

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования “Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники”

Баранов В.В.

Основные теоретические положения (конспект лекций)

по дисциплине

Системное проектирование больших и сверхбольших интегральных схем

Минск 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ, ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ, БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ БИС И СБИС, ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЯЕМЫХ РАСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	8
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ, ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА .....	8
1.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ БИС И СБИС.....	12
1.3. БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ БИПОЛЯРНЫХ БИС И СБИС .....	22
1.4. БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОП БИС .....	25
1.5. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОИЗВОДСТВУ БИС И СБИС. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МИКРОКЛИМАТ.....	25
1.5. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОИЗВОДСТВУ БИС И СБИС. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МИКРОКЛИМАТ.....	26
1.6. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАСХОДНЫМ МАТЕРИАЛАМ.....	31
<b>2. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАРШРУТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ КРИСТАЛЛОВ БИС И СБИС. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ</b> .....	34
2.1. РАЗНОВИДНОСТИ ЦИФРОВЫХ БИС И СБИС .....	34
2.2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ БИС И СБИС .....	37
2.3. СУЩНОСТЬ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА.....	41
2.3. СУЩНОСТЬ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА.....	42
2.4. АНАЛИЗ МАТРИЦЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА. МАТРИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАРШРУТОВ БИС И СБИС .....	43
2.5. СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА КРИСТАЛЛОВ БИПОЛЯРНЫХ БИС.....	45
2.6. СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА КРИСТАЛЛОВ КМОП БИС.....	48
<b>3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КРИСТАЛЛОВ БИС И СБИС. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ</b> .....	50
3.1. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БИС И СБИС, МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ.....	50
3.2. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ .....	55
3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ.....	58
<b>4. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОГО ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР</b> .....	65
4.1. ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР.....	65
4.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЁРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ИЗДЕЛИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	66
<b>5. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ БИС И СБИС. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СТАНДАРТОВ КАЧЕСТВА НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ</b> .....	71
5.1. КАЧЕСТВО И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ.....	72

5.2. Основы устойчивого проектирования технологии БИС.....	72
5.3. Тестирование и контроль БИС и СБИС.....	74
5.4. Методы повышения помехоустойчивости БИС и СБИС.....	75
<b>6. МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ БИС И СБИС. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫХОД ГОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ.....</b>	<b>78</b>
6.1. Модели деградации элементов структуры БИС.....	78
6.2. Выявление и отбраковка БИС и СБИС со скрытыми дефектами.....	82
<b>7. СБИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЛОКА МИКРОМОНТАЖНЫХ ОПЕРАЦИЙ.....</b>	<b>87</b>
7.1. Основы маршрутной технологии микромонтажных операций.....	87
7.2. Особенности сборки БИС на выводной рамке.....	91
<b>8. МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ЧЕРТЕЖЕЙ БИС.....</b>	<b>94</b>
<b>9. ОСНОВЫ БЕЗДЕФЕКТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА БИС.....</b>	<b>95</b>
<b>10. МОДЕЛИ И БИБЛИОТЕКИ ДЛЯ СИНТЕЗА ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА БИС.....</b>	<b>99</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Предмет дисциплины – основы проектирования и производства изделий микроэлектроники, прежде всего, больших интегральных схем (БИС) и интегральных микросхем средней степени интеграции (СБИС), предназначенных для создания современных радиоэлектронных средств.

Цели дисциплины – формирование у студентов творческого потенциала и необходимого объема знаний в области проектирования и оптимизации технологии производства БИС и СБИС.

Задачи изучения дисциплины устанавливаются образовательным стандартом специальности и входящей в него квалификационной характеристикой специалиста. В результате изучения дисциплины студент должен

знать:

- особенности проектирования и производства конкурентоспособных БИС и СБИС;
- основы матричного проектирования и оптимизации маршрутной технологии БИС и СБИС;
- основы компьютерного моделирования и оптимизации технологии изготовления кристаллов БИС и СБИС;
- технические основы тестирования и контроля БИС и СБИС;

уметь:

- анализировать и синтезировать маршрутную технологию БИС и СБИС и оценивать эффективность маршрутов;
- обосновывать выбор контрольных операций в маршрутной технологии БИС и СБИС;
- разрабатывать документацию на маршрутные технологические процессы;

иметь представление:

- о перспективных направлениях в развитии технологии и производства изделий микроэлектроники;
- о современных методах и средствах контроля параметров БИС и СБИС;
- об основных изделиях микроэлектроники, выпускаемых предприятиями электронной промышленности Республики Беларусь.

Программа дисциплины рассчитана на 111 часов учебных занятий, включая 80 часов лекций, 14 часов лабораторных занятий и 17 часов практических занятий по тематике курсового проектирования.

*Основные понятия и определения: технология, технологическая операция, технологический процесс, технологический метод и др. Важнейшие этапы становления СБИС-темного подхода в разработке технологии и подготовке производства изделий электронной техники (ИЭТ). Основные принципы интегральной технологии: групповая обработка, технологическая совместимость элементов, универсальность процессов обработки, унификация подложек, высокая точность поддержания режимов*

*процессов, строгая последовательность технологических операций, высокая чистота производства.*

Одним из важнейших направлений научно-технического прогресса в настоящее время является развитие радиоэлектроники и особенно микроэлектроники, позволяющей значительно повысить технический, технологический и организационный уровни производства. Основной элементной базы радиоэлектроники являются современные изделия микроэлектроники (ИС различной степени интеграции), оптоэлектроники и других видов функциональной электроники.

Использование полупроводников в электронике до 1948 г. было весьма ограниченным. С момента изобретения У.Шокли, Дж.Бардином и У.Браттейном в 1948г. полупроводникового транзистора началось освоение электроники полупроводниками. В 1950г. методом выращивания слитка Ge из расплава был создан первый плоскостный транзистор с р-п-р-структурой. Тогда же начал развиваться метод сплавления, а в 1953г. были изготовлены Ge сплавные транзисторы с "тонкой" (~5 мкм) базой. Преобладание Ge на первом этапе развития полупроводниковой электроники было обусловлено тем, что монокристаллы Ge можно было получать проще, чем Si. В 1954г. появились первые Si транзисторы с выращенным р-п-переходом, а в 1958 г. диффузионные транзисторы с мезаструктурой (mesa-плато).

Появление первых транзисторов способствовало усиленному развитию вычислительной техники и радиоэлектронного оборудования самолетов, ракет СБИСтем космического управления. Например первой ЭВМ (США) использовалось 18000 электронных ламп, она занимала площадь 140 м<sup>2</sup>, вес - 30т, потребляла 150 кВт энергии (представьте себе помещение, в котором на каждом 1 м<sup>2</sup> стоит по электрокамину мощностью в 1 кВт. Но главное было не в этом. Основной была проблема надежности. Электронные лампы имели срок службы ~500-1000 часов. За это время отказывало ~2% ламп. Если в простейшей отечественной машине "Урал" использовалось ~1000 ламп, то за 1000 часов работы выходило из строя 20, а значит время безотказной работы ЭВМ составляло 50 часов. При 10000 лампах среднее время безотказной работы сокращается до 5 часов, т.е. через каждые 5 часов необходимо было искать отказавшую лампу среди 10000 ламп, заменить ее и тестировать машину. В современных ЭВМ таких элементов должно быть сотни тысяч, а иногда и миллионы.

Проблема надежности еще больше важна для бортовой аппаратуры ракет и самолетов. Кроме этого для последних огромное значение имеют размеры и масса РЭС, а также количество потребляемой энергии. Каждый лишний кг РЭС увеличивает полетную массу самолета на ~5 кг, массу ракеты на 50 кг. Представьте сколько же РЭС, помещается на ракете, если учесть что, стоимость РЭС составляет до 70% стоимости ракеты.

Только появление транзистора с его высокой надежностью, малой потребляемой мощностью и малыми размерами позволило решить задачи неразрешимые с помощью электронных ламп.

Следующим шагом в развитии полупроводниковой электроники стало появление планарного (planar - плоский) процесса в 1959 г. Планарная технология на многие годы обусловила прогресс в производстве полупроводниковых приборов.

Развитие электроники привело к появлению новой ее области - микроэлектроники.

Микроэлектроника - это раздел электроники, охватывающий исследования и разработку качественно нового типа электронных приборов ИМС - и принципов их применения.

ИМС (или просто ИС) - это совокупность взаимосвязанных компонентов (транзисторов, резисторов, диодов), изготавливаемая в едином технологическом цикле (т.е. одновременно), на одной и той же несущей конструкции - подложке - и выполняющая определенную функцию преобразования информации.

Развитие современной микроэлектроники и в частности ее базового технологического процесса - планарного - не могло быть возможным без созданного в 1960 г. процесса эпитаксиального наращивания слоев полупроводников требуемой толщины и электрофизических свойств.

В 1959 г. была изготовлена первая ИМС триггера на кристалле Ge, а в 1960 г. появились ИМС на Si, изготовленные по планарной технологии.

В 1958 г. был создан полевой транзистор с управляющим р-п - переходом, в 1962 - 1963 гг. созданы новые ИМС на таких транзисторах. В середине 60-х годов в промышленности появился метод полной имплантации, позволяющий вводить заданное количество примесей в полупроводник на заданную глубину. В начале 70-х годов интенсивно начали использоваться методы ионного и ионно-плазменного распыления, были разработаны процессы электронной литографии и появилась технология "сухой" обработки структур, т.е. без применения жидких травителей и растворителей. В эти же годы были разработаны СБИСемы машинного проектирования микросхем. В конце 70-х появились автоматизированные технологические процессы и оборудование, управляемые микро-ЭВМ. В течении последующих десятилетий микроэлектроника и технология микроэлектроники развивались по пути создания новых схемотехнических решений ИМС, разработки современных конструкций, решения вопросов топологии и технологии элементов ИМС.

При этом все эти меры были направлены на уменьшение степени интеграции изделий, которая зависит от:

- размеров элементов изделия (транзистора), топологический размер (проектная норма);
- числа элементов на одном кристалле;
- площади кристалла.

При этом по мере развития микроэлектроники роль различных факторов изменялась. Так с 1960 по 1975 г. степень интеграции возросла в 64 тыс. раз. При этом размеры кристаллов возросли в 20 раз, а плотность размещения элементов в 32 раза.

Изменение схемотехнических решений позволило повысить количество элементов на кристалле в 100 раз. В последние годы повышение степени

интеграции в 4 раза происходит за 1-3 года, при этом возможности схемотехники практически исчерпаны, а дальнейший процесс развития возможен благодаря минимизации размеров элементов, изолирующих областей между ними, уменьшение площади, занимающей токопроводящими СБИСтемами.

Считается, что размеры приборов (транзисторов) могут уменьшаться до тех пор, пока не будут достигнуты минимальные линейные размеры, ограниченные физическими параметрами, положенными в основу работы элементов, или возможностями получения требуемых размеров и соответствующих допусков, определяемых технологическим оборудованием.

Производство БИС и СБИС включает определенный ряд последовательно и параллельно проводимых обработок - операций при выполнении всего комплекса которых получают готовые изделия микроэлектроники (ИМЭ). В технологическом процессе изготовления ИМЭ на различных этапах процесса изделие подвергается воздействию чрезвычайно большого числа факторов. Причем степень влияния этих факторов различна, а их совместное влияние приводит к большому разбросу электрофизических параметров ИМЭ.

Для каждого конкретного процесса (диффузия, эпитаксия и т.д.) таких факторов может быть несколько десятков, а в течение всего технологического процесса ИМЭ подвергается воздействию несколько сотен технологических факторов (Т, t, Р, ток и т.д.). Поэтому анализировать весь ТП возможно только на основе СБИСтемого подхода с применением ЭВМ.

Технологический процесс (ТП) - часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. ТП состоит из технологических операций (ТО).

Технологическая операция - законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. ТО включает в себя различное число технологических переходов.

Технологический переход - законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке. Технологический режим - совокупность значений параметров технологического процесса в определенном интервале времени.

Технологическое оборудование - средства технологического оснащения, в которых для выполнения определенной части технологического процесса размещаются материалы или заготовки, средства воздействия на них, а также технологическая оснастка.

Технологическая оснастка - средства технологического оснащения определенной части технологического процесса.

Приспособление - технологическая оснастка, предназначенная для установки или направления предмета труда или инструмента при выполнении технологической операции.

Материал - исходный предмет труда, используемый для изготовления изделий микроэлектроники.

1. Классификация интегральных микросхем, подготовительные операции, базовые элементы БИС и СБИС, особенности производства и применяемых расходных материалов

1.1. Классификация интегральных микросхем, особенности их производства

*Укрупнённая классификация интегральных микросхем, БИС и СБИС. Особенности технологии БИС при их масштабировании. Общепризнанный рынок продаж. Тенденции развития спроса. Изделия микроэлектроники, выпускаемые предприятиями электронной промышленности Республики Беларусь.*

Все интегральные микросхемы (ИС) можно классифицировать по конструктивно-технологическим признакам, функциональному назначению, структуре базового элемента и др.

По характеру обработки электрического сигнала ИС делятся на два больших класса: логические (цифровые) и линейные (аналоговые). По конструктивно-технологическим признакам все ИС можно разделить на три группы:

1 - полупроводниковые и совмещенные ИС (ППИС);  
2 - гибридные ИС (ГИС);  
3 - пленочные и прочие ИС (к ним также относят вакуумные и керамические ИС).

Полупроводниковые ИС - это ИС, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводникового кристалла.

Совмещенная ИС - это ИС, часть элементов которой выполнено на поверхности полупроводниковых кристалла в виде металлических пленок.

ГИС - это ИС, часть элементов которой (обычно пассивные) выполнены в виде пленок (1-2 мкм - тонкопленочная, 10-70 мкм - толстопленочная), а другая часть - в виде кристаллов полупроводниковых ИС или микроминиатюрных ЭРЭ, расположенных на диэлектрической подложке и электрически связанных между собой пленочными межэлементными соединениями.

Пленочная ИС - это схема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в виде пленок на диэлектрической подложке (при этом элементы преимущественно изготовлены методами вакуумного нанесения).

Толстопленочная ИС - это схема с толщиной пленок 10-70 мкм, элементы которой изготавливаются методами трафаретной печати (сеткография).

Различия между тонко- и толстопленочными ИС может быть количественным и качественным. К тонкопленочным ИС относят ИС с толщиной пленок < 1 мкм, к толстопленочным ИС - ИС с толщиной пленок 10-70 мкм. Качественные различия определяются технологией изготовления пленок. Элементы ТП ИС формируют вакуумными методами, а элементы толстопленочных ИС получают преимущественно методом сеткографии с последующим вжиганием.

Все ИС разделяются по степени интеграции. Степень интеграции ИС - показатель степени сложности микросхемы, характеризуемый числом содержащихся в ней элементов и компонентов. Кроме степени интеграции (показатель  $K$ ) используется термин плотности упаковки ИС, который определяет отношение числа элементов и компонентов ИС к ее объему (объем выводов не учитывается). Степень интеграции  $K$  определяется как :

$$K = \lg N ,$$

где  $N$  - число элементов и компонентов, находящихся в кристалле и на поверхности ИС. Показатель  $K$  округляется до ближайшего целого числа.

ГОСТом предусмотрена классификация по показателю  $K$  (ГОСТ 17021-75):

1 степень:  $N \leq 10$  ,  $0 < K < 1$  ;

2 степень:  $10 < N < 100$  ,  $K = 2$  ;

3 степень:  $100 < N < 1000$  ,  $K = 3$  и т. д.

В технической литературе используют также следующие термины: ИС (малой степени интеграции), СБИС (средней степени интеграции), БИС (большие ИС), СБИС (сверхбольшие ИС) и УБИС (ультрабольшие ИС). Такое деление правомерно для цифровых ИС. Для них берется:

$$K = \log_2 N ,$$

ИС -  $K = 1-5$ ; СБИС -  $K = 6-10$ ; БИС -  $K = 11-16$ ; СБИС -  $K = 16-21$ .

Подавляющее число логических ИС выпускаются в виде полупроводниковых, в то время как линейные ИС в основном изготавливаются по гибридной технологии.

Основные принципы технологии микроэлектроники - групповой метод и планарная технология - были известны еще до изготовления ИС. Эти методы были освоены в дискретной транзисторной технике в конце 50-х годов. При изготовлении транзисторов, например, осуществлялась их технологическая интеграция (по времени), обусловленная групповым методом изготовления. Групповой метод состоит в том, что на одной или чаще многих полупроводниковых пластинах одновременно формируют определенное число ЭРЭ (резистор, транзистор, диод). Сущность планарной технологии заключается в том, что одновременно формируемые элементы расположены или на поверхности подложки (ГИС) или в приповерхностном слое полупроводниковых пластины (plane плоскость).

Затем подложки или пластины разрезают (скрайбируют) на кристалл или платы. Каждый кристалл при этом будет содержать определенный ЭРЭ (R, D, T и т.д. – рисунок 1.1).

Если же на исходной пластине вместо отдельных ЭРЭ формируют такими же методами комплекс ЭРЭ функционального узла (R + D + T), то после соответствующего разделения пластины на кристаллы получают уже кристаллы ИС, выполняющих определенную функцию (рисунок 1.2).

Термин кристалл официально принят для готовых полупроводниковых приборов и ИС без внешних выводов и корпуса. Однако этот принцип несколько неудачен, т.к. он совпадает с общим физическим понятием

кристалла. В зарубежной литературе используется специальный термин "чип" - (chip).

Таким образом, интегральной микросхемой (ИС) называют изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала, и имеющую высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и кристаллов, рассматриваемое с точки зрения требований к испытаниям, приемке и эксплуатации как единое целое. ИС - содержит элементы и компоненты.

Элементом ИС называется часть схемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента (например, транзистора, диода, резистора). Эта часть выполняется неразделимо от кристалла или ее подложки. Элемент не может быть отделен от ИС как самостоятельное изделие, поэтому его нельзя испытать и эксплуатировать.

Компонентом ИС также называется её часть, реализующая функции какого-либо электрорадиоэлемента. Однако эта часть перед компонентом является самостоятельным изделием. Компонент в принципе может быть отделен от изготовленной ИС.

Подложка ИС - диэлектрическое основание для пленочных или гибридных ИС.

Плата ИМС - часть подложки пленочной или гибридной ИС.

Пластина - монокристаллическая полупроводниковая подложка, вырезанная из слитка полупроводникового материала и предназначенная для изготовления полупроводниковой ИС.

Кристалл ИМС - часть полупроводниковой пластины в объеме и на поверхности которого сформированы элементы единичной ИС.

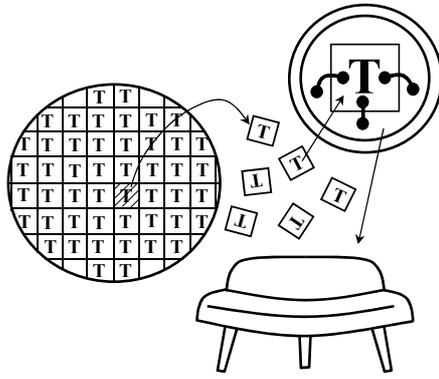


Рисунок 1.1 – Групповой метод изготовления дискретных элементов (транзисторов)

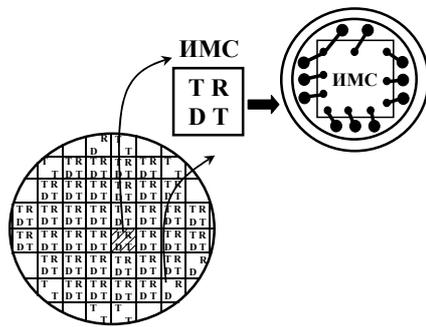


Рисунок 1.2 – Групповой метод изготовления ИС

## 1.2. Технология изготовления кремниевых пластин для БИС и СБИС

*Кремний, как основной материал полупроводниковых БИС и СБИС. Технологический маршрут получения пластин. Методы ориентации монокристаллов. Методы резки слитков на пластины. Абразивные материалы для механической обработки. Технологические особенности изготовления пластин для СБИС. Автоматизация обработки пластин. Технохимические методы удаления материалов с поверхности пластин.*

Основным полупроводниковым материалом для электронной промышленности является Si, встречающийся в природе в виде кремнезема или силикатов. ИМЭ на основе Si составляет 98% всех производимых в мире полупроводниковых приборов. Кремний по степени распространения в природе находится на втором месте, уступая только кислороду. Он составляет 25% по весу всей земной коры. Доминирующее использование Si в полупроводниковой электронике связано не только с его широким распространением в природе, но и его свойствами. Так ширина запрещенной зоны Si составляет 1,12 эВ, а для Ge 0,66 эВ, что сказывается на стабильности характеристик приборов (для Ge приборов выше токи утечки). Рабочий диапазон Si приборов доходит до 150°C, а Ge - до 100°C.

Собственный Si имеет высокое удельное сопротивление ~230000 Ом·см, а Ge только 47 Ом·см, что затрудняет изготовление на основе Ge приборов с высокими пробивными напряжениями. Кроме того стоимость кремния высокого уровня чистоты в 10 раз ниже стоимости Ge. Однако же основные достоинства Si по сравнению с Ge и GaAs связаны с его высокой технологичностью: на Si легко получать защитные окисные пленки (окислы Ge растворяются в воде, а на GaAs очень сложно вырастить окисные пленки, т.к. элементы Ge и As окисляются с различной скоростью); Si легко легировать и т.д.

Основной объем монокристаллического Si (80 - 90%), потребляемого электронной промышленностью, выращивается по методу Чохральского. Фактически весь Si, используемый для производства ИС, производится этим методом. Сырьем для получения монокристаллического Si является электронный Si, представляющий собой поликристаллический материал высокого уровня чистоты. Основные примеси в электронном Si это В, С<sub>2</sub> и О<sub>2</sub>. Концентрация легирующих элементов в чистом Si не должна превышать 10<sup>-7</sup> ат.%, а углерода - 2·10<sup>-4</sup> ат.%. Методом Чохральского получают монокристаллы диаметром до 250 мм и длиной до 3 м. Монокристаллы, полученные данным методом, содержат примеси и дефекты.

Кислород - случайная примесь в Si, образующаяся в результате растворения материала тигля (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> и др.). Диапазон концентраций О<sub>2</sub> в слитке 5·10<sup>17</sup> - 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>. Наличие О<sub>2</sub> в слитке приводит к формированию доноров и образованию дефектов за счет собственной преципитации О<sub>2</sub>. Наличие доноров изменяет удельное сопротивление кристаллов за счет

легирования.

Донорные комплексы нестабильны при  $T > 500^{\circ}\text{C}$ , поэтому для их растворения используется отжиг слитков при температурах 600 - 700 $^{\circ}\text{C}$ .

