодержателя.

Применение эффективной дополнительной защиты кристалла (нанесение защитного компаунда) позволяет увеличить время влагозащиты за счет составляющей $t_{\text{диф}}$, которая включает:

$$t_{\text{диф}} = t_{\text{диф1}} + t_{\text{диф2}}, \quad (13.21)$$

где $t_{\text{диф1}}$ – время влагозащиты, обусловленное временем диффузии влаги через герметизирующий слой полимерного корпуса; $t_{\text{диф2}}$ – время влагозащиты, обусловленное временем диффузии влаги через герметизирующий слой компаунда на кристалле.

Однако не всякий компаунд обладает эффективной защитой от проникновения влаги. В результате проникновения влаги и растворенных в ней ионных загрязнений, которые, попадая на поверхность кристалла, образуют агрессивный электролит, возникает коррозия проводников и контактных площадок на поверхности кристалла. Мобильные ионы Na^+ , K^+ , Li^+ , NH_4^+ , и особенно Cl^- , вызывают разрушение проволочного монтажа и металлических слоев микросхем. Внешний вид таких дефектов микросварного соединения при разварке алюминиевой проволокой на кристаллодержатель показан на рис.13.11.

Современная технология получения герметизирующих материалов позволяет свести к минимуму количество ионов Cl и других примесей. Так прессматериалы различных фирм – изготовителей содержат в своем составе ионогенных примесей от $5 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-6}$ % (табл. 13.3).

Проникновение мобильных ионов внутрь корпуса может происходить в процессе изготовления ИМС на операциях очистки, металлизации, маркировки, пайки и др.

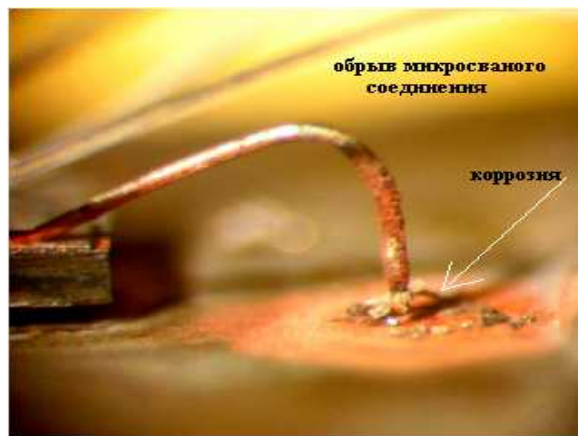


Рис. 13.11. Внешний вид дефектов микросварного соединения

Для изделий в пластмассовых корпусах попадание ионов хлора наиболее вероятно на таких операциях, предшествующих гальваническому осаждению сплава олово–висмут на внешние выводы и теплоотвод, как: обезжиривание деталей в растворе $\text{CaCO}_3 + \text{NaOH} + \text{Na}_3\text{PO}_4$ + стекло натриевое при температуре $60\text{--}80^\circ\text{C}$ в течение 10–15 мин с плотностью тока на катоде $0,5\text{--}1,0 \text{ А/дм}^2$, травление в растворе $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HCl}=1:1:0,2$, в течение 3–5 с и декапировании в растворе $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=2:1$ в течение 60–180 с.

Таблица 13.3. Содержание ионных примесей в прессматериалах

Содержание ионов	Типы прессматериалов			
	МЭП–5Т (Россия)	MG–40FR (Германия)	ЕМЕ–1200т (Япония)	ST7100–DSA (Корея)
$\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-$, вес. %	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Эффективность защиты от воздействия агрессивных сред оценивали на приборах до формирования полимерного корпуса. Приборы, собранные с различными защитными покрытиями типа ЭП – 91, КО – 97, ЛД, КЭН – 3, АД – 9103 и ККП – 2 подвергались воздействию агрессивных сред, предусмотренных технологическим процессом. Прямое воздействие агрессивных сред на полимерные защитные покрытия ЭП – 91, КО – 97, ЛД, КЭН – 3, АД – 9103 приводит к деструкции и разрушению, снижению адгезии как к металлическому кристаллодержателю, так и к кремниевому кристаллу. В свою очередь это приводит к попаданию влаги на кристалл и растравливанию алюминиевого слоя на кристалле.

Для получения влагостойких полимерных корпусов важное значение имеет технология их формования, в частности, подготовка и очистка поверхности прессформы перед процессом герметизации. Плохо подготовленная и неочищенная поверхность прессформы может приводить к снижению качества формования и ухудшению герметичности корпуса. Поэтому непременным условием является процедура хорошей периодической очистки прессформ, частота которой зависит от конструкции прессформы, параметров прессования, используемого прессматериала. При этом необходимо учитывать, что остатки компонентов самого очистителя в

гнездах прессформы могут внедряться в состав полимерного корпуса в процессе последующей герметизации, ухудшая качество приборов. Для повышения эффективности отделения корпуса от зеркала прессформы без остатков прессматериала в конструкции прессформы предусмотрено двухслойное хромовое покрытие, а угол боковых стенок литниковой системы выбран в пределах 9–10°.

Для оценки состояния влагоустойчивости корпуса ТО–220, изготовленного с использованием прессматериалов разных производителей, проводилась выдержка приборов при избыточном давлении 0,5МПа в спиртовом растворе, содержащем краситель для визуализации пути проникновения влаги. После вскрытия корпусов установлено, что основная масса затекшего родамина попадает в корпус со стороны кристаллодержателя, где отсутствует замок. Внешний вид кристаллодержателей с затеканием родамина показан на рис. 13.12.

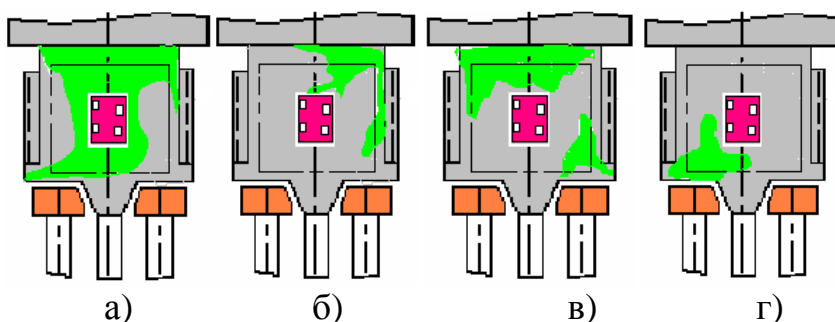


Рис. 13.12. Пути затекания родамина в корпуса, герметизированные прессматериалами: MG–40FR (а), Lemocom–300 (б), ST–7100 Starcom (в), брак (г).

Пути проникновения влаги одинаковые для корпусов, изготовленных с использованием различных прессматериалов. Это указывает на то, проникновение влаги происходит по границе «полимер – выводная рамка» и во многом определяется адгезионной составляющей $t_{адг}$, обусловленной наличием адгезионных связей полимера с поверхностью выводной рамки, а также конструкцией рамки. Установлены основные пути затекания влаги в полимерный корпус в процессе испытаний в автоклаве (рис. 13.13): со стороны отверстия в теплоотводе (А), с верхней части боковых сторон кристаллодержателя выше «замка» (В), с нижней части боковых сторон кристаллодержателя ниже «замка» (С), с нижней части кристаллодержателя» (D). В тоже время со стороны выводов затекание родамина не выявлено.

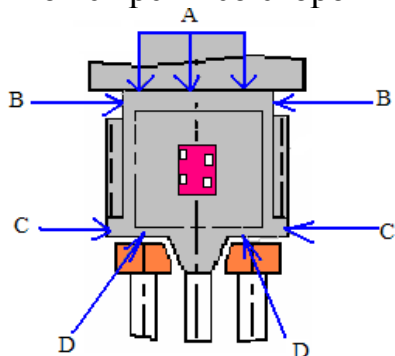


Рис. 13.13. Пути проникновения влаги в корпус при испытаниях в автоклаве

Таким образом, для повышения влагоустойчивости улучшают адгезионную прочность сцепления прессматериала и кристаллодержателя, что достигается доработкой конструкции выводной рамки за счет введения замков герметичности по периметру кристаллодержателя, а также выбором оптимальных режимов герметизации и окончательного отверждения полимерного корпуса.

Для оценки влагоустойчивости ИМС в пластмассовом корпусе целесообразно использовать ускоренные методы испытаний с повышением температуры и влажности среды с приложенным внешним напряжением (НАСТ) и без напряжения (РСТ). Пластмассовый корпус не может полностью изолировать активную структуру ИМС от воздействия влаги. При этом резко ускоряются процессы, приводящие к отказам ИМС. Поэтому наиболее распространённым является метод испытаний под давлением пара (pressure cookertest – РСТ) в автоклаве. Испытание в автоклаве проводится в режиме хранения в перегретом паре при температуре +121°С, давлении 0,2 МПа и относительной влажности 100%. Такие испытания проводили в течение 240 ч. При этом перегретый пар быстро проникает по дефектам пластмассового корпуса и инициирует процессы гальванической коррозии. При испытаниях в автоклаве коэффициент ускорения определяли из выражения:

$$K_v = \frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_\phi} \right), \quad (13.22)$$

где E_a – энергия активации механизмов отказов, эВ; K – постоянная Больцмана, T_0 , T_ϕ – температура изделия соответственно начальная и в режиме испытаний, К.

При приложении в этих условиях к ИМС электрической нагрузки (НАСТ – highly accelerated stress test) реализуются испытания с большим ускорением. Они проводятся не только при температуре 121°С, но и при более высоких температурах вплоть до 155°С в условиях ненасыщенного пара (80–85% относительной влажности). При этом коэффициенты ускорения для ИМС в пластмассовых корпусах достигают 700–3500.

Глава 14. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

14.1. Качество и надежность приборов электронной техники

Под качеством изделий понимается совокупность свойств изделия, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенным требованиям в соответствии с назначением. Для изготовителя ИЭТ это понятие связано с соответствием выпускаемых изделий требованиям документации по электрическим параметрам и внешнему виду, принятием

техническим контролем партии изделий с первого или второго предъявления, отсутствием или величиной претензий потребителей к данному типу изделий по результатам входного контроля или результатам использования в электронных блоках РЭА (рис.14.1).

Понятие о качестве составляется из точек зрения предприятия–изготовителя и потребителя на основании понятий, бытующих в общественном мнении, представлений о перспективах развития и использования изделий. Оно может содержать и истинные, и ложные, и эмоциональные, и рациональные составляющие. Оценка качества определенного изделия связывает это понятие с некоторыми принципиальными и индивидуальными характеристиками изделия. Качество может быть признано вполне соответствующим назначению изделия, приемлемым или неприемлемым, f изделия надежными для использования в предназначенных целях, либо недостаточно надежными, либо ненадежными.

С позиций общественного мнения качество – это обеспечение потребностей, пожеланий потребителей. Изделие лучшего качества должно лучше удовлетворять потребности потребителей, больше нравиться им, несколько превосходить пожелания потребителей. "Высшее качество", "качество на повышенном уровне" – это показатели такого качества, нередко не столько оцениваемые количественными критериями, сколько эмоциональными, неколичественными.

С другой стороны, предприятиями–изготовителями изделий под качеством часто понимается точное следование техническому заданию. Если изделием выполняются в полной мере все требования технического задания, значит конструктор качественно разработал изделие, оно полностью удовлетворяет требованиям по качеству. Если во время производства приходится выполнять много коррекций электрической схемы, конструкции, значит изделие разработано некачественно.