Преципитат представляет собой фазу  $\text{SiO}_2$ . С формированием преципитатов связано образование в слитке ряда дефектов, включая дефекты упаковки. Эти дефекты захватывают примеси быстро диффундирующих металлов, приводя к увеличению токов утечки p-n-переходов. Способность дефектов захватывать нежелательные примеси (эффект геттерирования) может быть использован для улучшения свойств подложек (электрофизических).

Углерод – другой вид случайной примеси. Он является в Si примесью замещения. Его концентрация  $10^{16} - 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . При таких концентрациях он не выделяется в преципитаты, подобно  $\text{O}_2$ , и не становится электрически активным. Однако C оказывает влияние на преципитацию  $\text{O}_2$  и способствует дефектообразованию.

Конструктивным фундаментом любой ИС является подложка. В зависимости от конструктивно-технологического варианта ИС (п/п, ГИС) различают два вида подложек: активные (полупроводниковые: Si, Ge, GaAs, GaP) и пассивные (диэлектрические: стекло, ситалл). Полупроводниковые подложки называются пластинами.

Технологический процесс получения Si-пластин включает в себя ряд крупнее процессов (операций):

1. Выращивание монокристалла.
2. Получение заданного диаметра монокристалла обдиркой.
3. Получение ориентированного базового среза.
4. Снятие механических напряжений травлением монокристалла.
5. Кристаллографическая резка кристалла на пластины.
6. Получение пластин заданной толщины односторонней или двусторонней шлифовкой, формирование плоскопараллельной поверхности и уменьшение дефектного слоя.
7. Получение округленных кромок пластин (фаска).
8. Удаление нарушений поверхности пластин травлением.
9. Создание геттеродефектов упаковки путем формирования нарушенного слоя с обратной стороны пластины.
10. Получение поверхности пластин 14 класса чистоты полировкой.
11. Очистка поверхности пластин от загрязнений "мокрыми" и "сухими" процессами.
12. Контроль геометрических, электрических, кристаллографических параметров и качества поверхности.

В интервале между основными операциями механической обработки осуществляется ряд операций контроля и оценки качества обработки. Готовая подложка должна удовлетворять целому ряду требований к геометрическим размерам, которые определяются условиями технологии производства полупроводниковых приборов.

Монокристаллы выращенные методом Чохральского или зонной плавки, имеют стандартную ориентацию [111] и [100] с отклонением до 2' и по спецзаказам - [110] и [011]. На монокристалле определяют плоскость базового и дополнительного срезов. Базовый и дополнительный срезы получают методом шлифовки монокристаллического слитка вдоль образующей. Самый большой базовый срез называют основным. Его обычно располагают определенным образом относительно некоторого кристаллографического направления. Основной базовый срез служит для :

- 1) ориентации пластины одинаковым образом в технологических установках с автоматизированным ориентированием;
- 2) ориентации ИС относительно кристаллографических направлений строго определенным образом.

Малые базовые срезы называются дополнительными и предназначены для распознавания ориентации и типа проводимости подложек.

Они обеспечивают быструю сортировку и идентификацию пластин при их случайном перемешивании.

При получении базовых срезов и при дальнейшей механической обработке слитка (резке и т.д.) учитывают его ориентацию.

Для большинства изделий микроэлектроники точность ориентации пластины относительно требуемого кристаллографического направления имеет определяющее значение для всех последующих технологических операций. Монокристаллы ряда полупроводников выращивают обычно по направлению [111]. Однако в процессе роста кристаллов возможны отклонения их ориентации от заданного направления так, что геометрическая ось цилиндрического слитка окажется отличающейся от кристаллографической оси [111]. Цель операции ориентации - нахождение несоответствия между геометрической осью слитка и заданным кристаллографическим направлением.

Существует два основных способа определения заданного кристаллографического направления:

1. Рентгенографический способ. Основан на том, что интенсивность рассеивания рентгеновских лучей зависит от плотности упаковки атомов в облучаемой плоскости. Для наиболее плотно упакованной плоскости [111] наблюдается и наибольшая интенсивность рассеивания. В тоже время для каждого вещества характеристическое рентгеновское излучение отражается от соответствующей кристаллографической плоскости под строго определенным углом (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Углы отражения от различных плоскостей для Ge и Si

Материал	Углы рассеивания для плоскостей		
	[111]	[110]	[100]
Ge	17° 14'	28° 56'	43° 10'
Si	17° 56'	30° 12'	45° 23'

Явление дифракции рентгеновских лучей наблюдается при условии

выполнении закона Вульфа-Брэгга

$$2d \cdot \sin Q = n \cdot L, \quad (1.1)$$

d - межплоскостное расстояние;

Q - угол между падающим лучом и кристаллографической плоскостью;

n - период отражения (n = 1);

L - длина волны рентгеновского излучения.

Этот способ обеспечивает точность 3-5° при времени 15 - 30 мин.

2. Оптический метод. Основан на различии формы и характера симметрии фигур травления, образующихся в местах выхода на поверхность дислокаций. Эти фигуры появляются при обработке поверхности селективными травлениями. На плоскости [111] ямки травления имеют вид тетрагональных пирамид с треугольным основанием; на [110] - вид пирамид с ромбическим основанием и т.д. Отражаясь от граней ямок травления, световой пучок воспроизводит на экране соответствующие характерные теневые фигуры. При отклонении от заданного кристаллографического направления симметрия теневых фигур нарушается. Фигуры смещаются на некоторый угол и их очертания искажаются. Точность ориентации составляет 3 - 15'.

При резке Si-слитков на пластины в качестве режущего инструмента применяют металлические диски с внутренней алмазной режущей кромкой (рисунок 1.3). Инструмент представляет собой диск (металлический) с центральным отверстием, на кромку которого нанесена алмазная крошка. Толщина диска 0.1 - 0.15 мм, а диаметр отверстия зависит от диаметра разрезаемого слитка. Принцип резания заключается в следующем: режущий диск растягивается и закрепляется в специальном барабане на головке шпинделя. Слиток разрезается кромкой с алмазной крошкой при вращении шпинделя ( $V_{вр} = 3000 - 5000$  об/мин). Скорость движения слитка ~40-50 мм/мин. После отрезания очередной пластины с помощью СБИСтемы автоматики происходит возврат слитка в исходное положение, а также перемещения его на заданный шаг.

Аналогично происходит резанье слитка с использованием дисков с наружной режущей кромкой (рисунок 1.4).

Насыщение кромки алмазом производят методом шаржирования (горячая запрессовка в металл) или гальваническим способом. Ширина алмазной кромки ~1,5 - 2,0 мм.

Недостаток метода - большая толщина механически нарушенного слоя, сложность установки инструмента и наладки оборудования.

Кроме этих методов используют

1. Резанье слитков стальными полотнами с абразивной суспензией.

В настоящее время используется редко. Суть метода: стальные полотна из сталей марок У8А, У10А устанавливают в кассетах в количестве до 100 шт. в каждой и разделяют прокладками, толщина которых определяется толщиной

пластины. В зону резания непрерывно подается абразивная суспензия. Скорость движения кассеты 600 двойных ходов в минуту. Скорость резания ниже, чем алмазосодержащими дисками 10-15 мм/ч. Преимущество метода - малая ширина реза (~2 ширины полотна) и меньшая толщина механически нарушенного слоя (рисунок 1.5).

2. Резанье слитков проволокой - метод аналогичен. Различие состоит только в геометрии носителя абразива. Проволоку изготавливают из W или сплава MB-50 (50% W + 50% Me), диаметр проволоки 0,1-0,15 мм. Преимущество метода - еще меньший размер реза.

Недостаток - невозможность резания на большую глубину из-за увода проволоки и нарушения геометрии пластин (рисунок 1.6).

Абразивные материалы отличаются между собой размером (крупностью зерен), имеют номера 200, 160, 125, 100, ..., 3, M40, M7, M5, M3 и делятся на 4 группы :

1. Шлифзерно - 200-16;
2. Шлифпорошки - 12-3;
3. Микропорошки - M63-M14;
4. Тонкие микропорошки - M10-M3 (3 мкм).

К основным абразивным материалам относятся :

1. Электрокорунд - кристаллическая окись Al -  $Al_2O_3$ , получаемая в результате плавки глинозема. Твердость по шкале Мооса равна 9.

2. Карбид кремния (SiC)- химическое соединение Si с C , получаемое нагреванием смеси кварцевого песка с коксом в электропечах при  $T > 2000^\circ C$ . Твердость по шкале Мооса равна 9.2. Это хороший абразивный материал с высокими режущими свойствами. Чем меньше размеры его зерен, тем больше их плотность.

3. Карбид бора (BC) - тугоплавкое соединение B с C. По твердости карбид бора превосходит все абразивные материалы, уступая лишь алмазу. Однако по сравнению с другими абразивными материалами он хрупок.

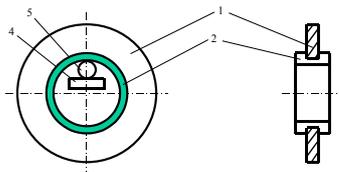


Рисунок 1.3 – Резка слитков дисками с внутренней режущей кромкой

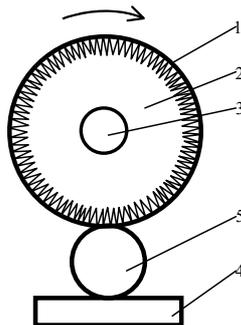


Рисунок 1.4 – Резка слитков дисками с внешней режущей кромкой

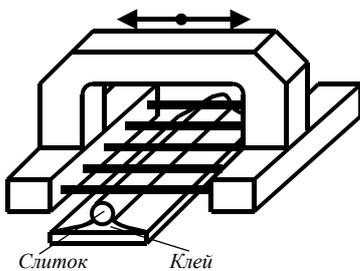


Рисунок 1.5 – Резка слитков стальными полотнами

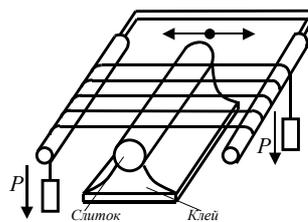


Рисунок 1.6 – Резка слитков стальными полотнами

Шлифование - это обработка пластин на твердых шлифовальных дисках, выполненных из чугуна, стекла или латуни, абразивными порошками с размером зерна 28-3 мкм или алмазными шлифовальными кругами зернистостью 120-5 мкм. Шлифование позволяет получить 9-12 класс чистоты.

Шлифование полупроводниковых пластин классифицируют:

- по состоянию используемого абразива - свободным и связанным абразивом;

- по характеру обработки - односторонние и двусторонние;

- по качеству обработанной поверхности - предварительное и окончательное;

- по способу базирования пластин - с креплением пластины на оправку (наклейка, вакуумный режим) и со свободным положением пластин в кассетах и сепараторах.

Наиболее распространенным видом шлифования является одностороннее шлифование свободным абразивом с наклейкой пластин на оправку. При шлифовании формируется нарушенный слой.

Шлифование можно вести сухим абразивом, но, как правило, используют абразивные суспензии, роль жидкости (чаще всего воды) в которых сводится к распределению зерен по поверхности шлифовальника и удалению разрушенных частиц полупроводника. При обработке связанным абразивом зерна закреплены в материале шлифовального круга.

Полирование пластин производят на мягких подложках из фетра велюра, батиста, пропитанных абразивными пастами на жировой основе с крупностью зерна 3-0.25 мкм. Класс чистоты при этом 14 и выше.

При полировании полупроводниковых пластин используют алмазные порошки и пасты. Пасты на основе кубического нитрида бора (эльбора), оксида алюминия, оксидов церия, хрома, кремния.

После шлифовки и полировки пластин возможно возникновение различных дефектов.

Основные виды дефектов формы пластин показаны на рис. 10.

Отклонение от параллельности (непараллельность) плоскостей (а)  $h$ ; отклонение от плоскости (неплоскостность) (б) и (в); прогиб пластины -  $f$  (г).

Контроль дефектов формы пластин проводят на промежуточных операциях и после окончательной обработки. Во избежание повреждений поверхности контроль производят бесконтактными оптическими или фотоэлектрическими методами. Толщина механически нарушенного слоя определяется рентгенографическим или электронографическим способом.

Поверхности 8 - 14 класса чистоты контролируют с помощью профилографов - профилометров, принцип действий которых основан на контактном слежении алмазной иглой за профилем поверхности с последующим преобразованием ее перемещений в электрические сигналы.

Поверхности 13 - 14 класса чистоты контролируют интерференционным способом с помощью микроскопов Линника, например МИИ-4.

После финишной обработки поверхность должна иметь не хуже 14,

неплоскостность не выше 4 мкм/см, отклонение от номинала по толщине  $\pm 10$  и по диаметру  $\pm 5$  мм.

В настоящее время используются подложки из Si, GaAs и сапфира, но доминирует Si.

Монокристаллы Si получают методом Чохральского (до 300 мм в диаметре) и методом зонной плавки (~120 мм). Стандартная ориентация [111] и [100] с отклонением до 2'.

Основные этапы изготовления пластин:

1. Калибровка монокристалла Si заключается в его шлифовке для формирования цилиндрической поверхности заданного диаметра с допусками  $\pm 0.2-0.5$  мм и создание плоских срезов - базового и дополнительного. Базовый срез необходим для идентификации ориентации подложек; дополнительный срез меньшей ширины - типа проводимости.

2. Резка на пластины осуществляется ленточными или дисковыми пилами, свободным или связанным абразивом.

3. Формирование фаски. Фаска формируется на периферийной части пластины после резки или шлифовки. В поперечном сечении фаска имеет форму овала. Фаску формируют шлифовкой, полировкой или травлением. Для формирования фаски используют только автоматизированные СБИС-стемы.

Наличие фаски предотвращает образование линии скольжения, царапание фотошаблонов, износ автоматизированного оборудования, трудности установки пластин в кварцевые и другие лодочки, скопление фоторезисторов по краю подложки, скол края и износ алмазного инструмента при скрайбировании. Существенное увеличение прочности края пластин с фаской демонстрирует такой пример: после тысячи операций загрузки и выгрузки в кварцевую лодочку 95% пластин с фаской не имеют сколов, в то время как пластины без фаски практически все непригодны.

4. Шлифовка и полировка. Шлифуются пластины свободным либо связанным абразивом, полируются же только свободным абразивом, чаще суспензией.

Обычно выход годных от резки монокристаллов до полировки пластин ~90%. Остальные пластины забраковываются или обрабатываются повторно.

5. Травление пластин обычно осуществляется между операциями резки, шлифовки и полировки. Наибольшую производительность этой операции обеспечивают групповая технология в кассетах или специальных корзинах.

6. Полировка обычно имеет две стадии - предварительную и финишную. Предварительная полировка удаляет нарушенный слой до глубины ~25 мкм в течение менее 20 мин. Финишные - снимают малое количество материала до полного удаления нарушенного слоя.

7. Введение геттера в подложку осуществляется для устранения

быстро диффундирующих примесей и кластеров точечных дефектов из приповерхностной рабочей зоны подложки. Геттер может быть расположен с рабочей, нерабочей стороны подложки и внутри ее. Соответственно он называется внешним и внутренним. Последнее время отдается введению внешнего геттера путем внесения нарушений шлифования, лазерным лучом, а

также внутреннему оксидному геттеру.

8. Очистка поверхности пластин. Это обычно очистки кистями, промывка, центробежная сушка и обдувка азотом.

9. Упаковка и хранение пластин. Для предохранения пластин от влияния внешней среды используется герметичная упаковка типа "FLIP-TRAN". Кассету герметично упаковывают в металлическую банку, заполненную чистым азотом при повышенном давлении. Если пластины сразу же идут в дальнейшую работу, то их не герметизируют.

В настоящее время существует 4 уровня автоматизации технологического процесса изготовления и обработки пластин:

- перенос пластин;
- обработка (оператор загружает кассеты и устанавливает параметр ТП);
- контроль и выбор режимов операций (оператор загружает кассеты, управляет работой, включая выбор режима работы ЭВМ);
- полный цикл, включая перенос кассет и отдельных пластин, а также выбор режима и последовательности операций.

Важной частью автоматизации является исключение операции ручного манипулирования, т.к. масса пластин велика (25 пластин Si диаметром 150 мм в кассете весят ~2 кг). При ручном манипулировании точность установки пластин в лодочку или другую оснастку снижается, при этом на оснастке или пластине появляются сколы. Исключение этого повышает выход годных на 2%.

В ряде фирм реализуется два варианта автоматизации и транспортировки пластин и подложек от одного рабочего места к другому:

1. Транспортер с дорожками, по которому перемещаются пластины (в кассетах или без них) в потоке фильтруемого воздуха.

2. Использование робота для подъема передачи и опускания пластин на рабочих участках.

Последняя схема наиболее предпочтительна, т.к. позволяет разместить оборудование в нужном месте. Обе СБИС-системы используют ЭВМ для контроля и записи перемещения пластин.

Основными целями технохимических процессов являются:

- получение чистой поверхности пластин (подложек);
- удаление с поверхности подложек механически нарушенного слоя;
- снятия с полупроводниковой пластины слоя исходного материала определенной толщины;
- локальное удаление исходного материала с поверхности подложек;
- создание определенных электрофизических свойств подложки;
- выявление структурных дефектов кристаллической решетки подложки;
- получение мезоструктур и профилированных поверхностей;
- осаждение гальванических покрытий.

Чистая поверхность необходима для качественного проведения процессов диффузии, эпитаксии, окисления и др. Поэтому основной целью технохимических процессов является удаление с поверхности исходных подложек различного рода загрязнений. Получение технологически чистой.

поверхности достаточно сложный процесс, который достигается проведением комплекса различных процессов: промывка в  $H_2O$ , УЗК-промывка в растворителях и т.д. Технологически чистой считается поверхность, которая имеет концентрацию примесей, не препятствующих воспроизводимому получению требуемых значений и стабильности параметров ИС. Для нежестких требований к ИС эта величина концентрации составляет 105-80 - 105-70 г/см<sup>2</sup>.

Удаление нарушенного слоя, образовавшегося в результате шлифовки и полировки, необходимо для получения атомарно-совершенной структуры поверхностного слоя. Именно в этом слое затем формируются активные элементы ИС и других изделий. Удаление механически нарушенного слоя можно осуществить химическим и газовым травлением, а также ионно-плазменной и плазмохимической обработкой.

Удаление с поверхности пластин слоя определенной толщины проводят для получения нужных толщин подложек. Требуемая толщина подложек определяется конкретным типом ИМЭ. Наиболее часто для цели удаления используют химическое травление полупроводниковых материалов в различных травителях.

Локальное удаление полупроводниковых материалов проводят для создания рельефа, который дает возможность решать конкретные вопросы конструирования и технологии. Локальное удаление обычно осуществляют электрохимической обработкой в электролите либо химическим травлением через защитную маску.

Технохимические процессы дают возможность регулировать и изменять электрофизические свойства поверхности полупроводниковой подложки такие как: поверхностную проводимость и скорость поверхностной рекомбинации. Наиболее эффективны при этом процессы химического травления, плазменной и плазмохимической обработки.

Технохимические процессы позволяют выявлять структурные дефекты полупроводниковых материалов на различных этапах обработки. К таким дефектам относятся: дислокации, дефекты упаковки, двойники и др. Их выявление проводят селективным химическим или ионным травлением.

Получение мезаструктур ("меза" - mesa - плато) - широко распространенный технологический прием при получении большого класса дискретных полупроводниковых приборов. Это касается mesa приборов с повышенным быстродействием т.к. площадь р-п-перехода, а значит и  $S_p$ -п снижается. Форма и геометрические размеры мезаструктур определяются локальной маской, а глубина типом, составом и режимом процесса травления.

Осаждение гальванических покрытий из металлов и сплавов позволяет создавать на поверхности полупроводниковой пластины токопроводящие дорожки, невыпрямленные контакты и пассивные элементы.

### 1.3. Базовые элементы биполярных БИС и СБИС

*Положение БИС и СБИС в общей классификации изделий электронной техники. Структура базовых элементов биполярных БИС и СБИС. Структура базовых элементов униполярных БИС и СБИС. Базовые элементы с инжекционным питанием. Интегрированные приборы с зарядовой связью. Особенности применения биполярных БИС и СБИС.*

По структуре базового элемента различают биполярные и униполярные ИС. В основе биполярных ИС лежат п-р-п и р-п-р транзисторы (рисунок 1.7).

Одним из перспективных направлений развития цифровых БИС являются схемы с инжекционным питанием. В этих схемах энергия, необходимая для преобразования или хранения информации, вводится инжекцией неравновесных носителей в базу через специальный инжекторный переход, смещаемый в прямом направлении. Простейшая конструкция транзистора с инжекционным питанием показана на рисунке 1.8. В отличие от обычного п-р-п транзистора данная структура содержит еще один электрод-инжектор (P1-область). Второе отличие заключается в изменении функций электронных областей N1 и N2: N1-эмиттер, N2-коллектор.

В этой структуре образуется практически два транзистора:

1. Транзистор р-п-р-типа образован инжекторной областью P1, играющей роль эмиттера, частью эмиттерной N1-области, служащей базой, и базовой P2-областью, выполняющей функции коллектора.

2. Транзистор п-р-п вертикального типа образован частью эмиттерной N1-области, примыкающей к ней, частью базовой P2-области и коллекторной N2-областью.

Если на инжекторный переход подано напряжение от внешнего источника питания E, смещающее его в прямом направлении, то инжектированные в эмиттер (N1-область) дырки диффундируют к эмиттерному переходу, захватываются полем перехода и комплексируют часть объемного заряда перехода N2-P2 со стороны базы. Вследствие этого эмиттерный переход сужается, потенциальный барьер снижается, т.е. переход смещается в прямом направлении. В результате начинается инжекция электронов из Э в Б и их дрейф к К, где они комплексируют часть объемного заряда коллекторного перехода, снижая тем самым его потенциальный барьер. К-переход смещается в прямом направлении, а транзистор переходит в режим насыщения, т.е. имеет малое R. Если соединить базу с эмиттером переключателем S, то напряжение между Б и Э будет равно "0", через транзистор потечет ток близкий к току инжекции и транзистор перейдет в активный режим, близкий к режиму отсечки. Сопротивление его при этом велико. Транзистор работает в режиме ключа.

Инжекционные схемы подразделяются по количеству используемых при их создании процессов (начинающихся на букву "И") на следующие :

ИЛ - интегральная логика; И<sup>2</sup>Л - интегральная инжекционная логика; И<sup>3</sup>Л - интегральная логика с изопланарной изоляцией; И<sup>4</sup>Л - интегральная ионно-

имплантированная логика (без изоляции) И<sup>5</sup>Л - интегральная ионно-имплантированная логика с изопланарной изоляцией.

В полупроводниковых ИС, кроме биполярных и МОП-транзисторов, базовыми элементами являются приборы с зарядовой связью (ПЗС). Технология создания ПЗС аналогична технологии МОП-структур (рисунок 1.9). На поверхности полупроводниковой подложки находятся близко расположенные металлические затворы (31, 32, 33, 34 и т.д.). Для инжекции зарядов на входе структуры выполняется диффузионный диод. Если по всем затворам приложить пороговое отрицательное смещение  $U_1$ , то у поверхности полупроводника n-типа образуется равномерный обедненный электронами слой. Увеличение смещения до  $U_2 > U_1$  на затворе 31 приведет к появлению в приповерхностной под ним зоне потенциальной ямы, в которую при наличии напряжения на входном диоде будут инжектироваться дырки. Если после окончания процесса инжекции к затвору 32 приложить  $U_3 > U_2$ , то под ним возникает более глубокая потенциальная яма. При этом под затворами 31 и 32 возникает продольное поле, под действием которого в приповерхностном слое полупроводника произойдет дрейф носителей заряда от 31 к 32. Аналогично происходит перемещение зарядов к следующим электродам.

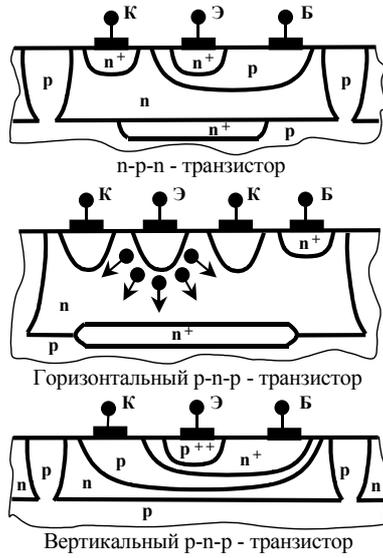


Рисунок 1.7 – Базовые элементы биполярных ИС

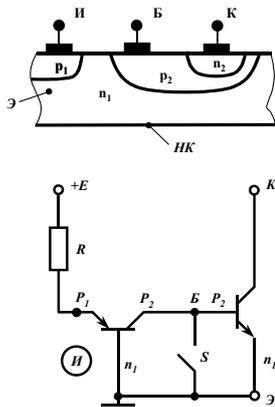


Рисунок 1.8 – Транзистор с инжекционным питанием

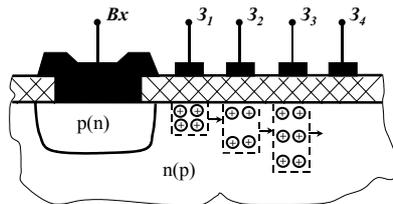


Рисунок 1.9 – Структура прибора с зарядовой связью

#### 1.4. Базовые элементы МОП БИС

Основные МОП транзисторные структуры в составе БИС и СБИС. Особенности работы МОП транзисторных структур в составе БИС и СБИС. МОП транзисторные структуры с затвором из поликристаллического кремния и тугоплавкого металла. D-МОП, V-МОП структуры и МОП транзисторы на диэлектрической подложке. Структуры КМОП БИС. Особенности применения МОП БИС.

Принцип действия МОП-транзистора основан на управлении током, протекающим в приповерхностном слое полупроводника, при помощи напряжения, приложенного к металлическому электроду, отделенному от поверхности полупроводника тонким диэлектриком. Различают n-МОП, p-МОП, КМОП ИС, где в качестве базового активного элемента используются p-канальные, n-канальные МОП-транзисторы, либо комплементарная пара на их основе (рисунок 1.10).

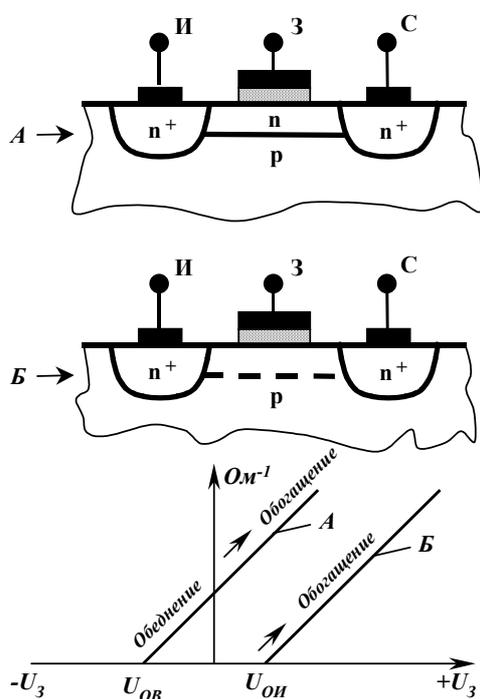


Рисунок 1.10 – Базовые элементы униполярных ИС

## 1.5 Требования к производству БИС и СБИС. Технологический микроклимат

*Общие требования к производству изделий микроэлектроники. Технологический микроклимат и его основные характеристики. Определение и классификация "чистых" технологических помещений (ЧТП): "чистые" технологические помещения, комнаты, коридоры, и модули. Принципы проектирования ЧТП. Особенности водо-, газо- и энергоснабжения ЧТП. СБИС-системы кондиционирования и поддержания микроклимата в ЧТП. Вакуумная гигиена. Спецодежда персонала ЧТП. Приёмы работы обслуживающего персонала и операторов в ЧТП. Базовые среды – технологические газы и технологическая вода, их основные характеристики.*

Источники и виды загрязнений пластин и подложек - абразивные и клеящие материалы; пыль (находящаяся в помещении), оборудование, инструмент, оснастка, тара для транспортировки и хранения; технологические среды; органические и неорганические реагенты; вода и др.

Т.к. загрязнение подложек возможно практически на всех операциях, то процесс очистки поверхности осуществляется многократно.

Виды загрязнений разделяются по их физико-химическим свойствам, т.к. последние определяют выбор методов удаления загрязнений:

а) органические загрязнения - это в основном жировые неполярные загрязнения клеящими веществами, маслом от станков, от рук операторов;

б) растворимые в воде полярные загрязнения - соли, кислоты, остатки травителей, флюсы;

в) физические загрязнения - пылинки, ворсинки, абразивная пыль и другие посторонние частицы, химически не связанные с поверхностью пластин (подложек);

г) загрязнения, химически связанные с поверхностью - оксидные, нитридные, карбидные и др. соединения;

д) газы, адсорбированные поверхностью.

На поверхности пластин (подложек) ИС могут присутствовать одновременно многие виды загрязнений. Наиболее трудноудаляемыми являются органические и некоторые химически связанные с поверхностью загрязнения. Из физических загрязнений наиболее трудно удаляются мелкие зерна абразива, внедренные в поверхность. Из растворимых в воде полярных загрязнений трудно удаляются подвижные ионы металлов (Na, K и т.д.).

С точки зрения механизма процессов все методы очистки можно условно разделить на химические и физические, при этом используются различные технологические среды. Под последними понимают различные жидкостные и газовые реагенты, оказывающие влияние на поверхность подложек, окружающую среду (Ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и т.д.), в которой осуществляются те или иные технологические процессы (очистка, окисление, диффузия и т.д.).

Классификация приведена на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Классификация методов очистки поверхности пластин

В органических растворителях (четырёххлористом углероде  $CCl_4$ , бензоле, толуоле и др.) эффективно растворяются почти все жировые загрязнения. При погружении образцов в растворитель от поверхности отрываються молекулы жира. Их отделение вызвано их собственными колебательными движениями и притяжением со стороны молекул растворителя. Растворимость жиров увеличивается с ростом температуры, поэтому обезжиривание ведут в горячих или кипящих растворителях. Однако применение органических растворителей не желательны, т.к. молекулы жиров уходят в раствор без химического разрушения и могут снова попасть на поверхность пластин.

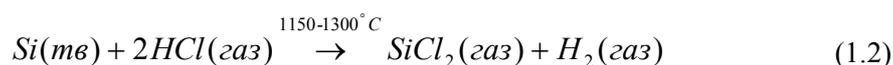
Химическое обезжиривание выполняется в составах, разрушающих молекулы жиров.

В производстве ИЭОТ иногда применяют обработку поверхности в мыльных растворах, которая служит для перевода омыляемых жиров в мыла, представляющие собой растворимые в воде соли. Последние удаляются с поверхности промывкой. К омыляемым жирам относятся все растительные и животные жиры, которые представляют собой сложные эфиры глицерина и высокомолекулярных органических кислот (стеариновой, олеиновой и др.).

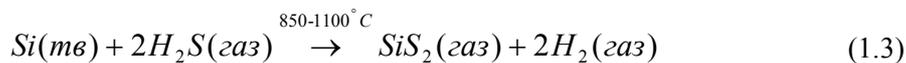
В настоящее время для химического обезжиривания Si применяется горячий 75-80°С "универсальный" перекисно-аммиачный раствор, состоящий из водного раствора смеси пергидроли  $H_2O_2$  и щелочи  $NH_4OH$ .

В технологии БИС и СБИС иногда особенно важно получить атомарно чистую поверхность перед проведением ряда технологических процессов, таких как эпитаксия, окисление и др. Для этого используют процесс газового травления кремния, при этом помимо удаления загрязнений с поверхности происходит стравливание слоя Si с механическими нарушениями. Газовое травление применяется в тех технологических процессах, в которых особую роль играет структура поверхностного слоя, например, при эпитаксиальном наращивании или при получении подзатворного окисла в МДП-структурах.

В качестве травителей используют смеси водорода ( $H_2$ ) или гелия (He) с галогенами (F, Cl, Br), галогеноводородами (HBr, HCl), сероводородом ( $H_2S$ ), гексафторидом серы ( $SF_6$ ). Молярное содержание этих веществ в  $H_2$  или He может изменяться от десятых долей до единиц процентов. Обработка производится при  $T = 800 - 1300^\circ C$  либо в установках для окисления, либо в реакторах для эпитаксиального наращивания. При травлении Si в HCl происходит следующая реакция:



Аналогично и для HBr. При травлении в сероводороде идут следующие реакции:



Продуктами реакции при газовом травлении являются только газообразные вещества, чем и обусловлена высокая эффективность очистки поверхности.

Химическое травление в жидкостях происходит на границе твердой и жидких сред и может рассматриваться как гетерогенная реакция. Процесс травления состоит из 5 стадий:

1. Диффузия реагента к поверхности;
2. Адсорбция реагента;
3. Химическая реакция;
4. Десорбция продуктов реакции;
5. Диффузия продуктов реакции от поверхности.

Скорость всего процесса определяется скоростью наиболее медленной (контролирующей) стадии. При травлении Si такими стадиями могут быть либо диффузия реагентов к поверхности, либо химическая реакция. Скорость диффузии реагента в соответствии с законом Фика:

$$V_g = D \cdot (N_{об} - N_{пов}) / \sigma, \quad (1.5)$$

где  $N_{об}$ ,  $N_{пов}$  - концентрация реагента соответственно в объеме и на поверхности;

$\sigma$  - толщина приповерхностного слоя травителя, в котором существует градиент концентрации.

Скорость химической реакции

$$V_p \sim (N_A)^a (N_B)^b e^{-\frac{\Delta W}{RT}}, \quad (1.6)$$

где  $N_A$ ,  $N_B$  - концентрации реагирующих веществ;

$\Delta W$  - энергия активации химической реакции;

R - универсальная газовая постоянная.

Показатели "a" и "b" для простых реакций численно равны коэффициентам в уравнении химической реакции.

Энергия активации - это избыточная энергия, которой должна обладать молекула в момент столкновения, чтобы быть способной к химическому взаимодействию.

Энергия активации, определяющая скорость диффузии в жидкостях  $\Delta W_g = 1-4$  Ккал/моль. Энергия активации химических реакций для различных травителей 10-500 ккал/моль. В зависимости от соотношения  $\Delta W$  и  $\Delta W_g$

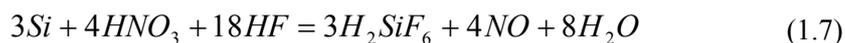
контролирующей стадией является:

1.  $\Delta W < \Delta W_g$  - химическая реакция;
2.  $\Delta W > \Delta W_g$  - диффузия.

В первом случае скорость травления чувствительна к состоянию поверхности. Так шлифованная поверхность имеет меньшее значение  $\Delta W$ , чем полированная. Величину  $\Delta W$  снижают дислокации и другие дефекты кристалла. Поскольку различные кристаллографические плоскости имеют различные значения  $\Delta W$ , то скорость травления зависит от ориентации пластины и температуры. Травители, для которых контролирующей стадией является химическая реакция называются селективными.

Во втором случае скорость травления нечувствительна к неоднородностям поверхности, слабо зависит от температуры и резко от факторов, влияющих на скорость диффузии (вязкость травителя, перемешивание травителя и др.). Травители, для которых контролирующей стадией является диффузия, называются полирующими.

Травление в полирующих травителях. Для Si типичными полирующими травителями являются смеси  $HNO_3$  и HF (платиновая). Травление происходит в соответствии с электрохимической теорией растворения Si. Согласно ей, вся поверхность пластины, покрытая раствором травителя, состоит из большого числа микроэлектродов-катодов и анодов. На анодных участках происходит окисление Si с последующими растворением окисла и образованием кремнийфтористоводородной кислоты. На катодных - восстановление азотной кислоты. Результирующее уравнение имеет вид:



Скорость травления Si в этом случае определяется диффузией реагентов к поверхности Si. При этом происходит сглаживание поверхностного рельефа.

Выступы на поверхности травятся быстрее впадин, вследствие более высокого градиента концентрации.

Травление в селективных травителях. Селективными травителями для Si являются водные растворы щелочей и гидразин гидрат  $(NH_2)_2 \cdot H_2O$ . Химические реакции для этих травителей имеют высокие W: 13 ккал/моль для 10% раствора NaOH и 6-10 ккал/моль для  $(NH_2)_2H_2O$ . Для селективных травителей характерна большая разница в скоростях травления различных кристаллографических плоскостей. Так в этих травителях плоскости (100) травятся в 20 раз быстрее плоскостей (111). Поэтому травление в таких травителях иногда называют анизотропным.

V-образные области получаются при локальном травлении пластин Si, ориентированных в плоскости (100). Маской служит пленка  $SiO_2$ .

Границы окон в пленке  $SiO_2$  следует располагать по направлению пересечения плоскостей (111) с поверхностью, т.е. по направлению [110]. Каждую плоскость (100) пересекает ряд плоскостей (111). Анизотропный травитель растворяет плоскость (100) до тех пор, пока не выявятся плоскости

(111), начинающиеся у краев окна в пленке SiO<sub>2</sub>. Точность углов между плоскостями (в данном случае 35,3°) позволяет получить углубление строго определенной формы.

Такие V-образные канавки применяются в технологии ИС для получения изолирующих областей и разделения пластин ИС с балочными выводами на кристаллы.

После всех технологических обработок пластины и подложки подвергаются обязательной промывке.

В процессе изготовления БИС и СБИС промывка поверхности проводится неоднократно. Для этого используется особо чистая деионизованная вода. Тщательная отмывка Si или диэлектрических подложек необходима после обезжиривания их в мыльных растворах или перекисно-амиачном растворителе.

Промывка Si после травления выполняется вытеснительным методом. При вытеснительной промывке травитель не выливается до конца, чтобы пластины не соприкасались с воздухом; в ванну поступает деионизованная вода, разбавляя остатки травителя и постепенно вытесняя его. Если же слить травитель полностью или извлечь пластины, в местах оставшихся капель травителя продолжают химические реакции. В результате поверхность пластин не будет однородно гладкой.

#### 1.6. Общие требования к расходным материалам

*Основные разновидности жидких химических реактивов, используемых в производстве изделий полупроводниковой электроники. Требования к качеству химических реактивов. Описание процессов адсорбции с помощью уравнения Генри, включая область малых концентраций примесей. Особенности адсорбции примесей на поверхности полупроводника. Механизмы воздействия процессов адсорбции на качество ИМС. Классы чистоты жидких химических реактивов по стандартам ASTM и ГОСТ.*

*Хранение, расфасовка и транспортировка химических реактивов. Ёмкости для хранения и транспортировки. Повышение требований к чистоте в соответствии со спецификацией SEMI. Устройства подачи химических реактивов на рабочие места. Требования к насосам.*

Протекание процессов адсорбции примесей на поверхности подложек БИС и СБИС описывается уравнением Генри:

$$\Gamma = Z_c b C \quad (1.8)$$

где  $\Gamma$  – величина адсорбции;  
 $Z_c$  – адсорбционная ёмкость монослоя;  
 $b$  – константа адсорбционного равновесия;  
 $C$  – концентрация примеси.

На рисунке 1.12 приведены графические зависимости величины адсорбции для двух примесей, отличающихся значениями  $b$ .

На рисунке 1.13 приведен пример современного оборудования для проведения процессов отмывки пластин.

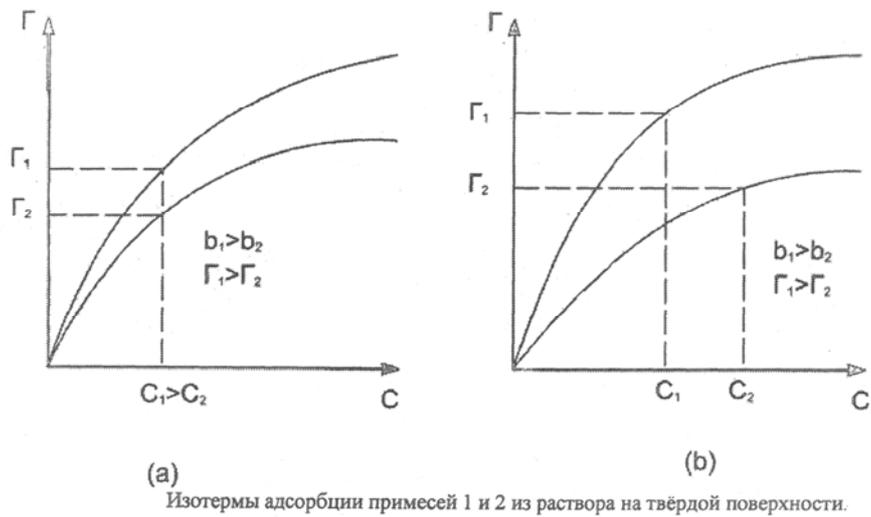


Рисунок 1.12 – Изотермы адсорбции примесей 1 и 2

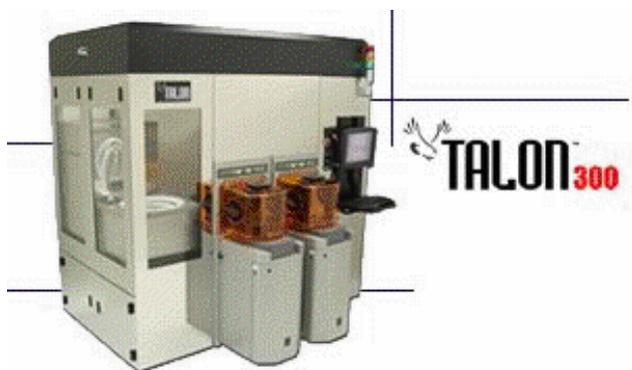


Рисунок 1.13 – Установка финишной отмывки пластин

## 2. Основы проектирования маршрутной технологии кристаллов БИС и СБИС. Анализ и синтез технологических маршрутов

### 2.1. Разновидности цифровых БИС и СБИС

*Последовательность операций создания простейших микроэлектронных элементов – резисторов, диодов, биполярных и МОП транзисторов. Базовые вентили логических БИС и СБИС. Особенности конструкции и свойства базовых элементов в составе ТТЛШ, И<sup>2</sup>Л, ЭСЛ логических микросхем. Сравнительная характеристика параметров различных логических вентилей.*

Конструктивные особенности МОП структур в составе БИС и СБИС показаны на рисунках 2.1-2.2.

Необходимо также учитывать следующее обстоятельство.

Топология МОП транзистора в процессе изготовления БИС изменяется:

$$L_{\text{кан}} = L_{\text{кан.т}} - 2x_{\text{ф}} - 1.6x_{p-n}; \quad B_{\text{кан}} = B_{\text{кан.т}} + 2x_{\text{ф}},$$

где  $L_{\text{кан}}$  и  $B_{\text{кан.т}}$  - топологические (заданные в фотошаблоне) размеры канала;

$x_{p-n}$  - глубина  $p-n$ -перехода диффузионных областей стока и истока;

$0.8x_{p-n}$  - глубина боковой диффузии;

$x_{\text{ф}} = 1.0 - 1.3$  мкм - изменение размера на операциях фотолитографии и травления;

$L_{\text{диф.т}}$ ,  $B_{\text{диф.т}}$  - топологические размеры областей И и С, формируемых диффузией или ионной имплантацией.

Для КМОП БИС характерны следующие

Отличия:

Защитное кольцо  $n^+$ -типа находится в контакте с  $U_{CC}$ , а защитное кольцо  $p^+$ -типа обеспечивает связь кармана  $p$ -типа с землей. Истоки приборов могут контактировать со своими защитными кольцами, поскольку их потенциалы равны. Области стока должны быть изолированы от защитных колец слаболегированными областями для предупреждения лавинного или туннельного пробоя.

МОП структура с каналом  $p$ -типа по площади приблизительно в 2 раза больше, чем с каналом  $n$ -типа.