При производстве хорошо разработанное изделие может быть некачественно, некорректно изготовлено, либо изготовлено из некачественных материалов, некачественным инструментом. Некачественное изделие может быть обнаружено производственной системой контроля качества, либо не обнаружено или обнаружено, но пропущено ею.

Как видим, понятие качество в достаточной степени неопределенно, оно может рассматриваться с разных позиций, с учетом различных перспектив. С некоторых точек зрения качество всегда будет недостаточным, всегда могут быть сделаны замечания о необходимости совершенствования качества. Если качество не определено четкими, точными критериями, если оно определяется эмоциональным восприятием человеком отдельных характеристик изделий, то оценка качества всегда будет приближенной. Критерии качества должны определяться количественно. Они должны исходить из предельных, но реальных возможностей производства, исходных материалов, конструкций. Только при таких критериях возможно сопоставление качества и установление перспектив его повышения.

В производстве и при проведении работ по повышению качества пластин с кристаллами ИМС могут рассматриваться различные показатели качества: количество годных кристаллов на пластине по результатам

контроля их на функционирование и по электрическим статическим параметрам, распределение по пластине (медиана, размах, среднее арифметическое и др.) статического параметра, по которому идет значительная доля бракованных кристаллов, и ряд других показателей. В то же время совокупность контролируемых параметров, значения которых измеряются на кристаллах пластины после технологических операций, по-разному связаны с вариациями каждого из показателей качества.



Рис.14.1 Основные показатели, определяющие качество изделий электронной техники

Требования к качеству ИМС постоянно повышаются в связи с непрерывным ростом их степени интеграции и функциональной сложности, а также с расширением их производства. На этапе разработки качество конструкции ИМС определяется ее технологичностью. Показатели качества по технологичности обычно связывают с процентом выхода годных ИМС. Основную сложность при этом составляет то, что процент выхода годных изделий является интегральной характеристикой качества, определяющей этапы и разработки, и производства. Применяя процент выхода годных изделий непосредственно для оценки технологичности конструкции, можно существенно ошибиться, так как на его величину непосредственно влияет множество факторов, связанных с производством.

В рамках работ по повышению качества большинство изготовителей изделий интегральной электроники (ИИЭ) во всем мире с начала 1982 года для измерения уровня качества продукции стали использовать такой показатель качества как количество дефектных изделий на 1 млн., оцениваемых статистически из всего количества изготавливаемых изделий данного типа.

При оценке изделий используются понятия, характеризующие запасы по тому или иному электрическому параметру по отношению к нормам технических условий. Запасы по параметрам определяются конструктивными данными и особенностями технологии производства, поэтому используют понятие конструктивно–технологического запаса .

Оценивать запасы по электрическим параметрам в виде размерных величин неудобно, так как в этом случае сравнение запасов по различным параметрам становится весьма затруднительным. Поэтому конструктивно–технологический запас K определяют как безразмерную величину. При отсутствии информации о законе распределения параметров предельные значения X_n , X_b (нижнее и верхнее значения норм параметров) можно определять экспериментально на основе большой выборки. Выражения для коэффициента запаса для верхнего и нижнего значений норм будут иметь вид:

$$K_b = \frac{X_{e,ТУ} - X_e}{X_e - X} \cdot 100 \%, \quad (14.1)$$

$$K_n = \frac{X_n - X_{n,ТУ}}{X - X_n} \cdot 100 \%, \quad (14.2)$$

здесь $X_{n,ТУ}$ и $X_{b,ТУ}$ – нижнее и верхнее значения норм, оговоренных в технических условиях, x – среднее значение параметра в выборке.

Очевидно, что величина абсолютного значения производственного запаса по параметрам ($X_{b,ТУ} - X_b$) или ($X_n - X_{n,ТУ}$) должна быть не менее одной наибольшей погрешности измерений (контроля). При выполнении этого условия поставляемые ИМС, даже при наличии вышеупомянутых погрешностей контроля, будут иметь значения параметров не хуже норм, установленных в технических условиях. Если производственный запас будет меньше погрешности измерений, то в этом случае могут браковаться даже ИМС, имеющие параметры, соответствующие требованиям технических условий.

Требования к качеству могут быть выполнены, перевыполнены, либо невыполнены. Невыполнение требований к качеству ведет к потерям, к понижению удовлетворенности потребителей продукции, оно должно быть предупреждено, его нельзя допускать. Вместе с тем, если перевыполнение требований по качеству ведет к избыточным затратам в производстве, его также не следует допускать, во всяком случае в тех случаях, когда это ведет к избыточным потерям. Данные о качестве являются важнейшим исходным материалом для конструкторов и технологов. Анализируя эти данные, они могут совершенствовать конструкцию, технологический процесс, и повышать качество изделий.

Надежность – это свойство изделия сохранять свою работоспособность в установленных нормах на параметры в зависимости от условий и длительности применения. Если практически качество ИИЭ оценивается данными по входному и выходному контролю на соответствие их требованиям технических условий (ТУ) по электрическим параметрам и внешнему виду, то надежность ИИЭ связана с временным сохранением своих параметров в условиях эксплуатации, включая и длительное хранение.

Используя указанные определения качества и надежности, можно измерять качество и надежность ИМС отдельно и независимо. Одно измерение – качество характеризует эффективность производственного процесса, другое – надежность является характеристикой свойств ИМС во

времени при эксплуатации. Можно принимать, что оба эти свойства зависимы, то есть качество определяет надежность или надежность является следствием качества, но оба эти свойства, их оценки независимы.

Отказы ИИЭ могут быть катастрофическими (чаще всего это случайные отказы) и постепенными, связанными с деградацией параметров при внешнем воздействии, поэтому они иногда называются деградационными. Статистический материал по эксплуатации полупроводниковых приборов показывает, что доля катастрофических отказов в общем числе отказов достаточно велика. Под внезапным, или катастрофическим, отказом понимается отказ, возникающий в результате скачкообразного или постепенного изменения одного или нескольких значений основных параметров и выхода их за нормы ТУ. Надежность изделия, т.е. вероятность безотказной работы, можно рассматривать как сочетание двух видов надежности: надежности, определяемой катастрофическими отказами $P(\lambda)$, и надежности, определяемой постепенным ухудшением его рабочих характеристик со временем $P(t)$:

$$P=P(\lambda) \cdot P(t) \quad (14.3)$$

14.2 Конструктивно–технологические особенности ИИЭ, влияющие на их надежность

Современные технологические процессы изготовления ИМС очень сложны. Анализ процессов показывает, что они проводятся при температурах, изменяющихся в диапазоне от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (криогенное травление) до $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (окисление, диффузия, отжиг после ионной имплантации и др.), при давлении от атмосферного до 10^5 Па. Столь широкие диапазоны вызваны необходимостью проведения с исходными материалами различных физических и химических процессов, необходимостью обеспечения удовлетворяемых технических характеристик ИМС.

Повышенные требования к надежности современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) переносятся на изделия электронной техники и в первую очередь на ИМС. Эти требования делают необходимой работу по обеспечению надежности ИМС с начала разработки – выбора исходных материалов, структуры, конструкции, принципов построения производственного процесса. Работы по обеспечению надежности продолжаются и на стадиях изготовления, вплоть до финишного контроля, испытаний и статистического анализа результатов эксплуатации.

Конструкция полупроводниковых ИИЭ и использование групповых методов обработки определяют необходимость особого подхода к проектированию процессов их изготовления. Основные особенности такого подхода следующие:

– неразрывность конструкции изделия и технологического процесса (ТП) его изготовления, то есть необходимость учета конструктивно–технологических особенностей при изготовлении изделия;

– максимальное использование взаимной корреляции параметров элементов интегральной электроники (на пластине, в партии пластин, в группе партий);

– учет взаимосвязи между производственным браком (технологические потери) и отказами при эксплуатации, обусловленной единой природой дефектов, определяющих качество и надежность изделий.

Для учета конструктивно–технологических особенностей изделий необходимо решить следующие задачи:

– определить допуски на параметры физической структуры изделий, в том числе на геометрические размеры элементов;

– оптимизировать минимальные размеры элементов и максимальные размеры изделия по показателям эффективности производственного процесса;

– оптимизировать параметры режимы технологических операций и технологического процесса в целом;

– определить влияние на параметры, характеризующие надежность изделия, эксплуатационных факторов и нагрузки;

– обеспечить возможности управления отдельными операциями ТП и процессам в целом.

Высокая надежность ИИЭ обеспечивается не только правильным выбором хорошо отработанной конструкции, но и правильно организованным технологическим процессом (маршрутом). Под технологическим маршрутом производства ИМС понимается последовательность технологических и контрольных операций над исходной входной структурой (например, кремниевой пластиной), приводящая к созданию требуемой выходной структуры ИМС, обладающей рабочими (эксплуатационными) характеристиками, лежащими в заданных диапазонах.

В процессе обработки структуры на параметры каждой технологической операции (операционные параметры g_k), а также на входные r_j , выходные b_i и параметры структуры накладываются технологические ограничения или допуски

$$G_{1k} \geq g_k \geq G_{2k} \quad (k=1, \dots, t), \quad (14.4)$$

$$R_{1j} \geq r_j \geq R_{2j} \quad (j=1, \dots, m), \quad (14.5)$$

$$B_{1i} \geq b_i \geq B_{2i} \quad (i=1, \dots, n), \quad (14.6)$$

определяющие вероятность попадания (P) рабочих характеристик части микросхемы на кристалле (или всего кристалла) в заданные диапазоны или общий процент выхода годных кристаллов $\eta_{кр}$. Допуски на входные и выходные параметры структуры до и после каждой технологической операции определяются на контрольных операциях.

Кроме того, для полной реализации принципа соответствия фактических параметров требуемым допуски должны быть установлены на основные параметры используемых в процессе изготовления кристаллов материалов, реагентов, энергоносителей, производственных сред и помещений. Отсутствие технологических допусков даже на малую группу параметров

делает технологический процесс производства ИМС неконтролируемым и сильно зависимым от субъективных (опыта и добросовестности технологов и операторов) и случайных (погода, источников сырья и т.д.) факторов.

Основные операции технологических процессов производства ИМС осуществляются на основе групповой технологии, когда одновременно обрабатываются элементы на пластине, на нескольких пластинах, объединенных в партию, или на пластинах нескольких партий.

Для групповых операций обобщающим показателем качества их проведения является распределение значений электрических параметров или оценки по внешнему виду у всех одновременно обрабатываемых элементов на пластинах в партии. Изменения в состоянии операции будут отражаться на свойствах этого распределения, и, в частности, на значениях его числовых характеристик, таких как математическое ожидание X и среднеквадратическое отклонение или рассеяние σ . Таким образом, параметры X и σ у разных партий могут различаться, отражая изменения качества проведения исследуемой операции.

Этими же параметрами можно охарактеризовать и прохождение партий после отдельных операций, выполняемых индивидуально для каждого изделия (например, приварка внутренних выводов, герметизация, классификация).

Производственный процесс имеет следствием изготовление партий изделий, характеристики которых подчиняются нормальному распределению, определяемому значениями X и σ (рис.14.2).

Пространство приемлемого качества (не обязательно равное диапазону, лежащему в пределах, оговоренных техническими условиями ТУ, но, возможно, более узкое, чем этот диапазон), представляет собой диапазон распределения, лежащий в рамках выборки, используемой для оценки надежности. Например, при анализе толщины кремниевых пластин в партии из 1000 штук было обнаружено следующее распределение толщин в диапазоне задаваемых параметров: от 0,587 до 0,613 мм – 100%, от 0,591 до 0,609 мм – 99,8%, от 0,594 до 0,606 мм – 95% и от 0,597 до 0,603 мм – 50%, при среднем размере 0,600 мм.

Ширина и положение кривой распределения относительно нулевого значения оценивается специальными величинами: положение средней величины распределения относительно нуля, математическое ожидание, характеристика отклонения распределения от математического ожидания, то есть характеристика рассеяния или стандартное отклонение, или сигма. Для нормального распределения (его еще называют распределением Гаусса) величины рассеяния нормированы (рис.14.2), $\pm \sigma$ укладывается в область, в которой размещается 68% всех величин и $\pm 2\sigma$ – 95% всех величин и $\pm 3\sigma$ – 99,73% всех величин, рассеянных по закону нормального распределения.

Связь характеристик распределения с характеристиками процессов устанавливается при помощи коэффициентов возможностей производства C_p и C_{pk} . Величина C_p характеризует отношение величины допуска или величины рассеяния, допускаемого в производственном процессе к 6σ , то есть к диапазону $\pm 3\sigma$, к диапазону, в который при нормальном распределении укладывается 99,73% всех величин.

Индекс воспроизводимости процесса C_p , связывающий вариации характеристик изделий и производственных процессов, обычно определяется формулой:

$$C_p = \frac{X_e - X_n}{6\sigma}, \quad (14.7)$$

где X_e, X_n – верхнее и нижнее допустимые значения соответствующего параметра.

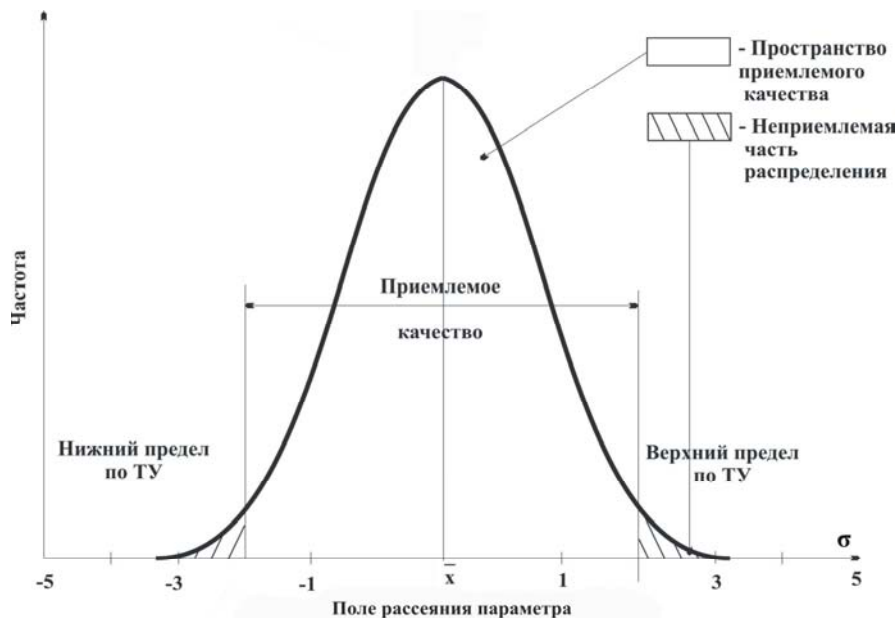


Рис.14.2 Распределение типа Гаусса, характеризующее производственный процесс

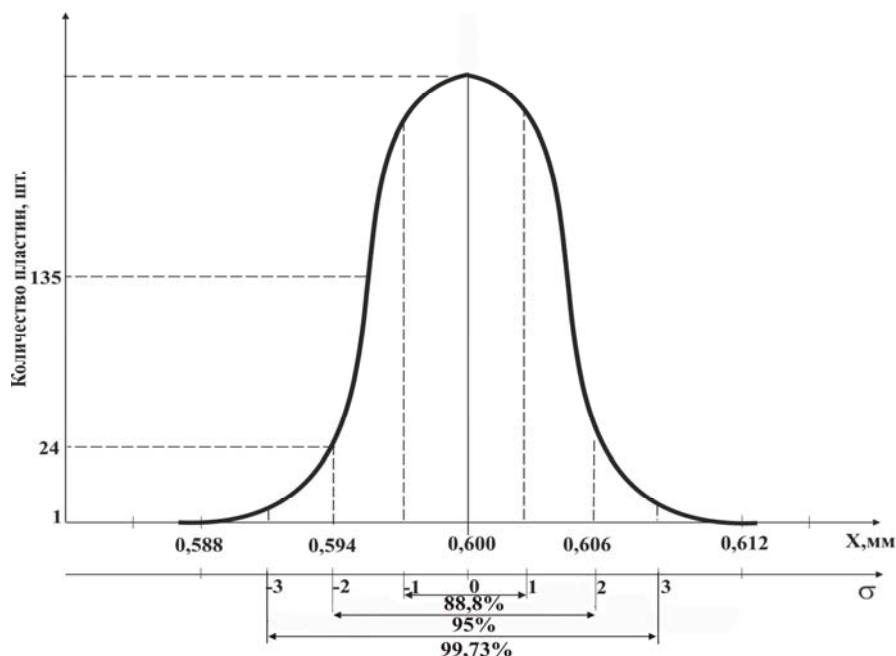
Принято, что процесс оценивается с помощью C_p следующим образом:

- а) $C_p \geq 1,33$ – процесс вполне удовлетворителен;
- б) $1,33 > C_p \geq 1,00$ – процесс адекватен;
- в) $C_p < 1,00$ – процесс неадекватен.

Коэффициент возможностей производства C_{pk} связан с величиной C_p соотношением:

$$C_{pk} = C_p \left(1 - \frac{2|\bar{X} - X_{ТУ}|}{\Delta}\right), \quad (14.8)$$

где $\bar{X}, X_{ТУ}$ – среднее и предельное значение параметра;



Δ – величина

допуска.

Рис.14.3 Распределение пластин по толщине

Для процессов, в которых математическое ожидание значения контролируемой величины X смещено относительно середины поля допуска, за коэффициент возможностей производства C_{pk} принимается:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{\bar{X} - X_H}{3\sigma}; \frac{X_B - \bar{X}}{3\sigma} \right\}. \quad (14.9)$$

Этот коэффициент учитывает точность настройки и стабильность процесса.

Максимальное значение величины C_{pk} равно величине C_p , так как оно будет максимальным, если среднее значение будет равно назначенному, то есть отклонение будет равно нулю, а значит и дробь будет равна нулю.

В тех случаях, когда выбранный по условиям допустимого процента брака, допуск будет больше, чем плюс–минус три сигмы, соответственно будет увеличиваться и критерий C_{pk} . Соотношение между уровнем допуска в величинах сигма, величин C_{pk} и количеством бракованных изделий на миллион составляет (табл.14.1):

Таблица 14.1

Допуск в сигма	Величина C_{pk}	Число бракованных на миллион
± 3	1,00	1350
± 4	1,33	32
± 5	1,67	0,3
± 6	2,00	0,001

Увеличение C_{pk} резко повышает качество изделий.

На практике понятие качество разработчики и производители ИМС в значительной мере отождествляют с показателями технологичности и

процента выхода годных изделий. Логика при этом проста: хорошая технология есть хороший процент выхода годных изделий, есть высокая надежность. Конечно, технология, дающая высокий процент выхода годных изделий, является необходимым условием высокой надежности, но отнюдь не достаточным. В практике любого производителя ИИС можно найти множество примеров, когда изделие с хорошим выходом годных изделий страдает от проблем надежности.

Общий процент выхода годных изделий включает процент выхода годных пластин после создания на них кристаллов, процент выхода годных кристаллов с этих пластин и процент выхода годных изделий на операции сборки. Наиболее нестабильным параметром является процент выхода годных кристаллов, который может в несколько раз изменяться при переходе на новый тип ИМС даже при полностью сохраняемом маршруте их изготовления. Причины снижения процента выхода годных ИМС – микро- и макродефекты. Условно разобьем пластину с годными кристаллами на две области. Первая область, не имеющая годных кристаллов и, как правило, представляющая собой краевую зону пластин, будет определяться как макродефект. Природа макродефектов: рассовмещение фотошаблонов, грязь на краевой области пластины, несоответствие одного из параметров функциональных слоев допустимым нормам и т.д.

На остальной части пластины годные кристаллы расположены не сплошной областью, а разделены равномерно расположенными бракованными кристаллами, работоспособность которых определяется микродефектами, приводящими к выходу из строя либо всего кристалла, либо его небольшой части. Природа микродефектов: наличие микровключений, попадающих в процессе производства кристаллов ИМС на пластину из воды, воздуха, химических реактивов, технологических газов и т.д. Такие микродефекты распределяются по пластине равномерно, вероятность появления годного кристалла площади S при средней плотности микродефектов на пластине N определяется формулой:

$$P = \exp(-S \cdot N) \quad (14.10)$$

При масштабном сокращении элементов критическими становятся дефекты величиной $(0.1-0.2) \cdot L$ [17], где L – минимальный топологический размер ИМС. Учитывая, что плотность микродефектов возрастает обратно пропорционально квадрату их размера на пластине, для элементов памяти без резервирования при заданном уровне процента выхода годных ИМС η_0 увеличение в α раз информационной емкости снижает процент выхода годных ИМС до $\eta_i = \eta_0^\alpha$. Эта формула обеспечивает возможность прогнозирования процента выхода годных новых ИМС ЗУ по известному уровню дефектности технологии ИМС.

Каждая технологическая операция оценивается уровнем технологических потерь. На конкретной операции этот уровень определяется процентом выхода годных ИМС или коэффициентом выхода годных. Коэффициент выхода годных на i -й операции равен:

$$\eta_i = \frac{N_{ri}}{N_i} \quad (14.11)$$

где N_{ri} – количество годных изделий на i -й операции; N_i – общее количество изделий, пришедших на i -ю операцию.

Уровень всего процесса изготовления ИМС оценивают общим коэффициентом выхода годных:

$$\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i, \quad (14.12)$$

где n – число технологических операций.

Наибольшее влияние на технологические потери и, следовательно, на величину коэффициента выхода годных кристаллов оказывают два фактора: выход годных пластин $\eta_{пл} = N(n)/N(0)$ после прохождения всего технологического процесса, состоящего из n операций (где $N(0)$ – начальное количество пластин в партии, $N(n)$ – количество пластин после прохождения всего маршрута из N операций), и выход годных кристаллов с пластины $\eta_{кр}$ (долей годных кристаллов на доходящих пластинах $N(n)$), то есть

$$\eta_{кр} = \eta_{пл} \eta_{кр}^{пл} = \frac{N(n)}{N(0)} \frac{H(z)}{H}, \quad (14.13)$$

где H – количество кристаллов на пластине; $H(z)$ – количество годных кристаллов на пластине.

На стадии производства стремятся достичь оптимального уровня выхода годных. Определение этого уровня позволяет наметить пути дальнейшего совершенствования производства. Наряду с оптимальным целесообразно определить достижимый при существующих технологических методах уровень, который указывает на возможный резерв повышения выхода годных ИМС без разработки принципиально новых технологических решений, путем мелких усовершенствований силами специалистов предприятия, т.е. наиболее экономичным способом.