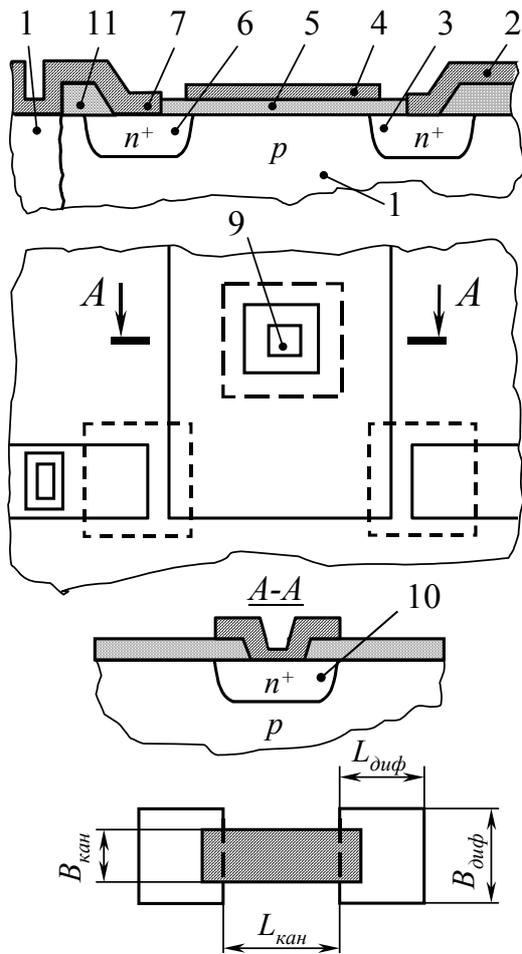


Рисунок 2.1 – Структура и топология фрагмента МОП БИС

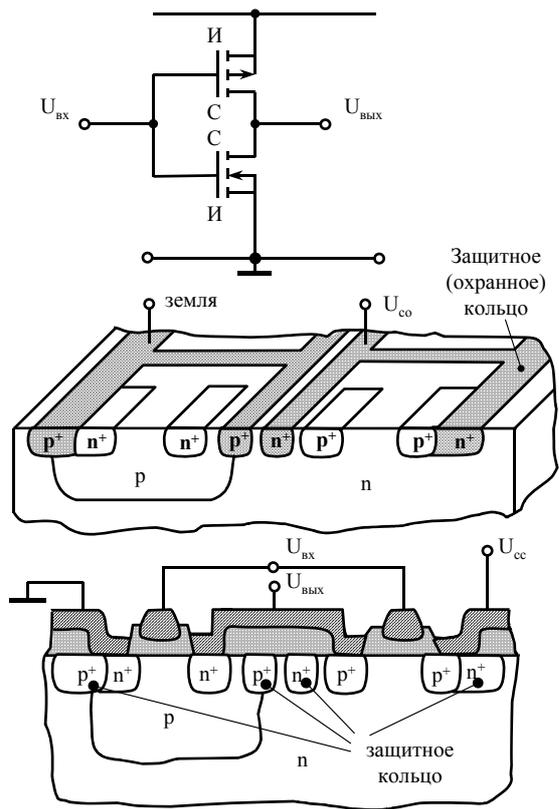


Рисунок 2.2 – Структура фрагмента КМОП БИС

## 2.2. Основные процессы в производстве БИС и СБИС

*Технологический процесс, как большая СБИС-система. Общая классификация базовых технологических процессов в производстве БИС и СБИС. Процессы нанесения покрытий. Процессы удаления вещества с поверхности подложек. Процессы перераспределения вещества в твердотельных структурах БИС и СБИС. Процессы нетермической стимуляции в технологии БИС и СБИС. Критерии общности: геометрический, структурный.*

Любой технологический процесс (ТП) можно представить в виде большой СБИС-системы (рисунок 2.3).

Здесь -  $X_1, X_2 \dots X_N$  - входы СБИС-системы (подложки, пластины, испаряемые материалы, диффузаны и др.). Это параметры исходных продуктов.

$Y_1, Y_2 \dots Y_N$  - выходы СБИС-системы (параметры ИС или ее части). Это выходные параметры конечного продукта.

$Z_1, Z_2 \dots Z_N$  - контролируемые и управляемые факторы (температура подложек, давление в камере, расход газа и т.д.). Это факторы, возмущающие технологический процесс.

$W_1, W_2 \dots W_N$  - неконтролируемые факторы, оказывающие случайное возмущающее действие на процесс (состав остаточной атмосферы). Это влияющие технологические факторы.

Целью исследований ТП, анализа существующих и синтеза новых ТП является решение задач оптимального управления ТП. Существует три пути решения этих проблем:

1. Исследование физико-химических особенностей процесса с целью установления взаимосвязей различных параметров.

2. Статистическая обработка результатов наблюдений и нахождение уравнений описывающих интересующее нас явление.

3. Компромиссный: он состоит в учете физико-технологических особенностей процесса, определении вида зависимостей, которые затем уточняются и конкретизируются с помощью статистического анализа.

ТП изготовления современных ИМЭ настолько сложны, в большинстве случаев они изучаются с помощью экспериментально-статистических методов, которые позволяют определить наиболее существенные технологические факторы, определить характер их влияния на качество изделий и построить модель исследуемого процесса. Среди методов анализа ТП наиболее широко используются:

- дисперсионный анализ;
- регрессионный и корреляционный анализ;
- математическое планирование эксперимента.

Технологический маршрут - последовательность технологических операций обработки пластин или подложек, применяемых для изготовления данного типа ИМЭ. Документом, содержащим описание маршрута, является маршрутная карта.

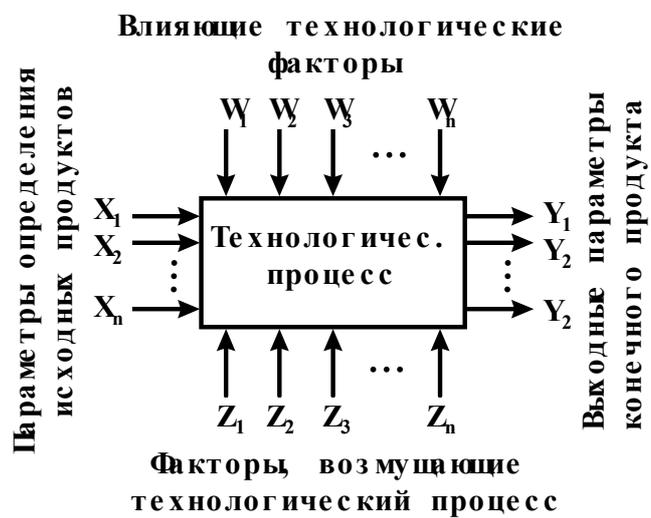


Рисунок 2.3 – Технологический процесс производства БИС и СБИС как большая СБИСтема

По степени детализации описания ТП различают:

Маршрутное описание ТП - сокращенное описание всех технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов.

Операционное описание ТП - полное описание всех технологических операций в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов.

Маршрутно-операционное описание ТП - сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других технологических документах.

Для более полной классификации ФХП рассмотрим ряд критериев, которые характеризуют общность (объединяют) ряда технологических процессов. К таким критериям относятся:

Геометрический критерий позволяет дифференцировать все процессы по признаку управления геометрией их протекания (рисунок 2.4):

- тотальное (послойное) протекание всех трех классов процессов;
- локальное (управляемое субъективно) проведение процессов по заданной технологии; локальность протекания процессов сейчас определяется методами маскирования, т.е. чисто физическими ограничениями заданных областей элементов ИС;

- селективное (реализуемое за счет воздействия внутренних факторов подложки, т.е. дефектов подложки) протекание процессов;

- сложное локальное-селективное протекание процессов, связанное с ускорением некоторых ФХП за счет дефектов структуры, расположенных закономерно по отношению к маске, локализирующей процесс.

Структурный критерий объединяет все ФХП по следующим признакам (рисунок 2.5):

а) структурной чувствительности некоторых свойств новой фазы (наносимой, удаленной, перераспределенной) по отношению к кристаллической решетке материала подложки. Структурная чувствительность подразумевает кристаллическое строение подложки: монокристалл, поликристалл (мелкозернистая, крупнозернистая структура).

б) ориентационной зависимости некоторых свойств новой фазы по отношению к кристаллической решетке материала подложки. Ориентационная зависимость или просто анизотропия свойств и результатов процессов наиболее явно проявляются для монокристаллических подложек (Si, Ge, GaAs и др.). Более этот тезис заключается в следующем: свойства монокристалла или процесса, происходящего в монокристалле (диффузия, травление и др.) в сильной степени зависят от кристаллографической ориентации самого монокристалла подложки.

Физико-химический критерий учитывает характер физико-химического взаимодействия элементов СБИСтемы. Наиболее полно он находит отражение в диаграмме фазовых равновесий данной СБИСтемы. Этот критерий необходим при прогнозировании условий протекания и их результатов в связи с составом,

структурой и свойствами конечных продуктов.

С термодинамических позиций БИС и СБИС, полученные с помощью указанных ФХП, представляют собой СБИСтему, которая состоит из нескольких фаз. При этом каждая фаза имеет различную физико-химическую природу. Поэтому для такой СБИСтемы характерно наличие поверхностей раздела, контактов разнородных материалов, градиентов концентраций и градиентов напряжений. Все это приводит к термодинамической нестабильности ИС, которая проявляется в межфазном взаимодействии, как в ходе технологических процессов, так и в процессе эксплуатации.

Проблема межфазного взаимодействия, тесно связана с выбором технологии изготовления ИС, поскольку выбор рациональной технологии как совокупности различных ФХП не возможен без знания основных закономерностей этого взаимодействия. Без знания основных закономерностей межфазного взаимодействия не могут быть определены и оптимальные режимы эксплуатации БИС и СБИС.

Процесс	Нанесение	Удаление	Перераспред.
Тотально-анизотропный			
Локально-анизотропный			
Селективно-анизотропный			

— исходные границы подложки      — маска, локализу-  
 щая процесс  
 — изменение границ после проведения ТП      — области скопления дефектов

Рисунок 2.4 – Сущность геометрического критерия

Процесс	Нанесение	Удаление	Перераспред.
Тотальный (послойный)			
Локальный			
Селективный			
Локально-селективный			

Рисунок 2.5 – Сущность структурного критерия.

### 2.3. Сущность матричного метода проектирования технологического маршрута

*Понятия базовой ячейки кристалла, блоков операций и микроциклов. Координатный метод анализа базовой ячейки. Определение блочной структуры маршрутов. Матричное изображение маршрутов. Структура и состав микроциклов маршрута.*

*Разновидности обработок, составляющих микроцикл. Размещение обработок в стадиях микроцикла. Полный и сокращенный микроциклы. Типы микроциклов. Построение стандартных микроциклов для формирования фрагментов базовой ячейки кристалла.*

Базовая ячейка – элемент или совокупность элементов БИС и СБИС, периодическим повторением которых и соединением между собой с помощью пленочных проводников можно построить кристалл в целом. Примером элемента ИС может служить транзистор, диод, резистор, простейший логический вентиль, например И<sup>2</sup>Л и т.п. Примером базовой ячейки может быть логический инвертор, ячейка памяти, триггер и т.д.

Фрагмент базовой ячейки – структурная часть элемента ячейки, возникающая на конкретном этапе ее формирования и сохраняющаяся в том или ином виде в готовом кристалле. Фрагментами являются, например, области транзистора (базовая, эмиттерная, коллекторная), пленочные элементы (слои диэлектриков, проводники, контакты), изоляционные области между соседними элементами и т.д.

Фрагменты, таким образом, являются своеобразными элементарными кирпичиками, на основе которых можно построить базовую ячейку любой ИС. Другими словами, для успешного конструирования кристалла разработчик должен иметь банк данных о существующих фрагментах и их взаимной увязке, подобно тому, как при реализации электрических схем и топологии кристаллов интегральных схем разработчики пользуются библиотекой (банком) стандартных элементов ИС.

Для того чтобы по аналогии с конструкцией создать банк данных для разработки технологического маршрута, надо определить тот элементарный технологический "кирпичик", на основе которого можно построить технологический процесс в целом. В качестве элементарной структурной единицы сквозного технологического процесса целесообразно взять совокупность операций, выполнение которых приводит к созданию единичного фрагмента. Такая совокупность операций в матричном методе проектирования называется *микроциклом*. Анализ показывает, что микроцикл имеет строго упорядоченную внутреннюю структуру.

Как последовательность операций (т.е. действий) микроцикл в общем случае состоит из четырех стадий. Микроцикл, у которого есть все четыре стадии, называется *полным*, а микроцикл, у которого отсутствует какая-либо из стадий, называется *сокращенным*.

Каждая стадия микроцикла представляет собой один или группу операционных технологических процессов одного и того же функционального назначения.

1-я стадия – формозадающий операционный процесс фотолитография. Результатом этой стадии является формирование на поверхности кристалла фоторезистивной маски, предназначенной для локализации последующего воздействия технологических факторов;

2-я стадия – формообразующий операционный процесс или группа процессов. Чаще всего это травление и ионная имплантация.

3-я стадия – операционные процессы очистки. Например, удаление фоторезиста и послойная химическая очистка.

4-я стадия – формообразующий процесс или совокупность 2-3-х однотипных процессов, выполняемых последовательно. К процессам этой стадии чаще всего относятся: нанесение слоев, диффузия, окисление, отжиги. Эти процессы имеют характерную особенность: после их выполнения на поверхности кристалла должен оставаться сплошной слой определенного материала (окисла, металла и т.д.).

#### 2.4. Анализ матрицы технологического маршрута. Матричное представление маршрутов БИС и СБИС

*Показатели оптимальности маршрута: коэффициент самосовмещения, процент выхода годных изделий, показатель интеграции. Приемы оптимизации маршрутов с использованием самосовмещения. Анализ типовых маршрутов современных ИМС: биполярных БИС на кремнии, арсениде галлия, ГИС.*

При анализе матрицы технологического маршрута определяют некоторые количественные показатели, прогнозирующие эффективность разрабатываемой технологии. Прежде всего определяются отдельные абсолютные количественные показатели, знание которых позволяет судить о сложности процесса в целом.

Простейшей количественной информацией, которую дает матрица маршрута, является число однотипных операционных процессов и их удельный вес в маршруте. Если число всех операционных процессов в маршруте обозначить как  $N_M$ , число операций травления –  $N_T$ , фотолитографии –  $N_\Phi$ , то соответствующий удельный вес операционных процессов травления и фотолитографии определяется соотношениями:

$$P_T = N_T / N_M; P_\Phi = N_\Phi / N_M. \quad (2.1)$$

Знание вышеприведенных показателей полезно разработчику в следующих аспектах.

Во-первых, число однотипных операций в маршруте может послужить исходными данными для определения потребности в соответствующем оборудовании и проектирования производственных участков гермозоны;

Во-вторых, удельный вес однотипных операций в маршруте позволяет определить их относительную трудоемкость. Появляются, таким образом, исходные данные для разработки мероприятий по снижению себестоимости производства конкретного прибора и конкретной ИС.

В реальных условиях производства существуют операционные процессы, вносящие наиболее заметный вклад в технологические потери из-за высокой дефектности или сложности их реализации. Очевидно, что подобные "трудные" процессы различны для конкретных предприятий, однако среди них есть и процессы, потенциально "опасные" для производства любой ИС на любом производстве.

Прежде всего, к ним относятся процессы фотолитографии, которым свойственны погрешности размеров элементов и погрешности совмещения фотошаблона с топологией фрагментов, сформированных на предыдущих стадиях. Однако наиболее опасны дефекты фотолитографической маски в виде нарушений ее рисунка. Поэтому при сравнении различных вариантов реализации той или иной базовой ячейки всегда следует исходить из возможности максимально уменьшить число операций фотолитографии. По числу фотолитографий в матрице можно грубо оценить процент выхода годных на этапах кристального производства по соотношению:

$$K = K_{\phi}^n, \quad (2.2)$$

где  $K$  – процент выхода годных на всей матрице;  $K_{\phi}$  – процент выхода годных на микроцикле, содержащем фотолитографию;  $n$  – число микроциклов с фотолитографией.

Этой формулой можно пользоваться, если все микроциклы с фотолитографией характеризуются приблизительно одинаковыми процентами выхода.

Если полные микроциклы имеют резко отличные проценты выхода годных  $K_{\phi i}$ , то прогнозную оценку процента выхода всей матрицы получают из соотношения:

$$K = K_{\phi 1} * K_{\phi 2} * \dots * K_{\phi i}. \quad (2.3)$$

Если полагать, что операционный процесс фотолитографии является наиболее критичной частью маршрута в целом, то оптимальным можно назвать маршрут, позволяющий сформировать базовую ячейку минимальным числом микроциклов, содержащих фотолитографию.

Иначе говоря, разработчик должен так построить технологический маршрут, чтобы с помощью одной операции фотолитографии реализовать максимальное число фрагментов базовой ячейки. В технологии ИС есть технический прием – самосовмещение, когда конструктивный фрагмент, сформированный на предыдущем этапе, является маской для формирования фрагментов последующего слоя. Используя этот технический прием, можно минимизировать число операций фотолитографии, обеспечив тем самым возможность достижения более высокого процента выхода годных в серийном производстве.

Теперь по коэффициенту  $K_{cc}$  можно количественно оценить степень совершенства разработанного маршрута.

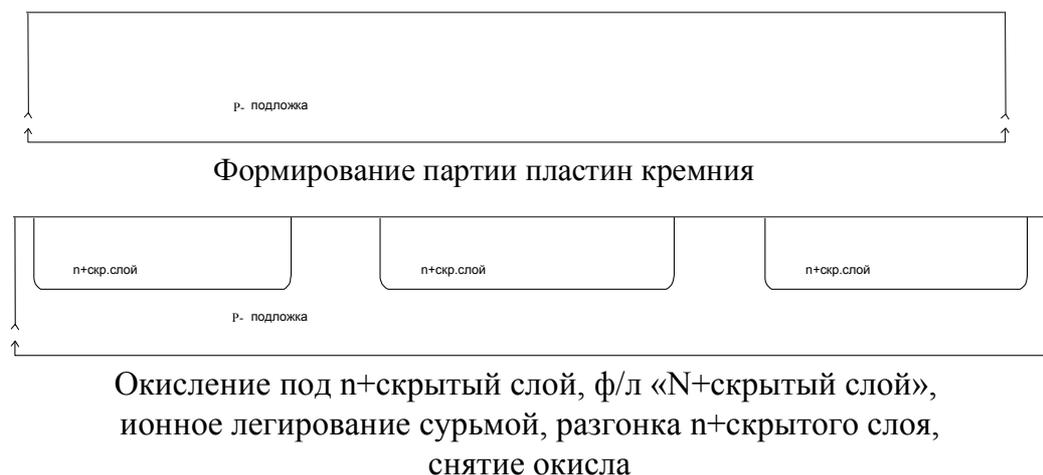
$K_{cc}$  – это отношение числа разнотипных фрагментов базовой ячейки, имеющей вертикальные границы, к числу операций фотолитографии в матрице. Менее совершенны маршруты, для которых  $K_{cc} \leq 1$ . Чем больше  $K_{cc}$  тем совершеннее маршрут.

Чаше всего наилучших результатов можно добиться, когда  $K_{cc}$  повышается как за счет оптимизации маршрута, так и за счет оптимизации конструкции базовой ячейки. Конструкция базовой ячейки при этом должна претерпевать такие изменения, которые позволяют правильно выбрать базовый слой и его топологию и на основе этого слоя реализовать приемы совмещения. Таким образом, разработчик технологии ИС должен в достаточной мере владеть и знаниями о принципах конструирования кристаллов.

## 2.5. Синтез технологического маршрута кристаллов биполярных БИС

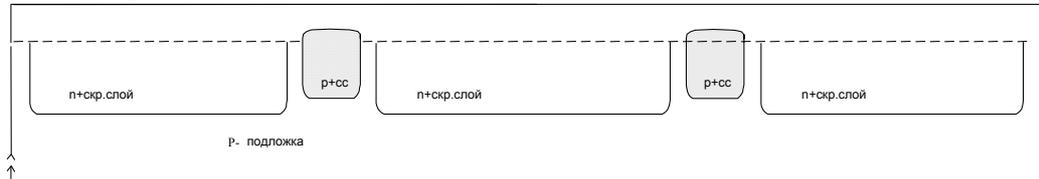
*Перечень основных операций в маршруте производства биполярных БИС, важнейшие особенности ключевых операций. Разбиение маршрута на микроциклы. Формируемые твёрдотельные структуры.*

На рисунке 2.6. показана эволюция твёрдотельной структуры кристалла биполярной БИС, которая отражает основные операции в маршруте и микроциклы.