Забракованное на технологической операции изделие классифицируется как отказ по параметрам, который характеризует надежность технологического процесса. По функциональным признакам отказы технологического процесса условно можно разделить на три группы: по оборудованию; по организационным причинам; по техническим причинам.

К причинам, вызывающим отказы первой группы, можно отнести:

- поломки деталей и узлов, разрегулирование механизмов и устройств, нестабильность параметров оборудования;
- появление дефектов и повреждений в оснастке, износ инструмента;
- неисправности контрольно-измерительной аппаратуры и др.

Причины, вызывающие отказы второй группы:

- недостаточный опыт и квалификация обслуживающего персонала;
- низкий уровень организации технического контроля качества изделий;
- отсутствие необходимых материалов, оснастки, заготовок, запасных частей;
- неритмичность работы и др.

Причины, вызывающие отказы по техническим причинам, следующие:

- низкое качество исходных материалов, их неоднородность;

- недостаточная надежность методов входного, операционного и приемочного контроля изделий и материалов;
- низкая точностная надежность технологического оборудования;
- неправильно выбранные режимы исполнения технологических операций;
- несоответствие помещений или рабочих мест требованиям "вакуумной гигиены" и др.

С учетом изложенного при финишном контроле изделий получим процент выхода годных, равный:

$$\eta = P_{\phi} \cdot P_{\text{сн}}, \quad (14.14)$$

где P_{ϕ} – вероятность того, что изделие функционирует; $P_{\text{сн}}$ – условная вероятность соответствия параметров изделия установленным нормам.

Значение P_{ϕ} определяется как

$$P_{\phi} = \prod_{i=1}^k (1 - q_i), \quad (14.15)$$

где q_i – доля катастрофического брака по i -му параметру (статистическая вероятность его появления) на финишном контроле; k – число измеряемых параметров.

Соответственно значение $P_{\text{сн}}$ задается выражением:

$$P_{\text{сн}} = \prod_{i=1}^k (\eta_i), \quad (14.16)$$

где η – процент выхода годных по i -му параметру без учета катастрофического брака по этому параметру.

Под надежностью технологического процесса предлагается понимать его способность обеспечивать выпуск продукции заданного качества с заданным ритмом в течение требуемого промежутка времени. Оценка надежности технологического процесса (ТП) по параметрам качества изготавливаемой продукции содержит:

- выбор номенклатуры показателей надежности;
- определение фактических значений показателей;
- сравнение фактических значений с требуемыми или базовыми значениями.

Оценку надежности ТП по параметрам качества изготавливаемой продукции, как правило, осуществляют при проведении следующих работ:

- разработке технологических процессов на этапе технологической подготовки производства;
- управлении технологическими процессами;
- определении периодичности подналадок технологического оборудования;
- выборе методов и планов статистического регулирования технологических процессов;
- уточнении требований к качеству материалов и комплектующих изделий;

– выборе и корректировке планов испытаний и технического контроля готовой продукции;

– совершенствовании ТП в части повышения их надежности и качества изготавливаемой продукции.

Вопросы оценки надежности ТП пока еще недостаточно разработаны. В имеющихся в этой области работах нет единой терминологии и предлагаются самые разнообразные показатели надежности ТП.

Определение показателей надежности технологического процесса рекомендуется выполнять в период, когда процесс отработан, т.е. обеспечивается воспроизводимость процесса.

Практически надежность технологического процесса производства ИИЭ будем характеризовать двумя параметрами: управляемостью технологического процесса, который характеризуется процентом выхода годных изделий (η), и стабильностью этого процесса, т.е. величиной $\sigma(\eta)$.

Коэффициент управляемости K_y технологическим процессом, рассчитывается следующим образом

$$K_y = \left(1 - \frac{\eta - \bar{\eta}}{\Delta}\right) \cdot 100\%, \quad (14.17)$$

где η – установленный (плановый) процент выхода годных;

$\bar{\eta}$ – среднее значение процента выхода годных за определенный период времени (например, месяц) или по контролируемым партиям; Δ – ширина поля допуска, устанавливаемая для данного процесса.

Для оценки стабильности технологического процесса по величине определенного параметра (x), необходимой при проведении аттестации процесса за определенный период времени, может быть использован показатель стабильности ТП, заданный выражением:

$$K_c = \left(1 - \frac{\sigma}{\Delta}\right) \cdot 100\%, \quad (14.18)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение величины параметра x в партиях, изготовленных за период аттестации.

Управляемость и стабильность технологического процесса характеризуют его надежность за данный промежуток времени. Управляемость технологического процесса зависит от точности и воспроизводимости отдельных технологических операций.

На предприятии–изготовителе ИМС должны действовать документы, устанавливающие:

а) порядок обучения и аттестации производственного персонала, участвующего в изготовлении и контроле качества ИМС по всему технологическому процессу;

б) порядок проверки производственного оборудования, периодичность проверки и, в необходимых случаях, методы проверки оборудования;

в) порядок проверки выполнения требований, предъявляемых к производственным помещениям и рабочим местам (запыленность, влажность, температура, агрессивные среды);

г) порядок проверки технологического процесса;

д) порядок учета, хранения, обращения конструкторской и технологической документации;

е) порядок и методы входного контроля поступающих материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий;

ж) порядок проведения анализа дефектных ИМС и осуществления мероприятий по устранению причин их появления;

з) порядок организации анализа и учета технологических потерь в производстве;

и) порядок анализа рекламаций и согласования мероприятий, внедряемых в производство по результатам анализа.

Конструкторская и технологическая документация, по которой изготавливают ИМС, а также все изменения этой документации должны оформляться в соответствии с действующими системами конструкторской и технологической документации.

Изготовление ИМС всех типов, входящих в одну серию и выпускаемых на различных предприятиях–изготовителях, должно производиться по единой конструкторской документации, а также по единой технологической документации на основные технологические процессы.

Перечень основных технологических процессов, а также основных применяемых материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий разрабатывает предприятие–держатель подлинников. Допускается применение различного оборудования для выполнения одинаковых технологических операций при обеспечении заданного технологической документацией режима.

В составе технологического процесса должен быть предусмотрен 100%–ные отбраковочные испытания. Перечень обязательных отбраковочных испытаний предусматривается в директивных документах (общих технических условиях и технических условиях на ИМС).

Изменения в конструкторскую и технологическую документацию, приводящие к изменению норм в стандартах или технических условиях на ИМС конкретных типов, вносят только после утверждения в установленном порядке решения о внесении соответствующих изменений в стандарты или технические условия на ИМС конкретных типов.

Изменения в конструкторской и технологической документации, не приводящие к изменению норм, должны быть согласованы с техническим контролем.

ИМС в процессе производства должны сопровождаться документацией (сопроводительными листами) по форме, принятой в установленном порядке на предприятии–изготовителе.

Нормы, устанавливаемые в технологической документации для проверки ИМС в целом, кроме функционального контроля, должны быть более жесткими в сравнении с нормами, устанавливаемыми в стандартах или технических условиях на ИМС конкретных типов.

Предприятие–изготовитель совместно с техническим контролем ежемесячно проводит обобщение данных по проценту выхода годных ИМС с указанием основных дефектов, обнаруженных в производстве за истекший

период, а также данных об уровне сдачи партий после первого предъявления в технический контроль.

Если производственный брак ИМС или число рекламаций на них резко возрастает, то изготовитель анализирует причины увеличения брака и рекламаций. На основании анализа предприятие–изготовитель разрабатывает необходимые мероприятия и внедряет их в производство.

14.3 Статистические методы управления качеством в производстве интегральных микросхем

Одной из основных мер при повышении эффективности производства и качества выпускаемой продукции является контроль и управление качеством технологических процессов.

Организация обеспечения качества изделий в процессе производства тесно связана с организацией самого производства и развивалась вместе с ним. Появилась необходимость в разработке таких методов контроля, которые могли бы обеспечить предотвращение массовых отказов при одновременном сокращении трудоемкости контрольных операций. К числу наиболее распространенных в отечественной и зарубежной практике методов относятся статистические методы контроля изделий и регулирования технологических операций и процессов. Их внедрение в производство ознаменовало начало перехода от обеспечения качества путем простой разбраковки готовых изделий на годные и брак к оперативному управлению качеством и предотвращению появления массового брака вследствие разладки технологического процесса.

В единой системе управления качеством, охватывающей все стадии жизненного цикла изделия (разработка–производство–эксплуатация), этап производства является основным, так как на этом этапе (от входного контроля исходных материалов до выходного контроля готовых изделий) обеспечивается вещественная реализация всех качественных показаний (параметров) изделия, заложенных на этапе конструирования и сохраняемых на этапе эксплуатации.

Общей целью любых систем управления качеством на этапе производства является обеспечение изготовления изделий в полном соответствии с требованиями нормативно–технической документации НТД (технические условия плюс конструкторская документация) при минимальных затратах.

Недостаточная изученность подчас сложнейших технологических операций, вероятностный характер их протекания и недостаточная управляемость обуславливают, в большинстве случаев, сравнительно низкий уровень процента выхода годных изделий. Обычно после запуска в производство новой ИМС процент выхода годных изделий постоянно растет, что объясняется отработкой технологических режимов, выявлением и использованием возможностей управления технологическими операциями, повышением квалификации исполнителей и т.п., и в течение трех–пяти лет может быть повышен в 2–5 и более раз. Одним из основных путей реализации этих резервов является организация системного анализа

технологического процесса. Главным же инструментом системного анализа являются вероятностно–статистические методы.

Вторым направлением обеспечения качества изделий является стабилизация технологических операций и процессов, то есть максимальные уменьшение разброса параметров, определяющих изделие на данной операции, а также своевременное обнаружение тенденции разладки процессов и устранение причин этой разладки до появления массовых отказов. Реализация этого направления осуществляется путем своевременного регулирования технологических режимов, в идеале с помощью автоматических средств и систем. Различные способы регулирования технологических процессов также основываются на статистических методах оценки их состояния.

И третье направление – сокращение затрат на контроль путем замены сплошного, то есть 100%–ного, контроля выборочным. Выборочный контроль будет эффективным только тогда, когда он основывается на методах теории вероятностей и математической статистики.

Таким образом, в системе управления качеством при производстве ИМС широко используются: методы статистического анализа технологического процесса; методы статистического регулирования хода технологических операций и процесса в целом; выборочного статистического контроля качества продукции.

С усложнением ИС, т.е. с выпуском БИС и СБИС, значение этих методов и умение их применять становится необходимым для широкого круга специалистов.

Информационной базой задач статистического анализа являются:

- параметры контролируемых элементов кристаллов ИС;
- параметры тестовых структур, специально изготавливаемых и расположенных на каждом кристалле ИС, или сформированных с использованием схмотехнических элементов кристаллов ИМС;
- параметры тестовых структур в составе специальных тестовых ячеек, изготавливаемых на пластинах одновременно с кристаллами ИС;
- параметры структур контрольных пластин–спутников;
- статические, динамические и другие параметры, контролируемые на кристаллах и готовых ИС.

Одной из основных задач системы статистического анализа технологии ИМС является задача выявления доминирующих параметров операционного контроля ИМС.

Основными точками сбора информации о качестве на стадиях изготовления ИМС, как правило, считаются операции:

- диффузионно–окислительные;
- фотолитографии и травления;
- проверки параметров и внешнего вида структур–кристаллов на пластине;
- микрочварки внутренних выводов;
- проверки параметров при нормальных условиях и при крайних температурах;
- проверки герметичности ИМС.