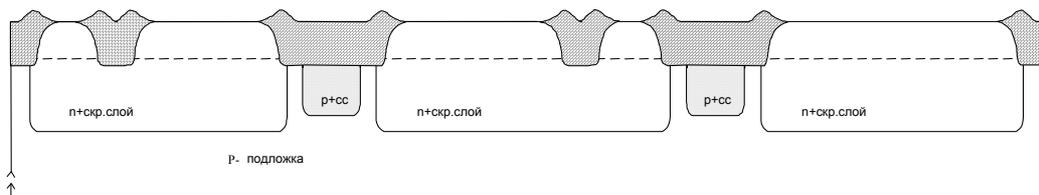




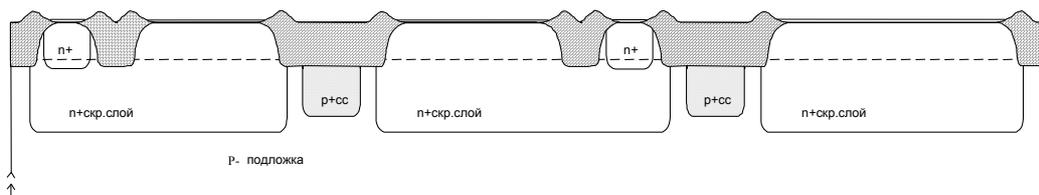
Окисление под p+скрытый слой, ф/л «P+скрытый слой»,  
ионное легирование бором, отжиг+окисление p+скрытого слоя,  
снятие окисла



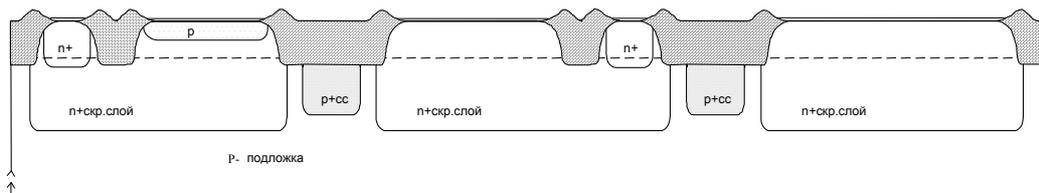
Эпитаксия



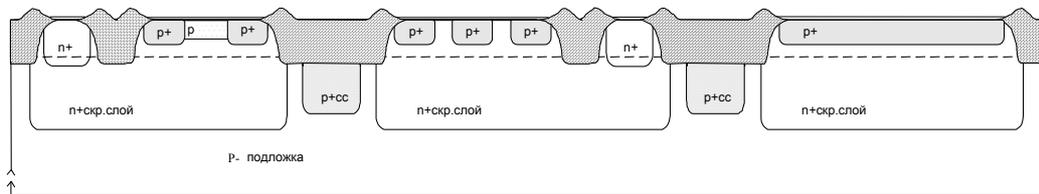
Окисление под нитрид, нанесение нитрида, ф/л «Разделение»,  
травление нитрида, окисла, кремния,  
локальное окисление, снятие нитрида



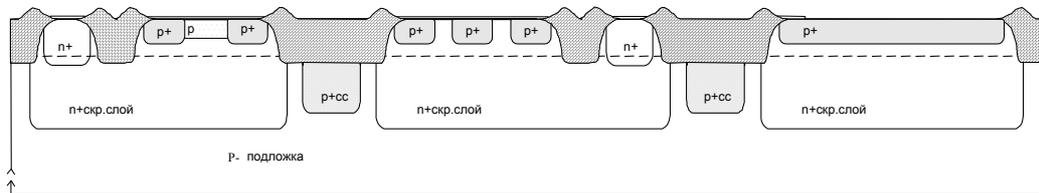
Окисление под базу, ф/л «Глубокий коллектор»,  
ионное легирование фосфором, отжиг глубокого коллектора



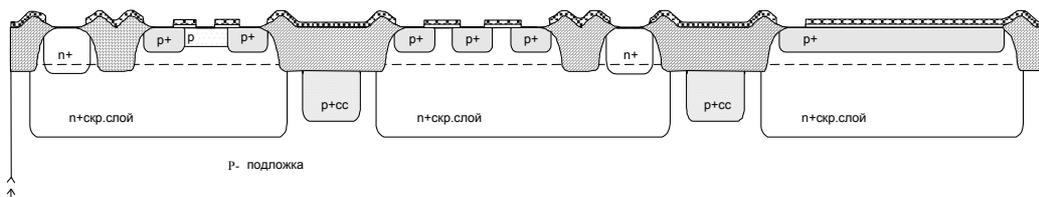
Ф/л «База», ионное легирование бором, отжиг базы



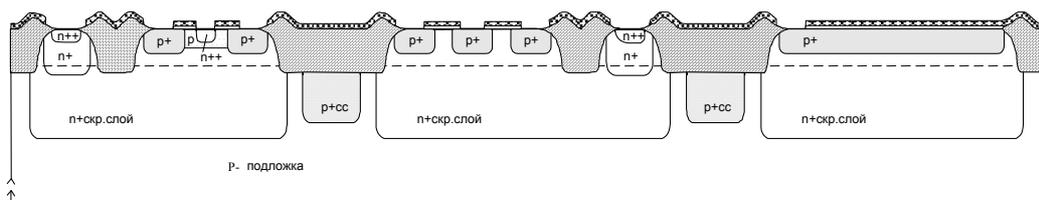
Ф/л «Р+база», ионное легирование бором, отжиг р+базы



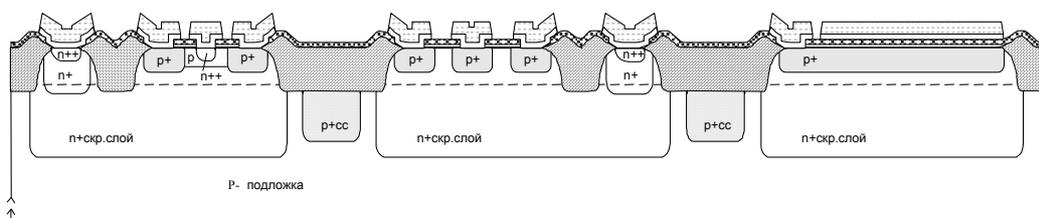
Ф/л «Конденсатор», травление окисла



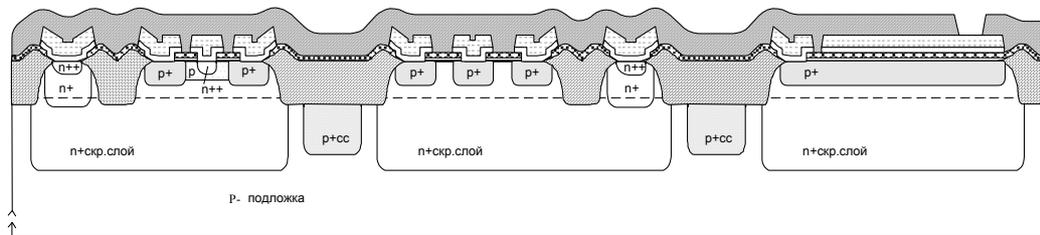
Тонкое окисление, нанесение нитрида, ф/л «Контакты-1»,  
травление нитрида, освежение контактов



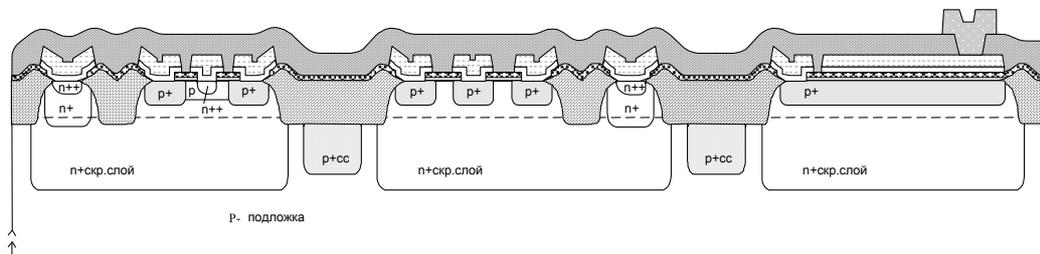
Тонкое окисление, ф/л «Эмиттер», ИЛ мышьяком, разгонка эмиттера,  
ф/л «Подлегирование контактов», ионное легирование бором, отжиг



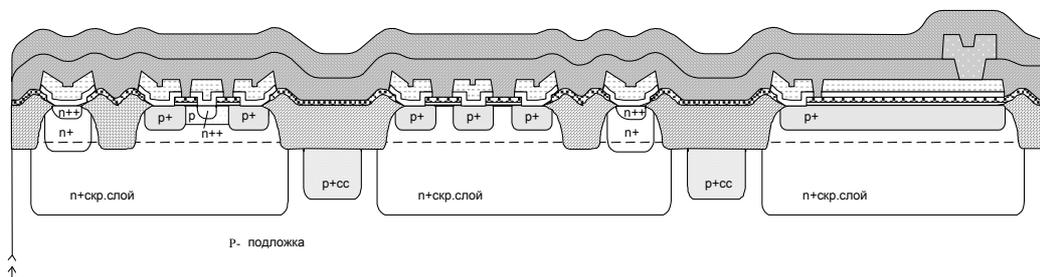
Освежение, напыление металла, ф/л «Металл-1», травление металла



Осаждение ПХО, ф/л «Контакты-2», травление ПХО



Напыление металла 2, ф/л «Металл-2», травление металла 2



Нанесение ПХО, Ф/л «Пассивация», травление ПХО

Рисунок 2.6 – Эволюция формирования типовой структуры

## 2.6. Синтез технологического маршрута кристаллов КМОП БИС

*Перечень основных операций в маршруте производства КМОП БИС, важнейшие особенности ключевых операций. Разбиение маршрута на микроциклы. Формируемые твёрдотельные структуры.*

На рисунке 2.7 показана базовая ячейка (логический вентиль И-НЕ) п-МОП СБИС. Логический вентиль с двумя входами выполнен на основе последовательно включенных двух полевых транзисторов, работающих в режиме обогащения (нормально закрытых) (ЕМД<sub>а</sub> и ЕМД<sub>в</sub>) и транзистора, работающего в режиме обеднения (ДМД) (нормально открытого).

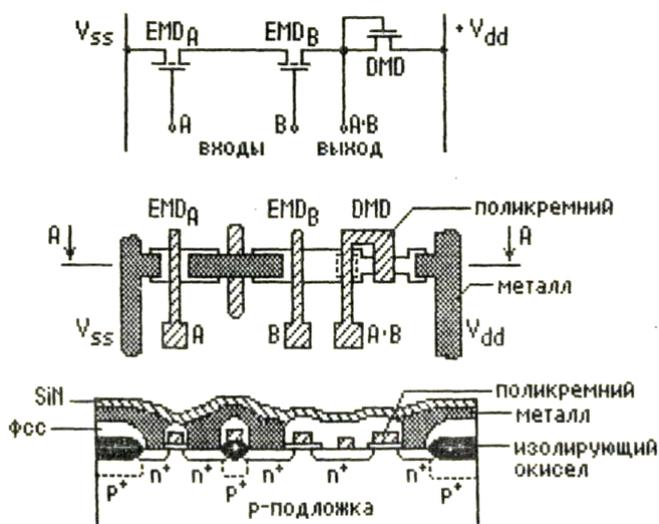


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема и топология базовой ячейки БИС на основе п-МОП логического вентиля И-НЕ

В таблице 2.1 приведена матрица технологического маршрута рассматриваемой ячейки БИС.

Таблица 2.1. – Матрица маршрута изготовления логической п-МОП БИС

Микроцикл	Стадии микроцикла и их содержание			
	1	2	3	4
1   Подготовительный	1-я ф/л	Пластина КДБ-20	п/о	Окисление Осаждение Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 0,1мкм
2   Изоляция	2-я ф/л	Травление Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> Импантация В+ - 3*10 <sup>12</sup> см <sup>-2</sup> 60кэВ	Уд.ф/р п/о	Локальное окисление 0,4 мкм Разгонка примеси
3   Подзатворный оксид	3-я ф/л	Травление Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub>	п/о	Позатворное окисление 0,02
4   Маска скрытого контакта и канал ЕМД-транзистора	4-я ф/л	Травление SiO <sub>2</sub>	Уд.ф/р п/о	имплантация В+-8*10 <sup>11</sup> см <sup>-2</sup> 35 кэВ

5	Маска обедненного слоя и обедненный слой (канал ДМД-транзистора)	5-я ф/л	Имплантация As <sup>+</sup> - $3 \cdot 10^{12}$ см <sup>-2</sup> 80кэВ	Уд.ф/р п/о	Нанесение Si* 0.35 мкм Диффузия P
6	Поликремниевый затвор, сток-исток, первый уровень разводки из поликремния	6-я ф/л	Травление Si* Имплантация As <sup>+</sup> - $1 \cdot 10^{16}$ см <sup>-2</sup> 80кэВ	Уд.ф/р п/о	Окисление Нанесение ФСС 0,7-0,8 мкм Разгонка стока, истока и скрытого контакта
7	Маска контактных окон	7-я ф/л	Травление ФСС	Уд.ф/р п/о	Оплавление ФСС Нанесение Al
8	Металлическая разводка (второй уровень разводки из Al)	8-я ф/л	Травление Al	Уд.ф/р п/о	Вжигание Al Нанесение Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
9	Маска пассивации	9-я ф/л	Травление Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Уд.ф/р п/о	Окончание процесса

### 3. Моделирование производства кристаллов БИС и СБИС. Методы и алгоритмы моделирования базовых технологических операций

#### 3.1. Изоляция элементов БИС и СБИС, модели процессов термического окисления

*Роль оксидных плёнок кремния в технологии БИС и СБИС. Технология полупроводниковых структур с комбинированной изоляцией элементов. VIP технология. Технология структур с полной диэлектрической изоляцией. Структуры КНД. Использование метода глубокой имплантации ионов кислорода, горизонтального наращивания локальных эпитаксиальных слоёв, окисления пористого кремния, рекристаллизации аморфного или поликристаллического кремния при изоляции карманов в твёрдотельных структурах БИС и СБИС.*

*Назначение моделирования в проектировании технологии и кристаллов БИС и СБИС.*

*Модели процессов термического окисления кремния и диффузии. Специальные методы окисления. Перераспределение легирующих примесей на границе раздела фаз. Основные свойства формируемых плёнок оксида кремния. Заряд и напряжения в плёнках оксида кремния. Основы моделирования*

*быстрого термического отжига.*

Оксидные плёнки в составе БИС и СБИС, в основном, выполняют функции маскирования с целью получения локальных активных областей кристалла. Другими словами, именно благодаря многим замечательным свойствам плёнок диоксида кремния удаётся реализовать достоинства кремния, как главного материала электронной техники. Например, на подложках из Ge и GaAs получить путём окисления исходной подложки защитные плёнки со стабильными свойствами не удаётся. Именно поэтому на основе Si в настоящее время изготавливается свыше 95% БИС и СБИС.

Что касается защиты кристалла, то иногда защитные свойства плёнок SiO<sub>2</sub> оказываются недостаточными и в этих случаях используют дополнительную защиту, например плёнками Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> или Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Вообще же оксидные плёнки кремния входят в состав практически любой базовой ячейки полупроводниковой структуры, в том числе дискретных элементов.

Кроме того, плёнки SiO<sub>2</sub> применяют для получения высококачественной электрической изоляции элементов БИС и СБИС между собой.

На практике широко используется технология полупроводниковых структур с комбинированной изоляцией элементов, получивших название структуры типа «Изопланар».

В качестве исходных используют слаболегированные подложки КДБ 10, ориентированные в плоскости (111) или (100).

После химической обработки и окисления проводят литографию. При этом отказ от контактной литографии к переход к проекционной литографии обозначал переход от технологии «Изопланар-1» к технологии «Изопланар-2».

Далее методами ионного легирования во вскрытые окна вводят примесь мышьяка или сурьмы. Формируемый таким образом скрытый слой служит в качестве сильнолегированной области коллектора для уменьшения его сопротивления. Затем выращивается эпитаксиальный слой обычно p-типа. После контроля параметров ЭС выращивают термический слой SiO<sub>2</sub> толщиной 50 нм, а затем слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, имеющий низкую скорость окисления, что позволяет использовать его в качестве маски для последующего локального окисления.

По двухслойной маске проводят фотолитографию, вскрывают области будущей диэлектрической изоляции и, используя в качестве маски фоторезист, проводят последовательное травление слоёв нитрида, оксида и части эпитаксиального слоя. Метод травления может быть изотропный или анизотропный – для подложек с ориентацией (100).

Непосредственно перед глубоким локальным окислением проводят ионное внедрение бора для создания p<sup>+</sup> областей для предотвращения инверсии слаболегированной подложки и образования паразитных связей между соседними элементами.

После окончания окисления будет сформирован диоксид кремния толщиной  $h_{SiO_2} = 2,12 * 0,5 h_{ЭС}$ .

Другое отличие структур «Изопланар-1» и «Изопланар-2» состоит в том, что в первом случае эмиттерные области формировались как вписанные в базу,

а во втором – создавался пристеночный эмиттер, что почти в 2 раза уменьшило площадь прибора.

VIP технология основана на использовании анизотропного травления для изоляции с помощью V-образных канавок. Поэтому подложки должны иметь ориентацию в плоскости (100). Огранка канавок происходит плоскостями (111). Угол между плоскостями (100) и (111) составляет около  $55^\circ$ . Т.о. угол  $\vartheta = 35^\circ$ .

Помимо рассмотренных процессов создания изоляции элементов разработаны и используются для ряда изделий, например микромощных БИС и СБИС, технологические методы изготовления структур с полной диэлектрической изоляцией.

Среди общих достоинств методов этой группы можно назвать:

- Снижение паразитных ёмкостей и токов утечки,
- Предотвращение эффекта «защёлкивания» и возникновения паразитных транзисторов.

ЭПИК процесс, разработан фирмой Motorola. Согласно этому процессу исходной подложкой служит кремний n- типа с  $\rho = 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . На нём создают  $n^+$  слой эпитаксией или диффузией. Кремний травят на глубину 20-30 мкм и окисляют. Толщина  $\text{SiO}_2$  не должна превышать 4 мкм, что связано с различием ТКЛР.

Далее на окисленную профилированную поверхность осаждают поликристаллический кремний их ПГС  $\text{SiH}_4 + \text{H}_2$  при  $T = 650^\circ\text{C}$  или  $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$  при концентрации  $\text{SiCl}_4$  более 1,5%. Толщина поликремния составляет 300 мкм и более. Возможно чередование слоёв поликремния и  $\text{SiO}_2$ , что позволяет снизить ёмкость создаваемой подложки.

Затем монокристаллическая подложка удаляется методами шлифования, травления, химико-механическим полированием вплоть до поликремниевых канавок. Затем формируют активные области в изолированном кармане.

Существует модифицированный вариант ЭПИК процесса, в котором в качестве исходной подложки используется  $n^+$  Si. После создания профилированной поверхности и её окисления осаждают слой поликремния и удаляют исходную подложку. Затем стравливают  $n^+$  слой до толщины 10-12 мкм и локально выращивают эпитаксиальный слой n типа.

Другой (более важный) вариант ЭПИК процесса называют «позитивным». Тогда исходная  $n^+$  подложка в этом случае окисляется и без формирования канавок на её поверхность наносят слой поликремния. Слой исходного  $n^+$  Si стравливается до толщины 8-10 мкм и на нём выращивают слабелегированный эпитаксиальный слой n типа. Структуру вновь окисляют и вновь осаждают поликремний на всю глубину канавок. Удалив поликремний с поверхности  $n^+$  - n карманов поверхность окисляют и традиционными методами создают активные области БИС.

Структуры КНД. Наряду с несомненными достоинствами эти структуры имеют существенные недостатки. В частности, существенные токи утечки обусловлены чрезвычайно высокой плотностью поверхностных состояний на границе Si /  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Это определило поиск других способов формирования КНД, причём не только с использованием объёмного диэлектрика, каким является сапфир или кварц, но и тонких слоёв оксида и нитрида. Среди этих методов известны следующие:

На рисунке 3.1 представлены основные операции LOCOS процесса, актуального для МОП БИС.

Зависимость константы скорости окисления от температуры выражается уравнением Аррениуса:

$$K_T = K_{OK}^{\circ} \exp\left(-\frac{\Delta E_{акт}}{RT}\right),$$

где  $\Delta E_{акт}$  - энергия активации процесса окисления;

$R$  - универсальная газовая постоянная;

$K_{ок}^{\circ}$  - константа скорости при некоторой "исходной" температуре процесса

Сформированные плёнки диоксида кремния имеют встроенный положительный заряд плотностью до  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Для измерения его величины использую метод вольт-фарадных характеристик.

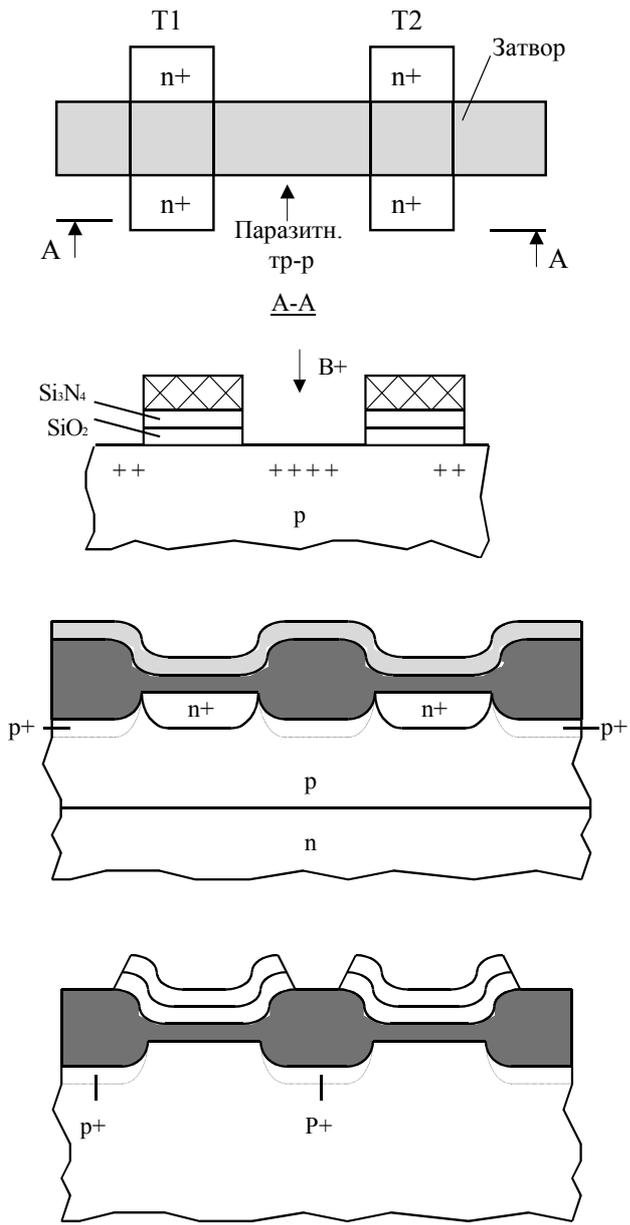


Рисунок 3.1 – Последовательность основных операций в LOCOS процессе

### 3.2. Основы моделирования процессов ионного легирования

*Разновидности процессов и модели технологии ионного легирования. Поколения программ технологического моделирования. Моделирование процессов ионного легирования. Проекционная длина пробега ионов. Профили легирования имплантированных примесей. Модель Линхарда-Шарфа-Шютта. Распределение Пирсона. Эффект каналирования. Последовательность расчета параметров процесса ионного легирования*

Ионно-лучевой ускоритель состоит из следующих основных блоков; источника ионов, источника высокого напряжения, ускорительной трубки, магнитного сепаратора, СБИСтемы фокусировки и сканирования пучка ионов, приемной камеры и вакуумной СБИСтемы откачки.

Источник ионов предназначен для ионизации паров рабочего вещества и первичной фокусировки ионного пучка. Он представляет собой газоразрядную камеру, при поступлении газа или паров рабочего вещества в которую происходит ионизация молекул и атомов путем бомбардировки электронами, эмитируемыми термокатодом. Поперечное магнитное поле в разрядной камере, создаваемое магнитной СБИСтемой, вызывает вращение движущихся в нем электронов по спирали, что увеличивает эффективность ионизации. В ионно-лучевых ускорителях типа «Везувий-3М» (рисунок 2.9) предусмотрены два источника ионов: для фосфора Иф и для бора Иб. Они различаются способом подачи вещества. В источник ионов бора поступает газ — трехфтористый бор  $\text{BF}_3$  — из баллона с микронатекателем МН. Расход газа контролируется автоматически. В источник ионов фосфора подают пары фосфора, образующиеся в испарителе с нагревателем Н, в который загружают порошок красного фосфора. В процессе имплантации функционирует только один из ионных источников.

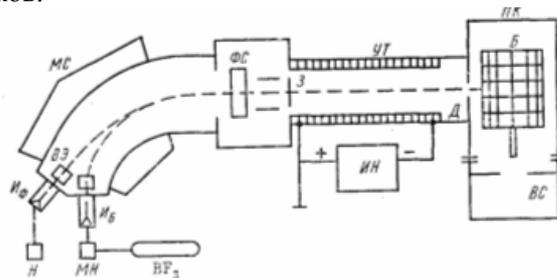


Рис. 1. Схема ионно-лучевого ускорителя

Рисунок 3.2 – Схема ионно-лучевого ускорителя в установках типа «Везувий 3М»

Положительные ионы вытягиваются из разрядной камеры небольшим ускоряющим напряжением первой ступени—до 40 кВ, подаваемым на вытягивающий электрод ВЭ. Формирование ионного пучка производят с помощью магнитного сепаратора МС и СБИСтемы фокусировки и сканирования ФС. Магнитный сепаратор предназначен для разделения пучка

ионов в соответствии с их зарядом и массой, так как под действием силы Лоренца в области магнитного поля сепаратора ионы движутся по круговым траекториям, радиусы которых зависят от их массы  $M_1$ , ускоряющего напряжения ( $U$  и магнитной индукции  $B$ ):

$$r = \sqrt{\frac{2M_1U}{qB^2}},$$

где  $q$ —заряд иона.