Например, на диффузионно–окислительных операциях рекомендуется осуществлять контроль следующих параметров: поверхностного сопротивления; глубины залегания диффузионных слоев; толщины эпитаксиальных пленок; пористости и толщины диэлектрических слоев; напряжения отсечки $C-V$ -характеристик; коэффициента усиления прямого и инверсного; толщины проводящих слоев; пробивного напряжения коллектор–эмиттер; сопротивления тестового резистора; порогового напряжения; переходного сопротивления контактов между проводящими слоями и легированными областями.

При статистическом контроле производственных процессов происходит их непрерывное совершенствование и повышение за счет постоянного улучшения качества изделий. Наряду с информацией, получаемой в процессе производства, статистический контроль качества производства учитывает также результаты анализа изделий, отказавших в эксплуатации, т.е. скрытые дефекты, при этом результаты анализа соотносятся с ходом технологического процесса, учитывается на каком этапе технологического процесса появился дефект, послуживший основой для выявления брака, разрабатываются меры для совершенствования технологического процесса повышения качества исходных материалов.

Анализ связи показателей качества пластин с параметрами операционного контроля является той основой, на которой базируется оценка уровня технологии изготовления ИМС и достигается повышение процента выхода годной продукции. Он может быть выполнен путем автоматизированного наложения данных операционного контроля и их исследования методами математической статистики. Необходимо отметить, что статистические методы контроля качества продукции применимы только к управляемому, стабильному производству.

14.3.1. Анализ технологических процессов с использованием качественных диаграмм

Управление качеством в процессе производства осуществляется путем принятия и реализации решений в двух основных направлениях :

- решения для обеспечения мер для ликвидации возникающих нарушений нормального хода процесса и предотвращения возможностей повторения этих нарушений;

- решения по реализации мероприятий, направленных на совершенствование процесса (снижение затрат, уменьшение брака и повышение процента выхода годных, сокращение расхода материалов и т.п.).

Эффективность принимаемых решений в значительной степени обуславливается объемом и составом информации, находящейся в распоряжении инженера, принимающего решение. Для правильной оценки имеющейся информации необходимо проанализировать состояние объекта управления: технологическую операцию, технологический процесс или его часть, состояние качества исходных материалов, уровень качества готовой продукции и т.п. Поэтому анализ технологического процесса является

начальным и базовым этапом совершенствования системы управления качеством на предприятии.

К качественным методам анализа технологических процессов, кроме построения широко известных гистограмм распределения какого-либо параметра качества, относятся:

- построение диаграмм взаимозависимости различных факторов (диаграмма причин и результатов, т.е. диаграмма Исикавы);
- метод выделения наиболее важных факторов, влияющих на качество (диаграмма Парето).

Диаграмма причин и результатов – диаграмма, которая показывает отношение между показателями качества и воздействующими на него факторами. В настоящее время эта диаграмма используется во всем мире не только применительно к показателям качества продукции (рис.14.4), но и в других областях.

Диаграмму причин и результатов иначе называют диаграммой "рыбий скелет", поскольку она напоминает скелет рыбы, что видно на рис.14.5. Иногда ее также называют деревом или диаграммой "речных притоков". Воспользуемся в дальнейших рассуждениях названием "рыбий скелет".

Метод построения диаграммы по этапам следующий:

Этап 1. Определяется показатель качества.

Этап 2. Выбирается один показатель качества и пишется в середине правого края чистого листа бумаги (рис.14.5). Слева направо проводится прямая линия ("хребет"), а записанный показатель заключается в прямоугольник. Далее пишутся главные причины, которые влияют на показатель качества, которые заключаются затем в прямоугольники и соединяются с "хребтом" стрелками в виде "больших костей хребта".

Этап 3. Пишутся причины (вторичные), влияющие на главные причины ("большие кости"), и располагаются в виде "средних костей", примыкающих к "большим". Затем пишутся причины третичного порядка, которые влияют на вторичные причины и располагаются в виде "мелких костей", примыкающих к "средним".

Этап 4. Ранжируются факторы по их значимости и выделяются особо важные, которые предположительно оказывают наибольшее влияние на показатель качества.

Этап 5. Пишется вся необходимая информация на диаграмме.

Применяя эту процедуру на практике, зачастую можно столкнуться с трудностями.

Наилучший способ в этом случае – рассмотреть проблему с точки зрения "изменчивости". Например, думая о "больших костях", рассуждают об изменениях в показателе качества. Если данные показывают, что изменения существуют, определяют, почему так происходит. Изменение результата может обуславливаться изменениями в факторах. Анализируя данные по конкретному дефекту, можно обнаружить, что число дефектов, допускаемых в разные дни недели, различно. Если обнаружится, что дефекты более часто встречаются в начале смены и после обеденного перерыва, чем в другие часы, задайтесь вопросом: "А почему дефекты в это время допускаются чаще, чем в другие часы?", "Почему они возникают?".

Это заставит обратиться к рассмотрению факторов, которые отличают указанное время работы от остального, что в результате приведет к обнаружению причин дефекта.

Прибегнув к такому способу рассуждений на каждой стадии исследования отношений между показателями качества и "большими костями", между "большими" и "средними", а также между последними и "мелкими костями", возможно логическим путем построить полезную диаграмму причин и результатов.

После того, как завершено построение диаграммы, следующий шаг – распределение факторов по степени их важности. Не обязательно все факторы, включенные в диаграмму, будут оказывать сильное влияние на показатель качества. Обозначают те, которые, на взгляд составителя, оказывают наибольшее значение.

И последнее. Наносится на диаграмму вся необходимая информация: ее название, наименование изделия, процесса или групп процессов, дата и т.д.

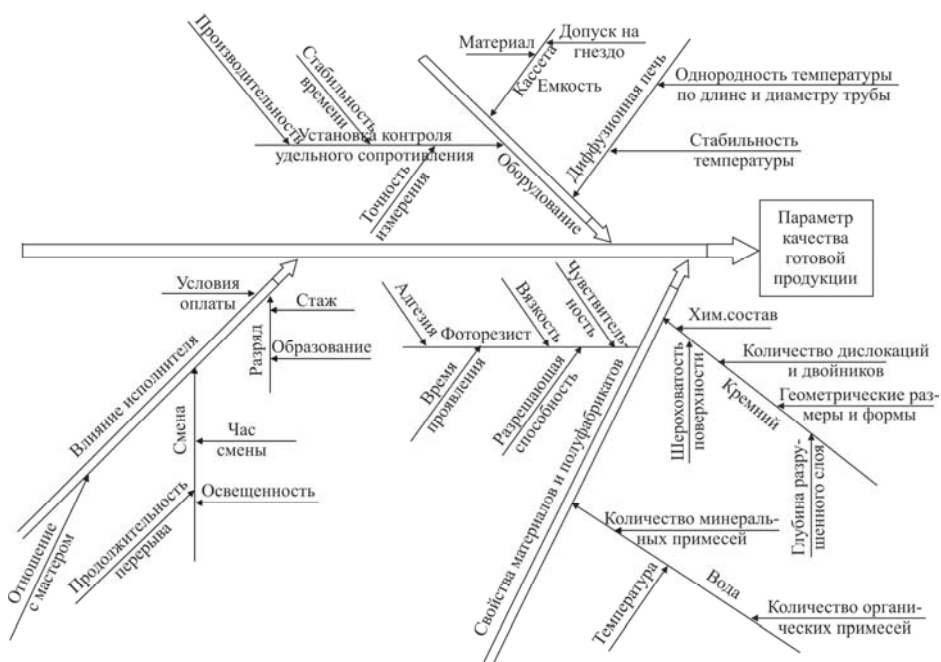


Рис.14.4 Пример диаграммы Исикавы

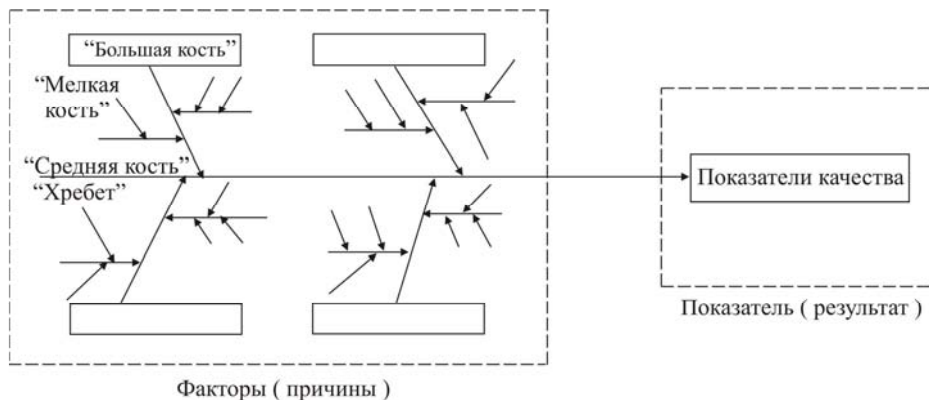


Рис.14.5 Структура диаграммы причин и результатов

Если рассмотреть основные причины разброса любого параметра качества готовых изделий или изделий на любой стадии технологического процесса, то эти причины укрупненно можно разбить на четыре группы:

- причины, возникающие из-за колебаний свойств исходных материалов и комплектующих изделий;
- причины, возникающие из-за колебаний параметров оборудования и оснастки;
- причины, возникающие вследствие влияния факторов, связанных с деятельностью людей;
- причины, обусловленные особенностями применяемых технологических методов изготовления и контроля.

Следующим шагом является выявление факторов, из которых складывается совокупное влияние каждой из перечисленных выше причин. Например, на качественные показатели ИМС могут влиять, во-первых, параметры качества кремниевых пластин (геометрические размеры и форма, физическое состояние, например, глубина деформированного слоя или количество дислокаций в единице объема или поверхности, химический состав, т.е. наличие и процентное содержание примесей и т.п.), во-вторых, параметры качества воды, применяемой при очистке (степень очистки, состав минеральных и органических примесей, температура) и, в-третьих, параметры качества фоторезиста, применяемого при фотолитографии (чувствительность, разрешающая способность, адгезивная способность, время экспонирования и т.д.). Все это вместе взятое, а также конкретные свойства других материалов, применяемых при изготовлении ИМС, и составляют комплекс причин, объединенных в общую группу влияния исходных материалов. Аналогично можно детализировать каждую из других групп основных причин, в результате чего может быть составлена диаграмма Исикавы.

Следует учитывать, что использование диаграммы Исикава для анализа процессов производства имеет и некоторые недостатки, а именно:

- поскольку составляющие диаграммы осуществляются людьми на основе их субъективных представлений о процессе, не исключена субъективная трактовка отдельных связей причин и факторов, и всегда есть опасность, что при систематизации возможных причин какая-то одна, даже очень важная, может быть пропущена;
- одна и та же причина может быть записана несколько раз в разных местах диаграммы, что затрудняет оценку влияния на конечный результат (параметры качества готового изделия) тех причин, которые обусловлены совокупным воздействием нескольких факторов;
- чем более подробна диаграмма, тем труднее определить связь между мелкими (очень подробно конкретизированными) причинами и конечными результатами процесса.

Для уменьшения влияния этих недостатков рекомендуется поручать составление диаграммы Исикавы независимо сразу нескольким исполнителям, после чего организовать совместное обсуждение имеющихся

в диаграммах различий. Такой метод не только позволяет уточнить неясные вопросы и уменьшить влияние субъективности на выявление причинно-следственных связей в процессе производства, но и использовать это обсуждение для повышения уровня знания сотрудников о производственном процессе.