После прохождения магнитного сепаратора ионы больших масс имеют более плавные траектории, ионы меньших масс — меньший радиус поворота и более резкое искривление траектории. Магнитная СБИСтема сепаратора выполнена в виде постоянного магнита, для которого  $B = \text{const}$ , поэтому, чтобы вывести пучки ионов  $V^+$  и  $P^+$  в СБИСтему фокусировки и сканирования, источники ионов бора и фосфора разделяют.

СБИСтема фокусировки и сканирования формирует ионный пучок и осуществляет его сканирование в вертикальной плоскости. В СБИСтему входит электростатическая фокусирующая линза и два электрода электростатического сканирования. Смещение  $S$  пучка в вертикальной плоскости прямо пропорционально напряжению  $U_c$  на электродах сканирования:

$$S = \frac{U_c l L}{2dU},$$

где  $l$ —длина сканирующего электрода;  $L$ —расстояние от центра сканирующего электрода до мишени;  $d$  — расстояние между электродами сканирования по вертикали;  $U$  — ускоряющее напряжение.

Между СБИСтемой ФС и ускоряющей трубкой УТ находится заслонка  $Z$  для автоматического перекрытия ионного пучка при наборе заданной дозы.

Ускорительная трубка состоит из последовательности изолированных электродов, между каждым из которых от источника высоковольтного питания ИН прикладывается напряжение до 20 кВ так, что крайние электроды имеют разность потенциалов около 200 кВ. Положительный пучок ионов ускоряется в направлении отрицательно смещенного электрода.

Приемная камера ПК служит для загрузки обрабатываемых полупроводниковых пластин, которые размещаются на кассете барабанного типа Б в несколько рядов. Вакуумная СБИСтема ВС обеспечивает разрежение  $2 \times 10^{-3}$  Па. При облучении ионный пучок сканирует вдоль оси вращающейся кассеты Б, что обеспечивает высокую однородность легирования. Перед кассетой стоит прямоугольная диафрагма Д, которая задает высоту и ширину облучаемой области. Время облучения  $t$ (с) для набора дозы  $Q$ (Кл/м<sup>2</sup>) при плотности ионного тока  $j$ (А/м<sup>2</sup>) определяется соотношением

$$t = \frac{2\pi Q}{\alpha j},$$

где  $\alpha$  — выраженный в радианах угол, определяемый сектором окружности барабана, на который попадает ионный пучок, проходящий через диафрагму заданной ширины.

Сектор тем больше, чем шире диафрагма. Для набора малых доз ширину диафрагмы уменьшают, что ведет к уменьшению  $\alpha$  и увеличению длительности облучения до нескольких минут, что, в свою очередь, улучшает точность контроля дозы.

Рабочие вещества для получения ионов могут находиться в газообразном, твердом и жидком состояниях, для получения ионов  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $Ne^+$ ,  $Ar^+$ ,  $F^+$ ,  $Cl^+$  и т. п. используют соответствующий газ, поступающий в вакуумную камеру источника ионов через микронатекатель. Из других газообразных материалов следует отметить применение  $BF_3$  для ионов  $B^+$ ,  $CO_2$  для ионов  $C^+$ ,  $H_2S$  для ионов  $S^+$ . Широко применяют жидкие вещества, особенно хлориды  $BCl_3$ ,  $BBr_3$ ,  $PCl_3$ ,  $CCl_4$ ,  $SiCl_4$ , хорошо испаряющиеся при комнатной температуре. Наибольшие ионные токи обычно достигаются при употреблении твердых материалов в элементарном виде. Эти вещества требуют нагрева, чтобы получить достаточное давление паров: S и P (красный) —  $175^\circ C$ , As— $260^\circ C$ , Zn, Se и Te— $550^\circ C$ , Mg и Sb— $580^\circ C$ . Могут быть использованы и другие вещества. Основное требование к ним — большое парциальное содержание легирующего элемента в парах. Вследствие выделения изотопной линии легирующего элемента в анализаторе масс в отличие от других методов легирования полупроводников к рабочим веществам не предъявляют жестких требований по чистоте.

При определении режимов ионной имплантации основными параметрами являются энергия ускоренных ионов и доза облучения. Ион с зарядом  $q$  (Кл) под действием разности потенциалов  $U$  (В) приобретает энергию  $E$  (Дж):

$$E = qU.$$

На практике принято, говоря об энергии ускоренных ионов, выражать её в электрон-вольтах (эВ) или килоэлектрон-вольтах (кэВ). Так как кратность ионизации обычно составляет  $n=1, 2$  или  $3$  электрона, то заряд иона может изменяться от 1 до  $3e$ . В общем случае

$$q = ne.$$

для обозначения кратности ионизации применяют символ «+», например  $^{31}P^+$ ,  $^{31}P^{++}$ ,  $^{31}P^{+++}$ . Числом 31 обозначена атомная масса иона фосфора. Иногда для имплантации используют не моноатомные ионы, а молекулярные, например  $^{14}N_2^+$  — однократно ионизированная двухатомная молекула азота с атомной массой 14, молекулярной массой  $2 \cdot 14 = 28$  или  $BF_2^+$  -- однократно ионизированная трехатомная молекула фторида бора. Молекулярные ионы, внедряясь в кристалл, обычно сразу распадаются на отдельные атомы. для подсчета энергии, которой будет обладать каждый атом с массой  $M_1$ , входящий в ускоренный ион с молекулярной массой  $M_n$ , используют соотношение

$$E_1 = EM_1/M_n.$$

Доза облучения — это количество частиц, бомбардирующих единицу поверхности за данное время. Доза может не быть равной тому количеству ионов, которое осталось в кристалле после завершения процесса облучения, вследствие наличия явлений распыления и отражения. В большинстве случаев эти явления не оказывают заметного влияния на количество внедренных ионов.

Доза облучения  $q$  (Кл/м<sup>2</sup>) определяется плотностью ионного тока  $j$  (А/м<sup>2</sup>) и длительностью облучения  $t$  (с):

$$Q = jt .$$

Практически плотность ионного тока выражают обычно в мкА/см<sup>2</sup>, поэтому дозу облучения выражают в мкКл/см<sup>2</sup>. Величина  $Q$  не отражает в явном виде числа примесных ионов, внедрённых в кристалл. Чтобы выразить дозу в количестве частиц, внедрённых на единице поверхности (ион/м<sup>2</sup>), величину  $Q$  делят на заряд одного иона:

$$N = Q/q = jt/(en) .$$

Имея в виду, что  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл, а  $Q$  имеет размерность мкКл/см<sup>2</sup>, доза облучения (ион/см<sup>2</sup>)

$$N = 6,25 \cdot 10^{12} Q/n .$$

Метод ионной имплантации является основным в планарной технологии, сочетающей загонку примеси в виде дозированного количества ионов и диффузионную разгонку. Совмещение ионной имплантации с планарной технологией облегчается применением тех же легирующих примесей и веществ для их получения, что и при диффузии; использованием тех же материалов для маскирования при таких же толщинах, что никак не влияет на процесс фотолитографии; возможностью управления дозами облучения в очень широких пределах (от  $10^{10}$  до  $10^{17}$  см<sup>-2</sup>) при высокой производительности.

Основные преимущества метода ионной имплантации, на которых базируется его использование в серийном производстве, состоят в точном контроле полного количества внедренной примеси и высокой однородности легирования по поверхности пластины. Неоднородность в распределении плотности внедренной примеси по пластине с диаметрами 100% мм составляет 1 % или менее при невозпроизводимости результатов от процесса к процессу в пределах 3%. Точность контроля на большинстве технологических операций полупроводникового производства не достигает 1—3% и колеблется в пределах 10—20%.

### 3.3. Моделирование процессов формирования конфигурации элементов

*Модели процессов оптической литографии. Субтрактивный и аддитивный процессы. Параметры процесса. Последовательность расчета модели. Учёт второй координаты.*

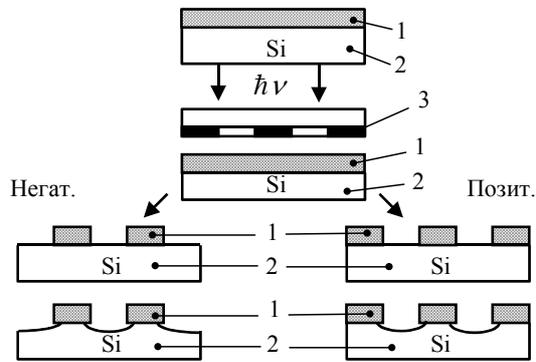
*Моделирование процессов осаждения тонких пленок, в том числе металлических методами вакуумного испарения и магнетронного распыления, а также процессов их травления. Алгоритм модели струны. Граничные условия. Формируемые профили плёнок на подложках со сложным рельефом. Применение программ технологического моделирования (SAMPLE и др.).*

Фотолитография - это процесс формирования на поверхности пластины с помощью светочувствительного химически стойкого материала рельефного покрытия с изображением элементов схемы и последующего переноса

изображения на подложку. Химические светочувствительные светоСБИСтемы, в которых под действием излучения определенного спектрального состава протекают фотохимические процессы, получили название фоторезистов. Фоторезисты, у которых растворимость освещенного (экспонированного) участка уменьшается, называются позитивными, а растворимость которых после облучения возрастает - негативными.

Экспонирование фоторезистов производят через фотомаску (фотошаблон) с изображением элементов схемы. После обработки фоторезиста в растворе, удаляющем экспонированные участки (проявитель) на поверхности пластины образуется рельефное изображение, устойчивое к воздействию агрессивных сред даже при нагревании. Полимерные СБИСтемы, из которых формируют фоторезисты, могут быть чувствительны не только к видимому или УФ-излучению, но и к потоку электронов (электронорезисты) или к рентгеновскому излучению (рентгенорезисты). Процесс литографии соответственно называется электронолитография и рентгенолитография. Схема процесса фотолитографии приведена на рисунке 3.3. Виды литографических процессов показаны на рисунке 3.4.

Рассмотрим фотохимические процессы в фоторезистах. Главным свойством фотохимических превращений является то, что поглощенный фотон действует селективно, возбуждая лишь отдельную молекулу органической СБИСтемы и не затрагивая остальных. Кинетику фотохимических реакций можно представить как 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.



1-фоторезист; 2-подложка; 3-фотошаблон

Рисунок 3.3 – Схема процесса фотолитографии

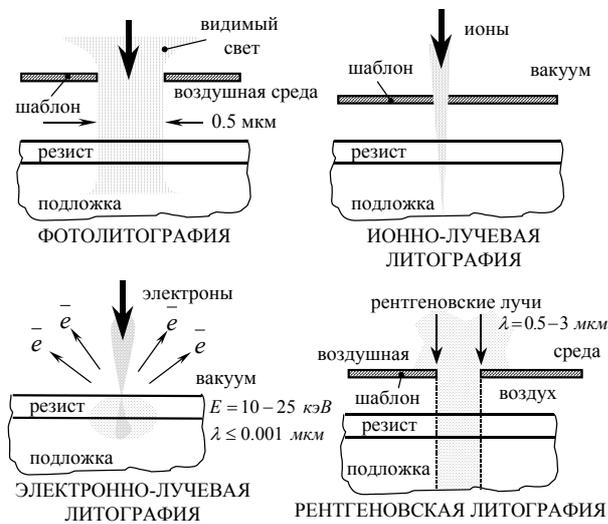


Рисунок 3.4 – Виды литографических процессов

Для оценки эффективности фотохимических взаимодействий вводится понятие квантового выхода  $Y$ , который определяется как отношение числа прореагировавших молекул ( $N$ ) к числу поглощенных фотонов ( $Q/h\nu$ ):

$$Y = \frac{N}{Q/h\nu}, \quad (3.1)$$

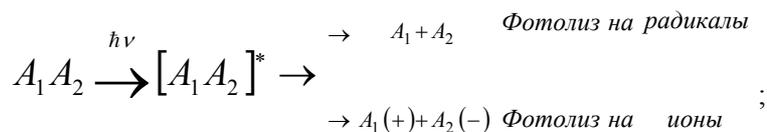
где  $Q$  - количество поглощенной световой энергии;

$h\nu$  - энергия фотона;

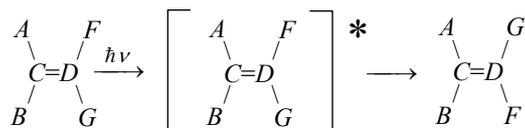
$Y = 10^{-3} \dots 10^6$ .

Различают несколько типов фотохимических реакций:

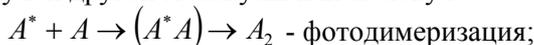
1. Реакция фотолиза - возбуждение молекул фотоном с последующим распадом на активные частицы:



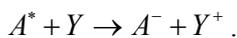
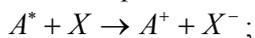
2. Реакции фотоперегруппировки - перестановка атомов (или радикалов) в главной цепи молекулы под действием света, чаще всего поворот одной группы атомов относительно другой:



3. Реакция фотоприсоединения - присоединении активированной молекулой другой молекулы или молекул:



4. Реакции фотопереноса электрона - отщепление электрона у молекулы, возбужденной фотоном:



Часто различные типы фотохимических реакций протекают параллельно в одной органической СБИСистеме. Химический процесс, стимулированный светом, приводит к образованию радикалов, химическая активность которых достаточна для протекания вторичных процессов.

Свойства (параметры) фоторезистов:

1. светочувствительность - величина, обратная экспозиции, требуемой для перевода фоторезиста в растворимое (позитивный процесс) или в нерастворимое (негативный процесс) состояние. Фоторезист должен обладать максимальной светочувствительностью в требуемом диапазоне длин волн. Большинство фоторезистов имеют максимальную чувствительность в ближней УФ-области спектра 500-550 нм (~0.5 мкм);
2. разрешающая способность - максимально возможное число сплошных контрастно различимых полос фоторезиста, разделенных промежутками равной ширины, размещенных на одном мм;
3. стойкость к воздействию агрессивных сред. Этот параметр трудно оценить количественно. Иногда эта величина пропорциональна времени отслаивания пленки фоторезиста при обработке в стандартном травителе (сек);
4. стабильность эксплуатационных характеристик фоторезиста во времени определяется их неизменностью при определенных условиях хранения и использования.

Требования к фоторезистам:

1. высокая светочувствительность в требуемом диапазоне Л;
2. высокая разрешающая способность 1000-2000 линий/мм при толщине фоторезиста - 0.1 мкм;
3. высокая адгезия к нижележащим слоям;
4. высокая контрастность;
5. устойчивость в химически агрессивных средах;
6. однородность и стабильность свойств;
7. отсутствие загрязнений продуктами химических превращений.

Основные фоторезисты: ФП - 333; ФП - 383М; ФП - РН - 7; ФН - 106; ФН - 108; ФН-11.

Нанесение пленок в условиях вакуума представляет собой физическое осаждение вещества из газовой фазы. Газовая фаза состоит из атомов и молекул осаждаемого вещества. Необходимо учитывать присутствие атомов и молекул остаточных газов. Сущность процесса термического испарения заключается в нагреве вещества в высоком вакууме  $\sim 10^{-4}$  -  $10^{-6}$  Па. до температуры, когда давление его собственных паров на несколько порядков превышает давление остаточных газов. При этом атомы испаренного вещества распространяются прямолинейно, т.к. длина свободного пробега значительно превышает расстояние "источник-подложка".

В соответствии с физическими процессами, протекающими при термическом испарении материалов в вакууме, можно выделить три основных фазы (области) протекания:

- область образования паров (образование атомарно-молекулярного потока);

- область переноса паров (пролет частиц к подложке);
- область конденсации паров (конденсация паров).

Рассмотрим эти области. В области образования потока происходит испарение материала. Молекулы, обладающие наибольшей кинетической энергией при данной температуре, преодолевают силы молекулярного, поверхностного натяжения и отрываются от поверхности расплава. Температура испарения - это температура, при которой давление равновесного пара испаренного вещества достигнет  $10^{-2}$  мм.рт.ст.

Обычно при нагреве вещество сначала плавится, а затем начинает испаряться. Однако некоторые материалы (*Sb, Mg, Ti, Mo*) имеют температуру испарения ниже температуры плавления. Такие материалы легко испаряются в вакууме из твердого состояния. Такое явление называют сублимацией. Обычно вещества переходят в пар при любой температуре выше абсолютного нуля, но для увеличения интенсивности парообразования необходим нагрев вещества. С ростом температуры возрастает средняя кинетическая энергия атомов и увеличивается вероятность разрывов межатомных связей. Удельная скорость испарения (интенсивность испарения), равная количеству граммов вещества, испаренного за одну секунду с площади  $S$  определяется:

$$W = 0,585 p_s \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (3.2)$$

где  $p_s$  - давление насыщенного пара испаряемого вещества;

$M$  - молекулярная масса вещества [г/моль];

$T$  - температура вещества (К).

Величина  $p_s$  сильно зависит от  $T$ . Рост  $T$  на 5-10% сверх  $T_{исп}$  приводит к увеличению  $p_s$  и росту  $W$  на порядок.

Вторая фаза – область переноса паров. Распространение атомарно-молекулярного потока от источника пара к подложке осуществляется путём диффузионного и конвективного массопереноса на который влияет степень вакуума. Для получения пленок с наименьшим содержанием примесей необходимо, чтобы атомы и молекулы пара двигались к подложкам без столкновений с молекулами остаточного газа, т.е. прямолинейно. Это возможно, если длина свободного пробега частиц пара  $\lambda$  будет больше расстояния "источник-подложка".

Из кинетической теории газов известно, что:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 N}; \quad N = \frac{p}{kT}, \quad \text{поэтому } \lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}, \quad (3.3)$$

где  $d$  - эффективный диаметр молекул;

$N$  - концентрация молекул при данном  $p$  и  $T$ ,  $1/\text{см}^{-3}$ .

Начиная с давления  $p = 10^{-2}$  Па  $\lambda = 47 \dots 4700$  см становится намного больше расстояния "подложка-источник" и вероятность столкновений в пролетном пространстве с молекулами остаточного газа крайне низка.

Третья фаза - процесс конденсации паров. Процесс конденсации зависит от температуры подложки. При этом могут происходить три явления: адсорбция, приводящая к окончательному осаждению атома; адсорбция, приводящая к реиспарению через некоторое время; отражение сразу же после удара. Отражение обычно имеет наибольшую вероятность. Согласно теории конденсации, электрически нейтральные частицы пара при приближении к поверхности конденсации попадают в поле сил притяжения. На очень близком расстоянии на конденсирующуюся частицу действуют силы отталкивания.

Конденсация атомов происходит при условии, если их энергия связи с атомами подложки больше средней энергии атомов подложки, в противном случае атомы отражаются от подложки.

Температура, выше которой все атомы отражаются от подложки и пленка не образуется, называется критической температурой конденсации. Она зависит от материалов пленки и подложки и от состояния поверхности последней.

Образование зародышей происходит в результате нахождения атомами мест, соответствующих минимуму свободной энергии СБИСтемы "атом-подложка". Рост зародышей происходит за счет присоединения новых атомов из парового потока или мигрирующих по подложке. По мере конденсации пара зародыши растут, между ними образуются соединительные мостики, зародыши сливаются в крупные островки. После этого наступает стадия слияния островков с образованием сетчатой структуры пленки. Сетчатая структура переходит в сплошную пленку, которая начинает расти в толщину. На этапе образования зародышей воздействие остаточных газов на пленку должно быть сведено к минимуму. Это обеспечивается или повышением степени вакуума или увеличением скорости парообразования.

#### 4. Методы и алгоритмы численного физико-топологического моделирования полупроводниковых структур

##### 4.1. Физико-топологическое моделирование полупроводниковых структур

*Цель физико-топологического моделирования полупроводниковых структур. Физико-математические основы моделирования полупроводниковых структур: фундаментальная СБИСтема уравнений полупроводника. Граничные условия в численном моделировании структур. Сопутствующие эффекты и модели (эффект сильного легирования, модели подвижности зарядов, процессов генерации-рекомбинации носителей, саморазогрева и др.). Основные методы и алгоритмы численного физико-топологического моделирования полупроводниковых структур.*

Фундаментальная СБИСтема уравнений полупроводника:

Уравнение Пуассона:

$$\varepsilon_0 \varepsilon \Delta U = -q (p - n - C_A + C_D). \quad (4.1)$$

Обобщённое уравнение Максвелла:  $\text{div } D = \rho$ ;

$$\text{div} (\varepsilon_0 \varepsilon E) = \rho; \quad E = -\text{grad } U \quad (4.2)$$

Тогда:

$$\text{div} (\varepsilon_0 \varepsilon \text{grad } U) = -\rho.$$

Т.к.

$$\rho = q (p - n - C_A + C_D), \text{ то} \\ \text{div grad } U = -q / \varepsilon_0 \varepsilon (p - n - C_A + C_D). \quad (4.3)$$

Уравнение непрерывности:

$$dn/dt - 1/q (\text{div } J_n) = -R_n, \quad dp/dt - 1/q (\text{div } J_p) = -R_p \quad (4.4)$$

$$J_n = q D_n \nabla n - q n \mu_n E_n = \mu_n n \nabla E_{Fn}, \quad J_p = -q D_p \nabla p + q p \mu_p E_p = \mu_p p \nabla E_{Fp}. \quad (4.5)$$

Моделирование обычно ведут в два этапа:

1. разбиение пространственной области на сетку из отдельных точек,
2. нахождение численными методами неизвестных переменных.

Ниже приведены основные подходы к построению дискретных физико-топологических моделей:

УРОВЕНЬ	СОСТАВЛЯЮЩИЕ
Форма записи уравнений	→ интегральная, дифференциальная
Метод дискретизации	→ конечных элементов, конечных разностей
Подход к построению разностных схем	→ локальный, интегральный

Символьный эскиз выполняется в СБИС-системе автоматизированного проектирования типа ТОПАЗ -75 и обновлённых версий.

Библиотеки типовых конструкторских решений: СИМПАС, SLIC, SIDS, MASKS, IGS и др.

Общая схема разработки:

- выбор библиотеки и символьных обозначений;
- подбор масштабной сетки;
- разработка правил проектирования;
- разработка символьного эскиза;
- контроль;
- восстановление реализованной электрической схемы;
- сравнение;
- генерация топологических чертежей.