При проведении анализа производства весьма важно сосредоточить внимание на важнейших проблемах. В связи с этим особое значение приобретает методология выделения из множества проблем таких, решение которых обеспечивает наибольшую эффективность. Для этого целесообразно пользоваться так называемой диаграммой Парето, названной в честь итальянского экономиста В.Парето. Она представляет собой график-диаграмму, по оси абсцисс которой откладываются последовательно различные элементы изучаемого явления, а по оси ординат – вклад каждого элемента в общий результат. Например, если изучаются потери от брака, то по оси абсцисс откладываются различные виды брака, а по оси ординат – потери, обусловленные наличием брака каждого вида. При этом элементы изучаемого явления должны откладываться по оси абсцисс в порядке убывания вклада каждого явления.

В качестве примера рассмотрим диаграмму Парето для пооперационных потерь при изготовлении кремниевых интегральных микросхем стабилизаторов напряжения серии КР. По данным графы 5 табл.14.2. построена зависимость потерь на операциях при изготовлении ИМС серии КР 142 – диаграмма Парето (рис.14.6.).

Из этого рисунка видна характерная особенность диаграммы: небольшое количество операций является источником основной доли потерь. Эта особенность является отражением общего принципа Парето, который гласит, что для любого результата, являющегося следствием многих причин, небольшое количество причин оказывает сильное влияние на этот результат, в то время как очень большое количество остальных причин оказывает малое влияние на результат. Именно поэтому диаграмма Парето позволяет выделить те главные элементы (в данном примере – операции), которые являются важнейшими и требуют первоочередного внимания.

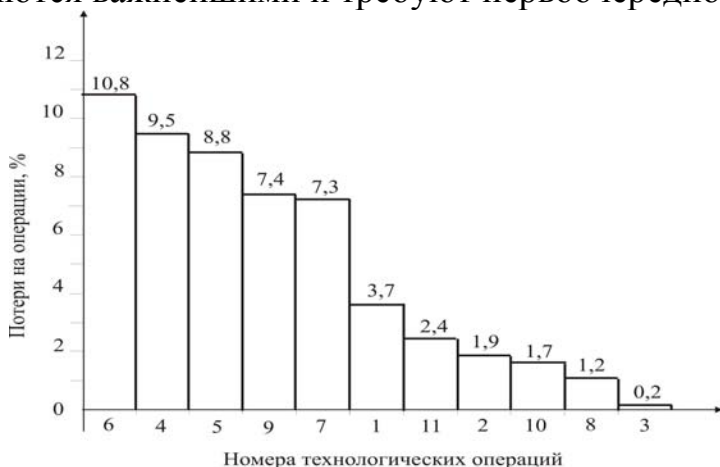


Рис.14.6. Зависимость потерь на различных операциях при сборке ИМС

Таблица 14.2. Пооперационный процент выхода годных ИМС и пооперационные потери при изготовлении ИМС серии КР142

Номер операции	Операция	Выход годных ИМС на операции, %	Нарастающий процент выхода годных, %	Потери от запуска, %	Потери операции, отнесенные к общему количеству потерь, %
1	Контроль внешнего вида кристаллов	96,3	96,3	3,7	6,8
2	Монтаж кристаллов	98	94,4	1,9	3,5
3	Приварка выводов	99,9	94,3	0,1	0,2
4	Контроль арматуры собранной	89,9	84,8	9,5	17,4
5	Герметизация	89,9	76,2	8,6	15,8
6	Контроль статических параметров при нормальных условиях	85,88	65,4	10,8	19,8
7	Контроль электрических параметров при повышенной температуре	88,9	58,1	7,3	13,4
8	Проверка выходной мощности	98	57,0	1,2	2,2
9	Вторая проверка статических параметров при нормальных условиях	87,08	49,6	7,4	13,6
10	Контроль внешнего вида	96,6	47,9	1,7	3,1
11	Приемо–	95	45,5	2,4	4,4

	сдаточные испытания				
	Всего:		45,5	54,5	100

Для более четкого выделения важнейших элементов рекомендуется построение так называемой нормированной диаграммы Парето. Для этого сумму потерь всех элементов приравнивают к 100% и вычисляют значение потерь всех остальных элементов в зависимости от общей суммы потерь (графа 6 табл.14.2). По этим данным строят нормированную диаграмму Парето (рис.14.6).

Проведя на нормированной диаграмме две линии, параллельные оси абсцисс с ординатами, равными соответственно 75 и 95%, разбивают все элементы диаграммы (в нашем примере – все операции) на три группы:

группа А (наиболее важная) включает те операции, которые ответственны за 75% общих потерь;

группа Б включает элементы, ответственные за 20% (от 75 до 95%);

группа В включает операции, ответственные за оставшиеся 5% потерь (от 95 до 100%).

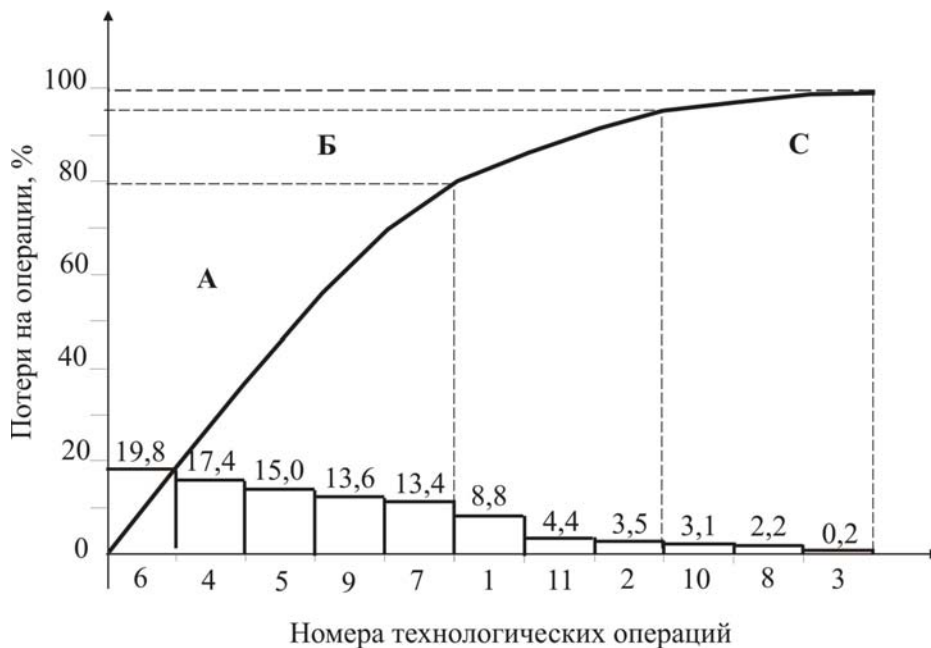


Рис. 14.7. Потери на операциях при изготовлении ИМС серии 142 (нормированная диаграмма Парето)

В приведенном примере (рис.14.7) видно, что потери на пяти операциях (группа А) составляют 80% от всех потерь, имеющих место в технологическом процессе, в то время как другие шесть операций (группы Б и В) вместе дают только 20% от общего количества потерь. Очевидно, что для существенного снижения технологических потерь (повышение процента выхода годных ИМС) необходимо в первую очередь рассмотреть и устранить причины потерь (или по крайней мере ослабить влияние этих причин на ход процесса) именно на операциях группы А.

14.3.2 Статистическое регулирование технологических процессов

Вследствие того, что характер протекания технологических процессов изготовления ИЭТ носит вероятностный характер, распределение параметров может характеризоваться двумя параметрами: центром распределения или положением на числовой оси того интервала, частота которого максимальна, и шириной распределения. Параметры, характеризующие распределение, называются его мерами. Параметр, характеризующий положение распределения на числовой оси, называется мерой положения (среднее арифметическое, мода, медиана). Параметр, характеризующий ширину распределения, называется мерой рассеяния (дисперсия, среднеквадратичное отклонение, размах). Зная меру положения и меру рассеяния для ряда распределений какого-либо параметра качества, имеющего определенный допуск, можно установить:

- обеспечивает ли точность процесса изготовления изделий с заданным параметром качества в заданном допуске, т.е. соответствует ли точность процесса требованиям качества изготавливаемой продукции;
- обеспечивает ли заданный уровень настроенности процесса получение продукции с параметром качества с заданным допуском, т.е. насколько хорошо настроен технологический процесс.

Поскольку даже очень хорошо отлаженный технологический процесс имеет тенденцию изменять свои параметры (может меняться и мера положения, и мера распределения), то необходимо обеспечить математическое наблюдение за ходом процесса с тем, чтобы при обнаружении разладки принять меры к устранению причин ее появления.

Если стабильность и точность технологического процесса обеспечивает изготовление изделий с заданными значениями параметров качества, то говорят, что процесс (операция) является статистически управляемым. Если же при изготовлении изделий имеет место неопределенное значение параметра качества, то говорят, что процесс (операция) вышел из управляемого состояния и необходимо принять меры для его регулировки, то есть возвращения в статистически управляемое состояние.

Статистическое регулирование заключается в том, что на основании данных о состоянии технологического процесса в предшествующие моменты времени прогнозируется его состояние в последующий момент времени и в случае необходимости осуществляется корректирование (управляющее воздействие).

Корректирование значений параметров технологического процесса на основании результатов выборочного контроля параметров качества изделий, осуществляемое в целях обеспечения требуемого уровня качества продукции называется статистическим контролем или регулированием технологического процесса.

Статистический контроль технологических процессов является аналитическим инструментом, используемым при управлении процессом производства изделий. Он давно принят во многих странах и является эффективным средством для совершенствования процесса производства и увеличения процента выхода годных изделий на каждой технологической операции.

В процессе статистического контроля оценивается "управляемость" технологических процессов; возможность влияния на их результаты изменением условий, допусков; стабильность удержания допусков на параметры изделий во времени.

Статистическое регулирование может осуществляться различными методами. Статистический контроль может проводиться на основании таблиц с численными результатами, на основании гистограмм, графиков распределений. Выбор метода определяется особенностями каждого процесса по сравнению с другими в приложении его к определенному процессу (операции). Наиболее известными, получившими широкое распространение в машиностроении и заимствованные отсюда для использования при производстве изделий электронной техники, в том числе и ИМС, являются методы, основанные на применении различных форм контрольных карт.

Статистическое регулирование технологического процесса с применением контрольной карты – это, по сути дела, статистическое наблюдение за изменением параметра качества изделий во времени и предупреждение брака путем своевременного вмешательства в процесс. Контрольная карта является тем средством, которое позволяет наглядно отобразить ход технологического процесса во времени и таким образом выявить его нарушение.

Контрольная карта представляет собой график, на котором по оси абсцисс откладывают время (вместо времени на оси абсцисс можно откладывать порядковый номер выборки, взятый для определения параметра качества или номер партии и т.п.), а по оси ординат – величину выбранной характеристики ряда распределений параметра качества продукции в данный момент времени.

На контрольную карту обычно наносят пять линий: одна линия среднее, номинальное значение параметра качества; две крайние линии – контрольные пределы – уровень ОТК и две промежуточные – предупредительные. Иногда используют несколько предупредительных линий, соответствующих различным контрольным уровням, например, уровень начальника цеха, уровень главного технолога и т.д.