Более детальная информация о численных методах моделирования имеется в книге: Абрамов И.И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых ИС. - Мн.: БГУ. - 1999. - 189 с.

#### 4.2. Моделирование твердотельных структур изделий силовой электроники

*Классификация изделий силовой электроники (MOSFET, ДМОП, транзисторов со структурой IGBT и др.). Модели и основные характеристики IGBT. Маршрутная технология мощных диодов Шоттки. Применяемое оборудование, технологические методы и режимы проведения основных операций маршрута. Аттестация изделий силовой электроники на соответствие стандарту ISO 9001.*

Как правило, к силовым полупроводниковым приборам относят такие, которые способны переключать ток не менее 1 А. Их можно разделить на два класса – выпрямительные устройства и ключи. Рассмотрим особенности последних.

По мере увеличения уровня мощности и рабочей частоты современных источников питания (конвертеров) растет потребность в усовершенствованных твердотельных ключах. Первыми из них в массовом производстве были освоены биполярные транзисторы. До появления мощных МОП ПТ они оставались единственными "реальными" твердотельными приборами, способными выдерживать блокирующее напряжение до 1 - 2 кВ и переключать токи до 200-500 А за 10-100 нс. Их основное достоинство – хорошо отработанная технология изготовления и, следовательно, низкая стоимость, благодаря чему биполярные транзисторы и сейчас находят применение в СБИС-системах развертки телевизоров и схемах балластного сопротивления осветительных ламп. Но эти транзисторы имеют и серьезные недостатки – большой базовый ток включения (равный одной пятой коллекторного тока) и достаточно длительное время выключения (наличие хвоста тока). Кроме того,

они подвержены тепловому пробоя, что обусловлено их отрицательным температурным коэффициентом. МОП ПТ, напротив, управляются напряжением, и их температурный коэффициент положителен. При параллельном включении сопротивление канала транзисторов в открытом состоянии ( $R_{си\text{ откр}}$ ) может быть бесконечно малым. Поэтому и падение их напряжения в открытом состоянии намного меньше (т.е. эффективность выше), чем у биполярных приборов, у которых этот параметр не может быть меньше коллекторного напряжения насыщения. К тому же, для МОП ПТ отсутствует хвост тока при выключении. Все это способствовало расширению их применения, особенно в ключевых схемах. Однако при высоких значениях пробивного напряжения ( $>200\text{ В}$ )  $R_{си\text{ откр}}$  и, следовательно, падение напряжения МОП ПТ в открытом состоянии больше, чем у биполярного, рассчитанного на то же напряжение пробоя (величина  $R_{си\text{ откр}}$  пропорциональна пробивному напряжению в степени 2,7). Поскольку одновременно нельзя уменьшать топологические размеры областей кристалла и удельное сопротивление его канала, МОП ПТ не может претендовать на звание современного "идеального" мощного транзистора, т.е. транзистора с нулевым сопротивлением (и падением напряжения) при включении, бесконечно большим сопротивлением при отключении и бесконечно высоким быстродействием.

В 1982 году специалисты фирм RCA и General Electric практически одновременно обнаружили, что если изменить тип проводимости  $n^+$ -области стока в  $p$ -канальном МОП ПТ на  $p^+$ -тип, можно получить новый прибор. При подаче положительного напряжения на затвор электроны, эмитируемые в  $p^+$ -область образовавшейся  $pn^+p^+$ -структуры биполярного транзистора, вызывают появление в слаболегированной  $n$ -области канала большого дырочного тока и, соответственно, изменение его сопротивления. При этом ток канала МОП-структуры является и током базы биполярной структуры, т.е. МОП ПТ управляет током биполярного транзистора.

Поскольку через область базы биполярной структуры протекает большое число электронов и дырок, проводимость базы возрастает на несколько порядков. По значению полного входного сопротивления новые приборы оказались сопоставимыми с МОП ПТ, а по независимым от тока характеристикам насыщения – с биполярными. Таким образом, эффективность БТИЗ оказалась выше, занимаемая площадь меньше и, следовательно, стоимость ниже, чем МОП ПТ. Объединение двух структур позволило повысить напряжение пробоя транзисторов до 1500 В при переключении тока до 100 А. Но следует отметить, что  $n$ -канальные БТИЗ до сих пор не имеют  $p$ -канальных аналогов. Новый прибор, в конце концов, получил название биполярного транзистора с изолированным затвором, хотя пока не принято единого, установившегося его обозначения (рисунок 4.1).

МОП ПТ и БТИЗ имеют одинаковые выводы и требования к схеме возбуждения. Для их включения требуется напряжение 12-15 В, а для выключения не нужно подавать отрицательное напряжение. Для схемы возбуждения затвор обоих типов транзисторов рассматривается как конденсатор, емкость которого

в приборах большого размера может достигать нескольких тысяч пикофарад. Чтобы время переключения транзистора было достаточно малым, схема возбуждения должна обеспечивать быструю зарядку и разрядку этого конденсатора. Правда, поскольку БТИЗ с такими же, как у МОП ПТ, параметрами занимает в 2,5 раз меньшую площадь кристалла, емкость его входного конденсатора также меньше. Следует отметить, что производители предпочитают указывать не только значение емкости затвора, но и его заряд, поскольку значение емкости, зависящее от размеров, не позволяет точно оценить характеристики переключения при сравнении двух приборов различных фирм. Зная же заряд на затворе, конструктор может легко рассчитать значение тока, требуемого для переключения транзистора за заданное время.

Но механизмы, определяющие потери мощности двух типов приборов, различны. В МОП ПТ эти потери в основном обусловлены потерями на электропроводность, тогда как потери на переключение на достаточно низких частотах (<50 кГц) в 3,5 раза меньше. В БТИЗ все наоборот: потери на электропроводность значительно меньше, чем у МОП ПТ, тогда как потери на переключение велики, особенно на высоких частотах. Но из-за меньшей площади БТИЗ его рассеиваемая мощность намного больше. Следствие этого - значительный рост температуры р-п-перехода БТИЗ. Чтобы температура не превышала критического значения, общая рассеиваемая мощность БТИЗ не должна быть выше некоторой заданной величины, рассчитываемой с учетом значений теплового сопротивления теплоотвода, корпуса, рп-переходов МОП ПТ и БТИЗ.

С другой стороны, с увеличением мощности (и, следовательно, с ростом температуры прибора) потери на электропроводность МОП ПТ растут быстрее, чем потери на переключение БТИЗ. При значении переключаемой мощности 300 Вт потери обоих типов транзисторов сопоставимы, а при 500 Вт БТИЗ получают преимущество. Но с ростом частоты переключения БТИЗ это преимущество теряют.

Таким образом, не существует четкого разграничения между областями применения МОП ПТ и БТИЗ, их можно лишь приблизительно разграничить для конкретных приборов. Согласно рекомендациям крупнейшего производителя полупроводниковых приборов для СБИСтем распределения мощности и управления двигателями - фирмы International Rectifier, сегодня БТИЗ целесообразно применять в СБИСтемах, работающих при высоких уровнях напряжения (>1000 В) на низких частотах, с малым рабочим циклом и при незначительных колебаниях сети или нагрузки. А МОП ПТ предпочтительно применять в высокочастотных (>20 кГц) СБИСтемах, предназначенных для работы при относительно невысоких напряжениях (<250 В) с большим рабочим циклом и при достаточно больших колебаниях сети или нагрузки.

В соответствии с этими рекомендациями можно определить типичные области применения каждого типа транзистора:

- для БТИЗ – это СБИСтемы управления двигателями, работающими на

- частоте менее 20 кГц и требующими защиты от короткого замыкания/выбросов пускового тока; низкочастотные источники бесперебойного питания, работающие с постоянной нагрузкой; НЧ-сварочное оборудование на большие значения среднего тока;
- маломощные низкочастотные СБИСтемы (<100 кГц) регулировки осветительных ламп;
  - для МОП ПТ – импульсные источники питания, рассчитанные на частоты выше 20 кГц или на переключение при нуле напряжения и мощности менее 1000 Вт, зарядные устройства.

Модель вертикального ДМОП транзистора, состоящую из емкостной и резистивной эквивалентной схем показана на рисунках 4.4, 4.5.

Для расчёта величины  $R_{си\ откр}$  в зависимости от параметров геометрии кристалла используются специализированные программы расчёта.

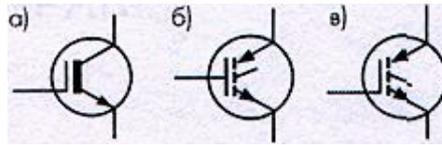


Рисунок 4.1 – Обозначения для БТИЗ (IGBT), предложенные фирмами производителями: Advanced Power Technology (а), STMicroelectronics (б), Harris Semiconductor (в)

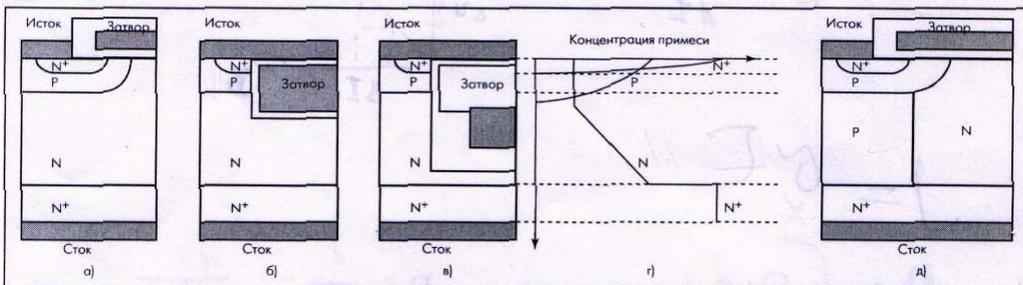


Рисунок 4.2 – Структуры современных МОП ПТ; а) ДМОП-структура. б) структура с формируемым в канавке затвором, в) структура с плавно изменяемым профилем легирования области дрейфа, г) профиль легирования, д) структура COOLMOS

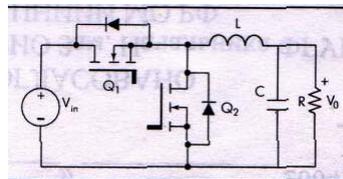


Рисунок 4.3 – Схема неизолированного обратноходового конвертора с синхронным выпрямлением:  $Q_1$  – управляющий транзистор, определяющий скорость переключения, вследствие чего его ёмкость должна быть мала;  $Q_2$  – синхронный транзистор, в котором преобладают потери, обусловленные проводимостью канала

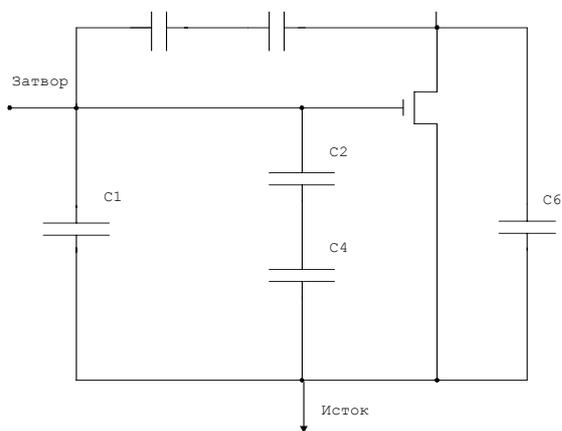


Рисунок 4.4 – Эквивалентная емкостная электрическая схема вертикального силового n-канального ДМОП – транзистора

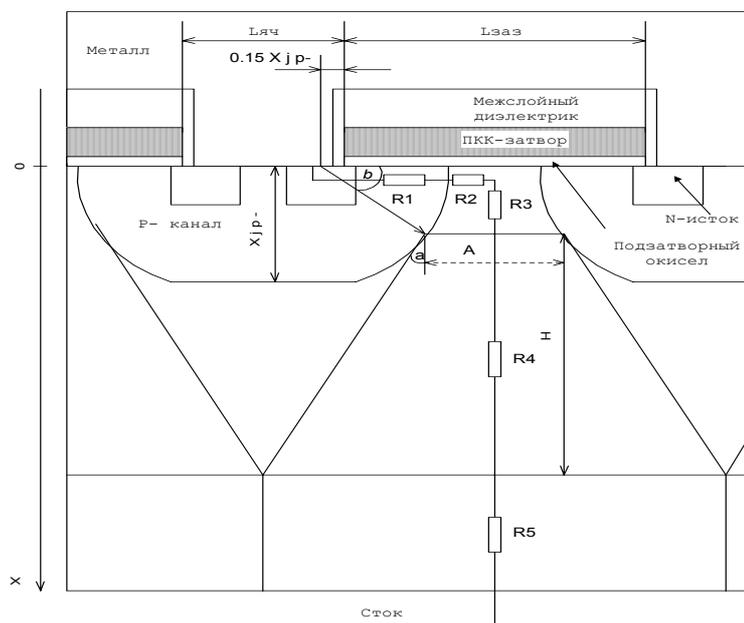


Рисунок 4.5 – Сечение фрагмента активной части кристалла вертикального силового n-канального ДМОП транзистора с элементами, составляющими его эквивалентную резистивную электрическую схему

5. Управление качеством в проектировании и производстве БИС и СБИС.  
Обеспечение параметров и стандартов качества на этапе проектирования

## 5.1. Качество и проектирование производства конкурентоспособной продукции

*Жизненный цикл продукции (изделий электронной техники). Основные этапы разработки новой техники: маркетинг, проектирование и разработка продукции, логистика, разработка и освоение производственных процессов, производство, контроль и испытания (включая способы выявления причин брака и отказов), упаковка и хранение, реализация и продвижение продукции, монтаж и эксплуатация, обслуживание, утилизация. Примеры.*

Жизненный цикл современных БИС и СБИС лежит в пределах 5-7 лет.

Основными этапами разработки новой техники являются следующие:

- маркетинг,
- проектирование и разработка продукции,
- логистика,
- разработка и освоение производственных процессов,
- производство,
- контроль и испытания (включая способы выявления причин брака и отказов),
- упаковка и хранение,
- реализация и продвижение продукции,
- монтаж и эксплуатация,
- обслуживание,
- утилизация.

## 5.2. Основы устойчивого проектирования технологии БИС

*Понятия параметров качества продукции. Факторы, влияющие на процент выхода годных кристаллов (потерю качества). Виды функции потери качества в зависимости от оптимальной оценки выходного параметра кристалла. СБИС-система контроля качества и управления технологическим процессом производства БИС и СБИС и её функционирования. Основы комплексного автоматизированного производства ИЭТ.*

К числу обобщённых показателей качества изготавливаемых БИС и СБИС относятся:

- Себестоимость при массовом выпуске;
- Надёжность в процессе эксплуатации.

Себестоимость определяется материалоёмкостью ИЭТ, трудозатратами на их разработку, освоение производства, изготовления кристаллов, их сборки в корпус и герметизации.

При проектировании ИЭТ, например ИМС, важной задачей является определение оптимальных конструкторско-технологических решений. Так, если схема устройства подразделяется на большое число ИМС, то ожидается низкий процент брака (соответственно высокий процент выхода годных), но

общая стоимость изделия вероятнее всего окажется высокой из-за значительной стоимости сборки, большой материалоемкости изделия на общей печатной плате. Действительно, стоимость сборочных операций с учётом всех применяемых материалов достигает порой 65% от стоимости всей ИМС. И наоборот, если изделие разбивается на небольшое число блоков, которые предполагаются изготавливаться в интегральном исполнении, то из-за их низкого процента выхода годных производство также может оказаться неэффективным, т.к. значительная часть кристаллов отбраковывается. Рис. 1. Начальный спад себестоимости обусловлен снижением материалоемкости конструкции в целом, а последующий её рост – снижением процента выхода годных кристаллов. Поэтому для изготовления качественной продукции на этапе её проектирования важно правильно оценивать процент выхода годных БИС.

Международная организация по стандартизации – ISO была создана в 1946 г. с целью разработки стандартов и содействия международной торговле и техническому прогрессу. Новые стандарты базировались на опыте более, чем 30 стран. Особое внимание было уделено военным стандартам MIL-Q-9858A, MIL-Q-45208A, национальным стандартам США ANSI, стандартам НАТО AQAP-1 и др., стандартам Великобритании BS, Канады CSA, Франции AFNOR. В 1987 г. был создан комплекс стандартов ISO 9000, который содержит прогрессивные формы и методы организации работ по управлению качеством, охватывающий все стадии жизненного цикла продукции.

Эти стандарты ориентируют продукцию на удовлетворение требований потребителей и приняты ЕС.

МС ISO 9000 устанавливают, что предприятие должно решать три главные задачи в области качества:

1. Достигать и поддерживать качество продукции и услуги на уровне, соответствующем требованиям потребителя;
2. Руководство должно быть уверено в уровне качества;
3. Потребитель должен быть уверен в достигнутом уровне качества.

Серия стандартов ISO 9000 включает:

МС ISO 9000 – общее руководство качеством и перечень стандартов, указания по выбору и применению.

МС ISO 9001 – СБИСтема качества. Модель обеспечения качеством при проектировании и разработке производства, монтаже, обслуживании.

МС ISO 9002 – СБИСтема качества. Модель для обеспечения качества при проектировании и монтаже.

МС ISO 9003 – СБИСтема качества. Модель для обеспечения качества при окончательном контроле и испытаниях.

МС ISO 9004 – руководящие указания по СБИСтемам качества.

В основу политики в области качества положена концепция «шесть сигма», которая заимствована из опыта американской фирмы Motorola.

В реальном производственном процессе имеются неконтролируемые вариации условий выполнения операций, свойств материалов, режимов работы оборудования, действий операторов, которые не отвечают требованиям

наилучшего качества продукции. Эти отличия между параметрами изделий имеют нормальное распределение.

Графически нормальное распределение представляется колоколообразной кривой, охватывающей 99,73% площади разбросом в  $6\sigma$ . Область размером 0,27% представляет собой не соответствующую спецификации продукцию.

Однако для продукции, от которой зависит здоровье и безопасность, такая концепция непригодна (2700 бракованных приборов на миллион). Кроме того, как показывает опыт, средние показатели процессов могут быть сдвинуты до  $1,5\sigma$ . Когда это происходит, то только 93,32% области будут находиться под кривой внутри спецификаций. (66000 бракованных приборов на миллион).

Для понижения числа отбракованных изделий процессы требуется «центрировать», т.е. настраивать на достижение математического ожидания по контролируемому параметру. Тогда может быть достигнуто даже при сдвиге на  $1,5\sigma$  всего 3,4 дефектов на миллион.

Для оценки качества проведения всех важных процессов можно воспользоваться тремя показателями:

1. Коэффициент потенциальной воспроизводимости процесса

$$C_p = \text{ширина поля допуска} / \text{разброс процесса} = (USL - LSI) / 6\sigma$$

2. Коэффициент воспроизводимости процесса

$C_v = \text{среднее значение} - \text{ближний предел спецификации} / \text{половину разброса} (3\sigma)$

$$C_v = C_p(1 - K),$$

где  $K = (\text{номинальное значение} - \text{среднее значение процесса}) / \text{половину ширины поля допуска}$

3. Коэффициент нестабильности процесса

$$HC = \text{число точек вне контролируемого поля} / \text{общее число данных} * 100.$$

Если все точки под контролем  $HC = 0$ , если все вне контроля  $HC = 100$ .

Для выявления различных дефектов качества продукции и их классификации с целью последующего анализа могут использоваться методы неразрушающих испытаний (НРИ), которые в целом находят применение в СБИС-системе поэтапного дефектоскопического обеспечения, показанной на рис. Она представляет собой совокупность методов и средств, а также метрологического обеспечения, которые сопровождают этапы разработки, производства и эксплуатации изделий.

В ней можно выделить ряд подСБИС-систем:

1. техническая – совокупность методов и средств НРИ;

2. нормативная – совокупность стандартов и других нормативных документов;  
метрологическая.

### 5.3. Тестирование и контроль БИС и СБИС

*Методы тестирования интегральных микросхем. Функциональный контроль БИС и СБИС на пластинах и в корпусах. Совмещённый*

Методология поиска отказов БИС и СБИС.

Отказы БИС и СБИС могут вызываться как скрытыми дефектами при работе их в номинальных режимах, так и несоблюдением режимов работы. Если главенствует вторая причина, то можно рекомендовать два способа обнаружения дефектов:

1. Фиксируются максимальные значения нагрузки на ИМС при подконтрольной эксплуатации а РЭС. Это реализуется с помощью датчиков перегрузок, что используется, например, при поставках кинескопов некоторыми фирмами.
2. Многофакторное моделирование условий работы ИМС в условиях лаборатории – изделия подвергаются одновременному воздействию тепловых, механических и других нагрузок.

СБИСемы поэтапного дефектоскопического обеспечения БИС и СБИС

ПодСБИСемы:

- Техническая
- Нормативная
- Метрологическая

Способы выявления причин отказов основаны на видах отказов, например, пробой, электромиграция и др. Последовательность проведения первичного анализа БИС и СБИС зависит от категории БИС и СБИС и аналитических возможностей предприятия.

Выбор методов выявления и отбраковки БИС и СБИС со скрытыми дефектами также определяется возможностями предприятия, в частности имеющейся аппаратурой (оптическим и электронными микроскопами, спектрометрами и т.п.).

#### 5.4. Методы повышения помехоустойчивости БИС и СБИС

*Классификация помех, воздействующих на работу цифровых БИС и СБИС. Методы повышения устойчивости БИС и СБИС к помехам по цепям питания и генерируемых в цепях межсоединений. Методы защиты от электрических перегрузок, примеры.*

Наиболее радиационно-чувствительными структурами КМОП БИС являются активные МОП-транзисторы (в особенности, n-канальные) и паразитные МОП-транзисторы, связанные с изолирующим оксидом. Дисперсия же статических параметров интегральных микросхем зависят от разброса геометрических размеров активных элементов и стабильности технологического процесса. В этой связи к числу основных характеристик технологии МОП-структур, потенциально оказывающими наибольшее влияние на устойчивость к внешним воздействиям (ВВ) -  $\gamma$ -излучению и повышенным

температурам в процессе эксплуатации (специфичность микросхем), можно отнести температурные режимы, механические напряжения и неконтролируемые примеси.