Как правило, контрольные границы регулирования определяются как $\pm 3\sigma$, а в качестве предупредительных границ могут выбираться двухсигмовые пределы, т.е. $\pm 2\sigma$.

В общем случае расчет границ регулирования – очень важная задача в методе статистического регулирования технологических процессов. Известны два подхода к установлению границ регулирования – метод Шьюхарта и английский. В первом – определяют границы регулирования параметров уровня качества ТП безотносительно величины требуемого допуска на формируемые в ходе ТП параметры изделия. При этом считается, что разладка технологии произошла, если параметр уровня качества превысил свое среднее значение на величину, большую чем 3σ . Применение метода Шьюхарта статистического регулирования приводит к увеличенному риску лишних настроек, т.е. к тому, что настройки будут производиться в ряде случаев даже тогда, когда не снижается процент выхода годных, т.е.

когда на него не влияет обнаруженная по контрольным картам "разладка". Но для полупроводниковых изделий, определяющих надежность аппаратуры, метод Шьюхарта наиболее целесообразен, как наиболее жесткий по отношению к уровню качества технологии.

В основе английского метода положен принцип: "Никаких лишних настроек", поэтому границы регулирования определяются относительно границ поля допуска, а не относительно среднего уровня, что имеет существенное значение в машиностроении. Из-за отсутствия стационарных связей процента выхода годных полупроводниковых изделий с измеряемыми информационными параметрами второй метод практически не используется в полупроводниковой промышленности.

Выход значения характеристики ряда распределений (параметра качества) за пределы границ регулирования является сигналом разладки технологического процесса (операции). Общая форма контрольной карты показана на рис.14.8а. На рис.14.8б. показан пример общей контрольной карты с установлением двух границ: верхних и нижних.

При разработке контрольной карты для статистического регулирования технологической операции необходимо:

- выбрать параметр качества, по которому будет осуществляться оценка состояния технологической операции или процесса;
- установить объем выборки для оценки этого параметра;
- определить границы регулирования для выбранного параметра качества;
- установить периодичность взятия выборок.

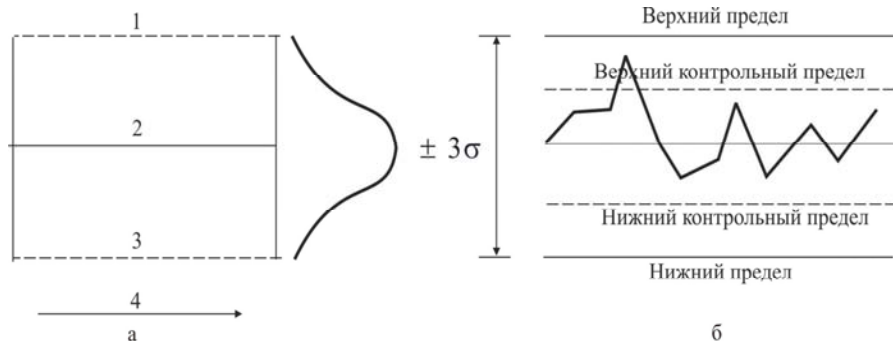


Рис.14.8 Общая форма контрольной карты и ее пример

1 – верхняя граница регулирования; 2 – номинальное значение параметра; 3 – нижняя граница регулирования; 4 – время или номер ошибки.

Существует много разновидностей контрольных карт. Однако, все их можно разделить на два вида: контрольные карты количественных признаков и контрольные карты качественных признаков.

Контрольные карты количественных признаков основываются на применении для оценки состояния технологической операции таких параметров качества, которые поддаются измерениям. В этих контрольных картах содержится информация о мере положения и мере рассеяния параметра качества. Выбор же определенных мер (например: среднее \bar{X} или медианное Me , среднеквадратичное отклонение σ или размах R)

определяется конкретными особенностями данной операции, спецификой применяемых средств измерения и обработки данных, особенностями организации рабочего места и т.п.

Классические (\bar{X} - R) контрольные карты редко используются на предприятиях электронной промышленности, имеющих дело с производством полупроводниковых пластин. Это происходит потому, что такие контрольные карты чаще всего удобно применять в тех случаях, когда имеется лишь одна причина вариации качества. Тогда контрольная карта четко фиксирует отклонение определенного параметра, элемента технологии и указывает на пути стабилизации. При производстве полупроводниковых пластин имеется много вероятных причин отклонения размеров, качества, а выход за установленные пределы контролируемого параметра чаще всего может послужить только причиной поисков в определенном направлении.

Контрольная карта (\bar{X} - R) имеет некоторые недостатки, заключающиеся в том, что она требует вычислений среднего значения \bar{X} по каждой выборке, а это в условиях производства не всегда удобно. Кроме того, она чувствительна к грубым ошибкам при измерении и вычислении. Поэтому во многих случаях вместо такой карты используют контрольную карту (Me - R) по медиане Me и размаху R , которая несмотря на меньшую точность оценки настроенности технологической операции не требует проведения вычислений при взятии выборок и нечувствительна к грубым ошибкам при измерениях. Порядок разработки контрольной карты (Me - R) аналогичен карте (\bar{X} - R).

Контрольные карты регулирования технологической операции (процесса) по доле брака W или проценту выхода годных ИМС η нашли широкое применение в электронной промышленности вследствие простоты ведения, оценки и универсальности. Параметром для оценки состояния технологической операции или процесса в случае карты для W является количество брака в выборке на операции, выраженное в долях или в процентах.

Поскольку контрольная карта наглядно показывает состояние технологического процесса, тенденции его изменения и скорость нарастания этих изменений, она не только является средством своевременного обнаружения момента выхода операции (процесса) из статистически управляемого состояния и принятия необходимых корректирующих мер (рис.14.9.), но и служит прекрасным средством для оценки качества труда и стимулирования его повышения. Когда исполнитель видит результаты своего труда и постоянно чувствует, что эти результаты контролируются, он мобилизуется для более внимательного, ответственного выполнения порученной ему работы. Алгоритм процесса контроля качества по контрольным картам приведен на рисунке 14.9.

Если процесс контролируем, возможны разные виды решений по результатам контроля. Возможны изменения технологического процесса с целью уменьшения числа трудно контролируемых операций, в результате проведения которых могут иметь место неконтролируемые изменения качества и надежности ИИЭ.

В отдельных случаях по результатам статистического контроля технологических процессов приходится делать вывод о непригодности процессов, о необходимости их переработки или замены. При этом необходимо получить максимум информации о неблагоприятных частностях процесса, о необходимых направлениях его изменения, что хорошо и что плохо в уже исследовавшемся процессе .

В процессе производства исходных элементов и самих полупроводниковых изделий накапливается при измерениях огромное количество данных. Обработка этих данных, конвертирование их, оценка корреляции между данными и итогами производственного процесса могут значительно улучшить качество и надежность изделий, повысить процент выхода годных ИМС в процессе производства. По мере того, как ИС становятся сложнее, больше по размерам и дороже, "вес" надежности и процента выхода годных ИМС их производства резко увеличивается. Оценки показывают, что направленная обработка результатов измерений позволяет найти ключевые параметры, коэффициенты корреляции которых с уровнями надежности и с выходом годных достаточно велики.

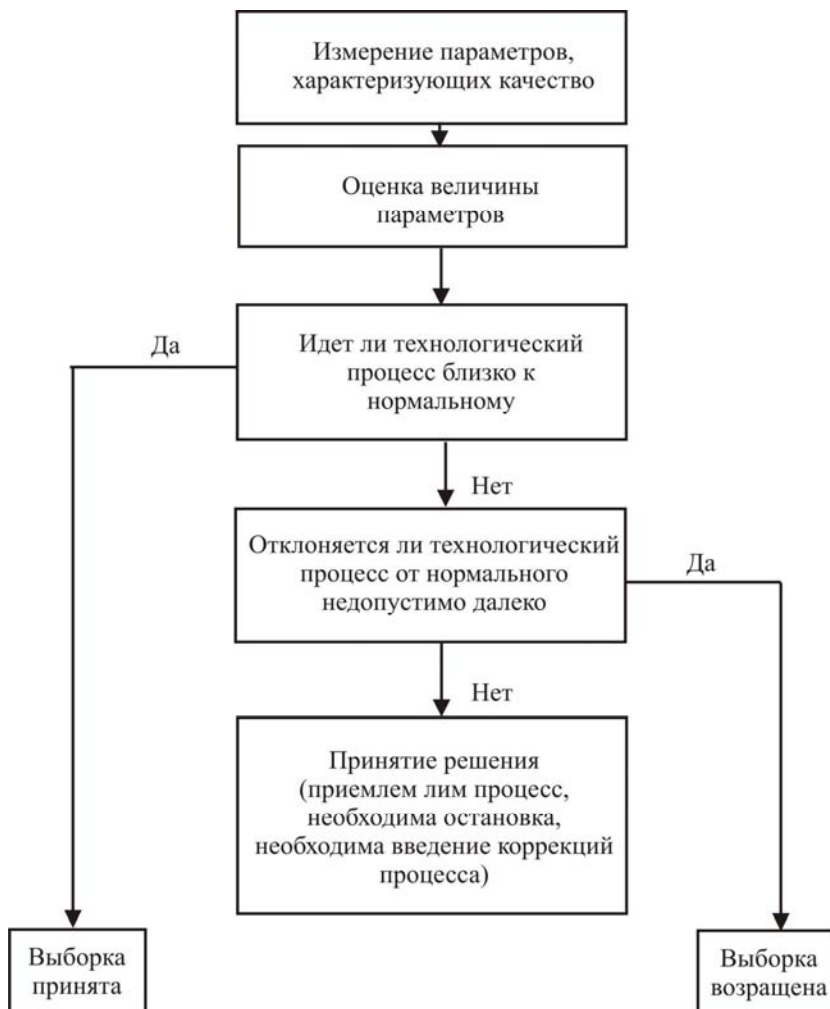


Рис.14.9 Алгоритм процесса контроля качества по контрольным картам

14.4. Система контроля технологического процесса

14.4.1. Контроль качества изделий в процессе производства

Конечным результатом контроля качества изделий является исключение из последующих стадий производственного процесса тех изделий, которые изготовлены с дефектами. Основой системы контроля качества является удаление изделий, не созданных надлежащим образом на предыдущих этапах производства.

Необходимо отметить, что эта проверка не является контролем процесса, а только контролем продукции. Если бы случилось так, что производственный процесс был начат со 100%–но некачественной продукции, то при данном контроле эта некачественная продукция была бы удалена, но это не исправило бы основной проблемы возникновения брака.

Если результаты проверок контрольных постов регистрируются, анализируются и сопоставляются со стандартными значениями, то могут быть приняты меры для исправления любого нарушения технологического процесса. Обратная связь информации воздействует на степень контроля процесса производства, т.е. контроль производства не имеет непосредственно отношения к удалению дефектной продукции.

Обратная связь результатов контроля продукции на контроль технологического процесса имеет своей целью достижение контроля над технологическим процессом.

Контроль продукции в процессе производства состоит из производственного контроля и приемочного контроля качества партии изделий, следующего за производственным контролем.

Производственный контроль. Эти проверки выполняются производственным персоналом по принципу "годен – не годен". Даже на этом наименее строгом этапе контроля продукции используется принцип обратной связи. Условием для такого контроля является отчет о проценте выхода годных изделий и система управления контролем технологического процесса, которые проводятся руководством ежедневно и еженедельно, а также гласность о данных контроля.

Приемочный контроль качества партии. Там, где наиболее вероятны отклонения, после производственного контроля следует производить приемочный контроль. Решение о приемке партии составляется на основании ТУ и предварительного определения уровня качества. При таких условиях контроля обратная связь служит двум целям.

Во–первых, забракованные партии сразу же соответствующим образом маркируются для того, чтобы привлечь внимание. Следует решить, какие изменения в контроле или процессе производства могут быть предприняты с целью корректировки.

Во–вторых, система управления технологическим процессом показывает тенденции результатов контроля качества, которые распространяются еженедельно по всем отделениям управления. Процентные показатели статистически сравниваются с прошлыми средними значениями с существенными отклонениями и оцениваются те корректирующие меры, которые приняты.

Примером таких контрольных точек технологического процесса могут служить: контроль качества партий пластин после эпитаксиального процесса, контроль слитков монокристаллов, проверка арматур собранных перед герметизацией, контроль герметичности и электрические испытания. Под понятием "контроль качества" понимается также проверка процесса контроля, который выполняется инспекторами производственного процесса. Инспекторы производственного процесса, используя анализ отказов и отчет о проценте выхода годной продукции, проводят выборочный контроль принятых и отказавшие изделия и оценивают степень достоверности проведения контрольной операции.

14.4.2 Контроль технологического процесса

Контроль технологического процесса (ТП) направлен на контроль самого процесса и не связан непосредственно с удалением дефектных изделий, но помогает предотвратить изготовление дефектных изделий и облегчает проведение последующего контроля продукции.

Даже при безупречном контроле продукции, при правильном использовании средств обратной связи может быть осуществлен эффективный контроль процесса производства.

В производстве ИМС контроль процесса производства обеспечивается следующим образом: наличием пунктов надзора службы контроля качества в процессе изготовления; технической оценкой процесса изготовления; производственным контролем; анализом отказов дефектных изделий.

Пункты надзора службы контроля качества. Контроль ТП представляет собой проверку процесса производства в точках, представляющих особый интерес. Например, если на изготовлении сварных соединений работают 30 операторов, то проверяется продукция всех 30 операторов и ежедневно выявляются три наихудших оператора. Внимание контролера каждый день сосредоточено на оценке качества работы оператора. Такой тип контроля называется контролем оператора.

Контроль, при котором для устранения недостатков оборудования требуется корректирующие мероприятия обслуживающего персонала, называется контролем оборудования. Примером такого контроля могут быть рентгеновская проверка, (X–R)–контрольная карта диффузионных печей, визуальное исследование продукции каждого оператора, занимающегося монтажом; проверка прочности соединений ИМС; контроль герметичности спаев.

Техническая оценка производственного процесса. Инженерный персонал производит выборочный анализ производственного процесса в нескольких критических точках. Электрические параметры измеряются выборочно от партии к партии для обеспечения контроля в данной точке. Примером этому может служить анализ процесса диффузии, который контролирует производственный процесс на данном этапе.

Производственный контроль. Регулярный контроль работы операторов, ритмичность работы линии, контроль оборудования, сравнение различных технологических линий – все это повышает качество изделий.

Анализ отказов дефектных изделий. Регулярные испытания на срок службы с анализом отказов проводятся на сериях однотипных изделий. Кроме того, изделия, отказавшие в выбранных точках технологического процесса, подвергаются анализу отказов обычным порядком. Учитывая это, контроль продукции и контроль производственного процесса могут быть отрегулированы таким образом, чтобы исключить механизмы отказов, которые не могли быть обнаружены раньше.

Анализ полной системы контроля качества, которая применяется в ТП, показан в технологических картах. В этих картах приводится также краткое описание каждой контрольной точки.

Система управления ТП с помощью вычислительных машин представляет еженедельно отчет о состоянии контроля в отдельных точках ТП. Так как характеристики ТП в контролируемых точках меняются, проводится их анализ, сопоставляются полученные процентные соотношения со средними значениями, полученными ранее, и вычисляются значения расхождений. Те контрольные точки ТП, которые характеризуются значительным расхождением в дальнейшем разбираются более подробно с тем, чтобы дать точную причину этих расхождений с описанием преобладающих дефектов. После чего работа этого участка технологического производства анализируется и принимаются необходимые корректирующие меры. Обобщенный анализ по всему ТП проводится еженедельно и сообщается всем отделениям управления. Такая система отчета в сочетании со своевременной обратной связью обеспечивает эффективный контроль ТП.

Преимущество приведенной системы контроля коротко характеризуется следующими особенностями:

1. Гибкость системы, то есть приспособляемость к изменениям ТП и к изменениям, диктуемым самой системой.

2. Затраты оптимизируются системой, то есть ТП и изготовление изделий могут быть приостановлены до того, как будет выполнена бесполезная работа в случае значительных расхождений точек процесса от усредненного стандартного. Кроме того, система контроля привлекает внимание к причинам появления дефектной продукции так, что могут быть своевременно осуществлены корректирующие действия для ее предотвращения.

3. Одна и та же система может быть применена для различных этапов изготовления и для требований различной степени жесткости по качеству и надежности изделий.

4. Система сочетает в себе преимущества, как контроля технологического процесса, так и контроля продукции.

5. Максимальное использование результатов благодаря проведению своевременных корректирующих мероприятий по стабилизации ТП.

Таким образом, система предлагает практические решения взаимосвязи двух следующих видов контроля:

- контроля продукции, который осуществляется 100%–ной проверкой и сортировкой;

- контроля ТП, реализуемого проведением корректирующих мероприятий в процессе производства на основании результатов контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриев, Д.Л. Конструкционные методы повышения надёжности интегральных схем / Д.Л. Ануфриев, М.И. Горлов, А.П. Достанко. – Минск: Интегралполиграф, 2007. – 264 с.
2. Бер, А.Ю. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. Ю. Бер, Ф.Е. Минскер – М.: Высшая школа, 1986. – 279 с.
3. Блихер, А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов/ Пер. с англ. В.М. Волле, Л.С. Костиной; Под ред. И.В. Грехова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд.-ние, 1986. – 248 с.
4. Бочкин, О.Ч. Механическая обработка полупроводниковых материалов / О.Ч. Бочкин, В.А. Брук, Т.М. Никифорова-Денисова – М.: Высшая школа, 1977.– 140 с.
5. Бургер, Р. Основы технологии кремниевых ИС: Окисление, диффузия, эпитаксии / Р. Бургер., Р. Донован. – М.: Мир, 1969. – 454 с.
6. Вавилов, В.С. Дефекты в кремнии и на его поверхности / В.С. Вавилов, В.Ф. Киселёв, Б.Н. Мукашев – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 216 с.
7. Вакуумная техника. Справочник, под ред. Е.О. Фролова, В.Е. Минайчева – М.:, Машиностроение, 1985. – 360 с
8. Василевич, В. П., Химическая обработка в технологии ИМС / В.П. Василевич, А.М. Кисель, А.Б. Медведева, В.И. Плебанович, Ю.А. Родионов. – Полоцк: ПГУ, 2001.– 206 с.
9. Гаврилов, С. А. Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники / С. А. Гаврилов, А. Н. Белов. – М.: Высшее образование, 2009. – 257 с.
10. Горлов, М.И. Обеспечение и повышение надёжности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства / М.И. Горлов, Л.П. Ануфриев – Минск: Бестпринт, 2003. – 202 с.
11. Готра, З.Ю. Технология микрoeлектронных устройств: Справочник / З.Ю. Готра – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
12. Гурский, Л.И. Интеллектуальные системы автоматизированного проектирования БИС и СБИС / В. А. Мищенко, Гурский Л.И. [и др.]. – М. : Радио и связь, 1988.
13. Гурский, Л.И. Структура, топология и свойства пленочных резисторов / Л.И. Гурский, В.А. Зеленин, А.П. Жебин, Г.Л. Вахрин – Минск : Наука и техника, 1987. – 369 с.
14. Гурский, Л.И. Зарядовые свойства МОП-структур / Л.И. Гурский, Н.В. Румак, В.В. Куксо– Минск : Наука и техника, 1980. – 200 с
15. Гурский, Л. И. Проектирование микросхем / Л. И. Гурский, В. Я. Степанец. – Минск: Н-ка і тэх-ка, 1991. – 295 с.
16. Достанко, А.П. Технология интегральных схем: Учеб. пособие для радиотехн. спец. Вузов / А.П. Достанко – Минск: Выш. школа, 1982. – 206 с.

17. Емельянов, В. А. Корпусирование интегральных микросхем / В.А. Емельянов – Минск: Полифакт, 1998 – 387 с.
18. Емельянов, В. А. Технология микромонтажа интегральных схем / В.А. Емельянов – Минск: Бел наука, 2002. – 335 с.
19. Емельянов, В. А. Эпитаксиальные слои кремния и германия для интегральных микросхем / В.А. Емельянов, А.С. Турцевич, О.Ю. Наливайко – Минск.: Интегралполиграф, 2008. – 288 с.
20. Зи, С. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ./ Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
21. Зи, С. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ./ под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 453 с.
22. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
23. Интенсификация процессов формирования твёрдотельных структур концентрированными потоками энергии: монография / А. П. Достанко и [и др.]; под общ. ред. А. П. Достанко и Н. К. Толочко. – Минск: Бестпринт, 2005. – 682 с.
24. Козырь, И. Я. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Кн. 1. Общая технология / И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов и др. – М.: Высш. шк., 1989. – 233 с.
25. Концевой, Ю.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов – М.: Радио и связь, 1982 – 202 с.
26. Курносов, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.И. Курносов, В.В. Юдин – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк, 1986. – 368 с.
27. Ланин, В.Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин, А.П. Достанко, Е.В. Телеш. – Минск: Изд. центр БГУ, 2007. – 574 с.
28. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс – М.: Мир, 1989. – 630 с.
29. Минайчев, В.Е. Нанесение пленок в вакууме. Кн. 6 / В.Е. Минайчев – М.: Высшая школа, 1989. – 110 с.
30. Моряков, О.С. Элионная обработка. Кн. 6 / О.С. Моряков – М.: Высшая школа, 1990. – 127 с.
31. Никифорова–Денисова, С.Н. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Кн. 4. Механическая и химическая обработка / С.Н. Никифорова – Денисова. – М.: Высш. шк., 1989. – 95 с.
32. Онегин, Е.Е. Автоматическая сборка ИС / Е.Е. Онегин, В.А. Зенькович, Л.Г. Битно. – Минск: Высшэйшая школа, 1990. – 382 с.
33. Парфенов, О.Д. Технология микросхем / О.Д. Парфенов – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
34. Пичугин, И.Г. Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин, Таиров Ю.М. – М.: Высш. шк., 1984. – 288 с.
35. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Том 2 / А.П. Достанко, С.В. Бордусов, И.В. Свадковский и

др.; Под общ. ред. А.П. Достанко. – Минск: ФУАинформ, 2001. – 244 с.

36. Статистические методы повышения качества / Под ред. Хитоси Куше. Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 301 с.

37. Технология тонких пленок. Справочник в 2-х томах. М.: Советское радио: Т. 1. – 662 с., Т. 2 – 768 с.

38. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т. 2 / С.П. Кундас, В.Л. Ланин, А.П. Достанко и др.; Под общ. ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2003. -224 с.

39. Фридман, Е.И. Герметизация радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977.– 360 с.

40. Ченг, Л. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры Пер. с англ./ Под ред. Л. Ченга, К. Плога. – М.: Мир, 1989. – 584 с.