Из конструктивных параметров КМОП БИС наибольшее влияние на устойчивость к ВВ оказывают толщина подзатворного и изолирующего оксидов и вертикальные размеры элементов структуры МОП-транзисторов, типичные значения которых сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 - Основные параметры слоев элемента КМОП-структуры

Элемент структуры	Толщина, мкм	Материал	Поверхностное сопротивление, кОм/□
<i>p</i> -карман	5±1,25	КДБ	2,9±0,3
<i>n</i> -карман	5±1,25	КЭФ	1,7±0,3
Оксид локальный	0,6±0,1	SiO <sub>2</sub>	-
Оксид подзатворный	0,025±0,0025	SiO <sub>2</sub>	-
Оксид межслойный (первый)	0,7±0,1	БСС (SiO <sub>2</sub> +6,5±0,5% В) или ФСС (SiO <sub>2</sub> +1,6±0,5% Р)	-
Пассивация	1,5±0,25	SiO <sub>2</sub>	-

В настоящее время принято считать, что наибольшее влияние на специфичность КМОП БИС оказывают режимы операций, протекающих в процессе и после формирования слоев подзатворного (тонкого) и изолирующего (толстого) оксидов.

На практике длительность и температурный режим на стадиях загрузки и выгрузки партий пластин имеют существенный разброс. Кроме того, после операции локального окисления следует не менее 8 высокотемпературных операций. Эта последовательность может влиять на уровень механических напряжений в изолирующем и подзатворном оксидах и на концентрацию содержащихся в них примесных включений. Так, операция диффузии фосфора проводится при температуре ~900оС. При этом можно полагать, что повышенная, по сравнению с температурой формирования тонкого оксида, температура операции может влиять на микроструктуру диэлектрика, а также на распределение механических напряжений в плёнках. Зависимость же плотности дефектов в оксиде от концентрации хлора в процессе выращивания оксида немонотонна, и при повышении концентрации хлора выше оптимальной плотность дефектов может превысить предельное значение, что, в конечном счёте, приведёт к снижению устойчивости БИС к ВВ.

Режимы операций термообработки контактов и «вжигания» алюминия также имеют разброс, что может быть существенным для распределения механических напряжений в тонкоплёночной структуре. Кроме того, величина этих напряжений зависит от толщины металлической плёнки.

Разброс параметров техпроцесса применительно к качеству оксида может приводить к следующим эффектам:

1. Изменению характеристик нестехиометрического оксида вблизи границы раздела с кремнием. В зависимости от максимальной температуры в процессе окисления, приграничный слой термического оксида имеет различную дефектность, которая оценивается как  $N = f(e^{-W/kT})$ , где  $W \approx 1,5$  эВ. Кроме того, механические напряжения, преимущественно в приграничной области, существенно зависят не только от температуры (обычно контролируемой), но и от кинетики процессов нагрева и остывания, а также ряда других факторов;

2. Введению различного количества примесей, в основном – водородосодержащих. В результате при облучении возможно высвобождение радиолитических ионов, чаще всего – протонов.

Оба эти фактора приводят к нестабильности характеристик радиационной стойкости, например, возникновению токов утечки подзатворного диэлектрика.

При разработке конструкции радиационностойких КМОП логических интегральных микросхем, следует исходить из того факта, что наибольшее влияние на их работоспособность при воздействии ионизирующих излучений оказывают не объемные эффекты в кремнии, а поверхностные эффекты, проявляющиеся на границе раздела «кремний – диэлектрик». При этом генерируются электронно-дырочные пары, значительная часть которых подвергается рекомбинации в течение короткого промежутка времени. Оставшаяся часть под действием электрических полей в оксиде приходит в движение. Электроны, имеющие высокую подвижность, перемещаются к областям с положительным зарядом, а дырки, имеющие низкую подвижность, захватываются на ловушках в диэлектрике. В результате захвата дырок происходит изменение вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик как в активных, так и в паразитных областях структуры БИС. Плотность «захваченного» заряда стремится к насыщению по мере увеличения поглощенной дозы и слабо зависит от мощности дозы. «Наведенный» положительный заряд в оксиде изменяет пороговые напряжения «рабочих» и «паразитных» МОП-транзисторов, причем изменение пороговых напряжений МОП-транзисторов зависит как от величины и полярности напряжения на затворе во время облучения, так и от особенностей конструкции и технологии КМОП БИС. Максимальный сдвиг порогового напряжения происходит у n-канальных транзисторов при положительном напряжении на затворе. В меньшей степени подобные процессы проявляются в структурах МОП-транзисторов при эксплуатации в условиях повышенных температур.

Таким образом, при проектировании маршрутной технологии КМОП БИС, устойчивых к ВВ, необходимо, прежде всего, решить две основные проблемы:

- разработать радиационностойкую технологию формирования блока изоляции;
- разработать конструкцию и топологию МОП-транзисторов, сохраняющих высокую стабильность электрических характеристик при воздействии  $\gamma$ -излучения.

Вторая по важности задача получения КМОП ИС, устойчивых к большим дозам ионизирующего облучения, связана с созданием конструкций основных «рабочих» транзисторов с минимальным уходом величины пороговых напряжений.

6. Механизмы деградации элементов структуры БИС и СБИС. Факторы, влияющие на выход годных кристаллов

### 6.1. Модели деградации элементов структуры БИС

*Роль точечных дефектов в выходе годных. Модели процессов деградации элементов структуры БИС, приводящих к снижению выхода годных. Отказы тонкопленочной металлизации. Технические средства анализа качества твердотельных структур. Увеличение выхода годных кристаллов БИС с резервной компоновкой. Технологические проблемы повышения выхода годных и основные пути их решения.*

Среди причин снижения процента выхода годных выделяются три группы факторов:

- Факторы проектирования,
- Технологические,
- Случайные (точечные и линейные дефекты на пластине).

Наличие факторов проектирования объясняется тем, что на этапе проектирования сложно предусмотреть влияние конструктивно-технологических погрешностей на целом блоке операций. Поэтому одинаковые отклонения, например, протяжённости областей или толщины различных диффузионных или ионно-легированных слоёв приводят к различному влиянию на статические и динамические характеристики микросхемы. В частности, отклонения размеров приконтактных слоёв меньше влияют на характеристики ИМС, чем отклонения длины затворов МОП БИС.

Технологические факторы в значительной степени связаны с распределением макронапряжений в многослойной структуре подложка-плёнка. Они возникают вследствие изменения удельного объёма плёнки  $\text{SiO}_2$  по отношению к исходному Si. Поэтому при проведении операций окисления размер пластины может изменяться до 0,002%, что для пластины диаметром 150 мм означает изменение её размера на 3 мм. Тогда возникают погрешности совмещения, которые, как правило, выше на периферийной части.

Другой пример технологических факторов связан с недостаточным качеством операций очистки. Остающиеся на поверхности химические реактивы могут вызывать повышение токов утечки и приводить к отбраковке кристаллов.

К случайным причинам относится попадание пыли (частичка пыли размером 3 мкм может привести к обрыву проводника шириной 2мкм).

Твёрдые частицы могут присутствовать в растворах фоторезистов, а также попадать на поверхность в виде отколовшихся кусочков при манипулировании с пластинами на стадии их загрузки-выгрузки, контроля и др.

Выход годных ИМС можно представить в следующей форме:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \gamma_1 \cdot (D_0, S, \alpha_i),$$

где  $\gamma$  - отношение числа годных кристаллов к общему числу кристаллов на пластине,

$(1 - \gamma_0)$  – доля дефектных кристаллов, обусловленная технологическими факторами или чувствительностью схемы к технологии,

$\gamma_1$  – выход годных кристаллов из оставшейся части кристаллов,

$D_0$  – плотность точечных дефектов на единицу площади,

$S$  – площадь кристалла,

$\alpha_i$  – параметры выбранной модели выхода годных кристаллов.

Величина процента выхода годных по мере совершенствования технологии постоянно повышается.

Операции сухого травления вносят меньше дефектов, чем жидкостного, проекционная литография – меньше, чем контактная, ионное легирование – меньше, чем диффузия и т.д.

Классический пример распределения точечных дефектов по пластине – распределение Пуассона:

$$P_k = e^{-m} m^k / k!,$$

где  $P_k$  – вероятность того, что данный кристалл содержит  $k$  дефектов,

$m = n / N$  ( $n$  – число дефектов на пластине,  $N$  – число кристаллов на пластине).

Оно использовалось при оценке процента выхода годных на ранних этапах развития технологии микроэлектроники. Однако для БИС оно даёт заниженные результаты из-за неточного представления величины  $D$ .

В настоящее время используется гамма-распределение плотности точечных дефектов  $D$ :

$$f(D) = 1 / [\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha] \cdot D^{\alpha-1} \cdot e^{-D/\beta},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - параметры распределения,

$\Gamma(\alpha)$  – гамма-функция.

В предельном случае гамма-распределение сводится к дельта-функции, т.е.

$$f(D) = \delta(D - D_0).$$

Для БИС с резервными компонентами, которые включают для замены дефектных компонентов при помощи плавких перемычек, выход годных определяется как:

$$\gamma_1 = P_0 + \eta \cdot P_1,$$

где  $P_0$  – вероятность отсутствия дефектов в кристалле,

$P_1$  – вероятность того, что кристалл содержит один дефект,

$\eta$  - вероятность того, что кристалл, содержащий один дефект, может быть восстановлен при использовании резервной копии.

Имеются также поправочные функции, учитывающие радиальное изменение плотности дефектов  $D$ , когда  $D$  изменяется по закону:

$$D(r) = D_0 + D_R \cdot e^{-(r-R)/L},$$

где  $D_0$  – плотность дефектов в центре пластины,

$r$  – радиальная координата,

$R$  – радиус пластины,

$L$  – характеристическая длина, зависящая от дефектности краевых областей.

Для СБИС характерной чертой технологии стала индивидуальная обработка пластин. Кроме того, полное число операций процесса их изготовления достигает 400-500. С целью исключения в этой связи случайных погрешностей со стороны технологов и операторов требуется внедрять автоматизированную СБИС-систему контроля качеством.

При этом следует учесть, что для эффективной работы такой СБИС-системы необходимо обеспечить сбор и обработку огромного количества результатов измерений и другой информации. Она должна быть точной, своевременной и допускать быструю обработку.

АСУ КК и УТП может включать в себя следующие элементы:

- маршрут движения данных в процессе их набора и построения модели;
- маршрут их сбора и автоматизированного управления ТП;
- комплект программ по обработке результатов контроля, паспортизация партий пластин, операций и др.;
- массив данных контроля пластин и режимов оборудования;
- комплекс программ по отслеживанию условий работы оборудования;
- математическая модель технологического процесса;
- состояние ТП на конкретной партии пластин;
- сигнальные сообщения о сбоях в работе оборудования;
- ввод данных о проценте выхода годных;
- управляющие директивы ЭВМ о режимах ТП по конкретным партиям;
- автоматизация по месту контроля;
- неавтоматизированные места контроля (данные измерений заносятся в сопроводительный лист, а затем с него вводятся в память ЭВМ);
- данные о технологическом оборудовании;
- данные контроля конструктивных параметров и электрических характеристик пластин;
- данные о режимах технологических операций;
- данные о надёжности оборудования.

Функционирование АСКК и УТП. Её работа основана на использовании статистических методов регулирования и управления. Построена на основе математической модели выхода годных ИМС. Входными данными являются результаты контроля параметров и режимов операций технологического процесса.

Использование этой СБИСтемы позволяет обеспечить СБИСтемный подход к технологии, что означает следующее:

- качественно оценивать состояние технологического процесса;
- в кратчайшие сроки выбирать требуемые мероприятия по управлению производством;
- существенную помощь в анализе брака и его причин (на какой операции);
- получение ИМС с заданными выходными параметрами.

Вследствие различия степени автоматизации технологических операций и по мере её улучшения СБИСтема создавалась в течение некоторого периода, в котором можно выделить следующие этапы:

- организационное обеспечение СБИСтемного контроля технологического процесса, т.е. контроль режимов на всех операциях, геометрических размеров формируемых элементов и фрагментов твёрдотельных структур, учёт особенностей оборудования, влияния персонала и т.д.;
- паспортизация технологического процесса производства конкретного вида ИМС, т.е. получение паспортов партий с указанием участков, смен и других характеристик по результатам контроля;
- разработка и внедрение контрольных карт, характеристик воспроизводимости технологического процесса, определение технологических запасов, контроль временных тенденций ухода выходных параметров;
- разработка программ корреляционного анализа (связь контрольных параметров с выходом годных);
- разработка программ построения графических зависимостей, программ выявляющих тенденции в использовании оборудования и программ, сигнализирующих об аварийном состоянии оборудования;
- разработка программ создания массивов данных, приводящих в соответствие контрольные параметры пластин с режимами технологических операций;
- построение математических моделей оптимального технологического процесса, т.е. определение сочетаний контролируемых параметров, технологических режимов, обеспечивающих планируемый выход годных кристаллов и ИМС в целом;
- разработка программ, описывающих партии по маршруту, сравнение результатов текущего контроля с оптимальной моделью и выдача рекомендаций о режимах последующих операций технологического процесса.

Использовать АСКК и УТП можно также на этапе проектирования новых изделий, опираясь на ранее созданные аналоги. При этом можно обеспечить минимальный дрейф выходных параметров изделия за счёт выбора рабочей зоны входных параметров. Кроме того, можно оптимизировать технологические параметры по отношению сигнал / шум. СБИСтема может служить основой для создания комплексного автоматизированного производства ИЭТ.

Комплексно-автоматизированной (механизированной) производственной СБИСтемой называют комплекс, имеющий общую производственную

программу и представляющий собой совокупность как минимум двух автоматических (комплексно-механизированных) линий, связанных материально-транспортными потоками и объединённых общей автоматизированной СБИС-системой управления (технологией и производством в целом).

Поточной линией называют совокупность основного и вспомогательного технологического оборудования и технологических приспособлений, в которой операции переработки или сборки выполняемые с участием оператора, закреплены за определённым оборудованием или рабочими местами. При этом последовательность расположения оборудования или рабочих мест соответствует последовательности операций технологического процесса.

Комплексно-механизированной называют поточную линию, в которой все основные операции выполняются механизмами с взаимно увязанной производительностью. Транспортные операции механизированы.

Автоматической называют поточную линию, в которой операции выполняются без постоянного участия оператора. Он может лишь участвовать в управлении технологическим оборудованием. Действуют только наладчики.

Основой для построения комплексно-автоматизированной (механизированной) производственной СБИС-системы является технологический процесс. Он представляется рядом последовательных операций  $j = 1, 2, 3 \dots n$ , между которыми располагаются контрольные операции  $i = 1, 2, 3 \dots m$ .

Контрольная операция выявляет брак на группе технологических операций, при этом определяется процент выхода годных:

$$\alpha_j = N_{\text{вых } j} / N_{\text{вх } j}.$$

Общий процент выхода годных изделий определяется по формуле:

$$\beta = \alpha_1 * \alpha_2 * \dots * \alpha_j.$$

Если известна годовая программа выпуска изделий, то зная существующие проценты выхода годных, можно определить количество приборов, которые должны поступить на каждую операцию, и – в целом объём запуска.

При выборе рациональной структуры данной СБИС-системы главенствующими являются общие параметры технологического процесса, в частности следующие: изменение объекта обработки, например, переход от пластины к кристаллу.

При этом скачкообразно изменяется групповой коэффициент обработки и величина рабочего цикла; технологические особенности процесса, в том числе наличие технологического единства, общих методов обработки, позволяющие связать оборудование в единый комплекс или линию с единой конечной целью, завершающейся созданием объекта, поддающегося контролю параметров и хранению.

## 6.2. Выявление и отбраковка БИС и СБИС со скрытыми дефектами

*Параметрический контроль БИС и СБИС. Коэффициенты чувствительности выходных параметров БИС и СБИС к внутренним*

дефектам. Определение границ области функционирования БИС и СБИС. Показатели безотказности БИС и СБИС. Влияние внутрисхемных утечек на характеристики базового вентиля цифровых БИС и СБИС.

Известные методы отбраковки БИС при пониженном напряжении питания обычно не обеспечивает высокой вероятности отбраковки БИС, имеющих встроенные каналы токовых утечек.

При снижении напряжения питания ( $U_{CC}$ ) нелинейность сопротивления утечки резко возрастает, начиная с некоторого значения напряжения питания, и его влияние на выходные параметры усиливается. Для каждой БИС существует индивидуальное значение  $U_{CC}$ , при котором начинается экспоненциальное увеличение сопротивления утечки. В этой ситуации исходят из тех соображений, что наиболее информативным параметром исследуемой выходной характеристики является напряжение, соответствующее точке экстремума (максимальной кривизны) зависимости.

При практической реализации так называемого метода второй производной напряжение питания должно изменяться во времени по линейному закону:

$$U_{CC} = U_{CCN} - \lambda^1 t,$$

где  $U_{CCN}$  - номинальное напряжение питания, В;

$t$  - время, с;

$\lambda^1$  - скорость изменения напряжения питания,  $U_{CC}$ , В/сек.

Для избежания влияния переходных процессов в цепях БИС на результат измерений, на практике достаточно установить  $\lambda^1 = 1$  В/с, что соответствует возможностям стандартного измерительного оборудования.

Поскольку напряжение логического нуля является функцией напряжения питания:

$$U_{0L} = F(U_{CC}),$$

то можно выполнить следующие преобразования:

$$dU_{0L}/dt = (dU_{0L}/dU_{CC}) \cdot dU_{CC}/dt = -\lambda^1 dU_{0L}/dU_{CC}.$$

Отсюда получим выражение для второй производной в виде:

$$U_{0L} / t^2 = \lambda^2 \cdot U_{0L} / U_{CC}.$$

Следовательно, вторая производная от напряжения логического нуля по напряжению питания связана со второй производной по времени линейной зависимостью. Положение экстремума второй производной, определенное по напряжению питания и по времени, связаны соотношением:

$$U_{CC}^{\max} = U_{CCN} - \lambda^1 t_m,$$

где  $t_m$  - момент времени, соответствующий максимуму функции

$$U_{0L} / t^2 = F(U_{CC}).$$

На рисунке 6.1 представлен алгоритм методики.

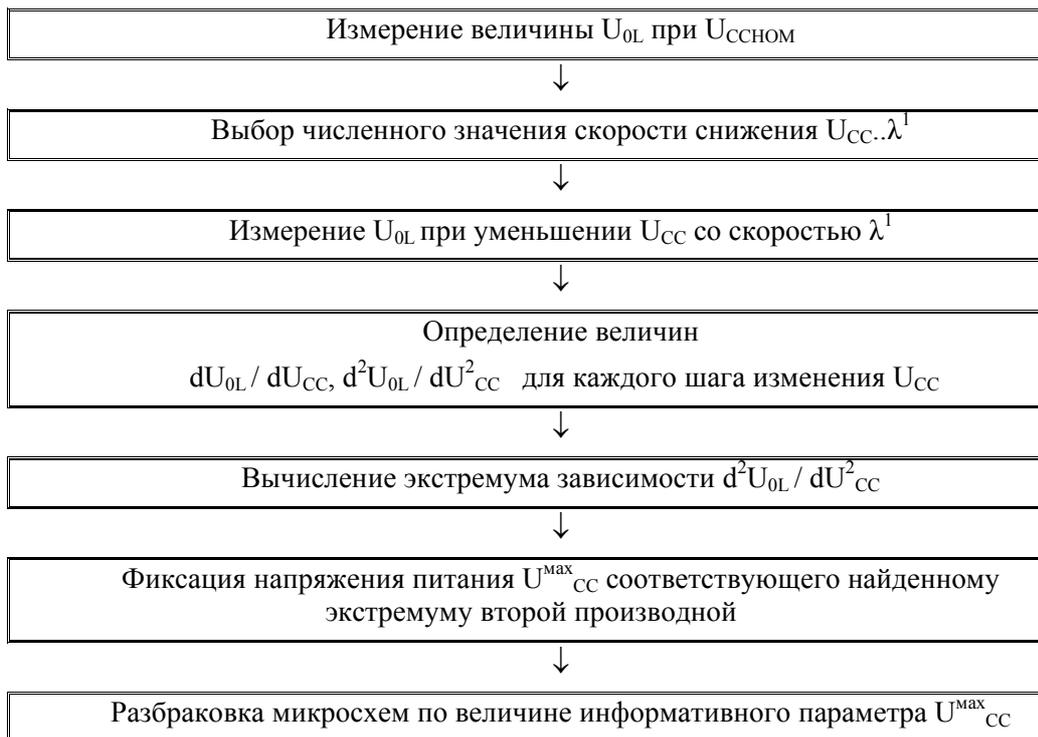


Рисунок 6.1 – Алгоритм методики контроля методом второй производной параметра  $U_{0L}$

Последовательность реализации этого алгоритма:

1. Измерение на контролируемых выводах значений параметра  $U_{OL}$  при номинальном напряжении питания  $U_{CC}^{ном} = 5 \text{ В}$ .

2. Определение скорости ( $\lambda^1$ ) и шага снижения  $U_{CC}$  (для БИС серии К1533 оптимальная величина  $\Delta U_{CC} = 0,01 \text{ В}$ ).

3. Набор результатов измерений  $U_{OL1}, U_{OL2}, \dots, U_{OLM}$  при каждом шаге снижения напряжения питания.

4. Вычисление величины  $dU_{OL}/dU_{CC}$ ,  $d^2U_{OL}/dU_{CC}^2$  по формулам:

$$dU_{OL}/dU_{CC} = (U_{LM} - U_{LM-1}) / \Delta U_{CC},$$

$$d^2U_{OL}/dU_{CC}^2 = U_{LM} - 2U_{LM-1} + U_{LM-2}.$$

5. Определение напряжения питания  $U_{CC}^{max}$ , соответствующего экстремуму зависимости

$$d^2U_{OL}/dU_{CC}^2 = F(U_{CC}).$$

6. Разбраковка партии БИС по величине критерия  $U_{CC}^{max}$ .

Численные значения критерия разбраковки  $U_{CC}^{max}$  определяются для каждого типа БИС следующим образом. Формируется выборка, включающая БИС различных технологических партий, в количестве не менее 500 шт. для каждого типонаминала БИС. Каждой БИС осуществляются замеры величин  $U_{CC}^{max}$ . Проводятся термоциклирование всей выборки БИС. Через каждые 5 циклов на каждой БИС измерялось значение величины  $U_{CC}^{max}$ . Годными считались БИС, у которых математическое ожидание контролируемого параметра после 20 термоциклов оставалось неизменным.

Для оценки достоверности разработанной методики на практике был проведен ряд экспериментальных исследований серийных ТТЛШ БИС типа К1533.

Прежде всего, проведено исследование влияния термоциклов ( $-60^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$ ) на величину выбранного информативного параметра  $U_{CC}^{max}$  для БИС К1533ИЕ7 (выборка  $n = 750$  шт.).

В результате проведения анализа влияния температуры на величину  $U_{CC}^{max}$  были обнаружены факты как обратимых, так и необратимых изменений значений  $U_{CC}^{max}$ . Установлено, что стабильность критических напряжений питания связана с наличием конкретных скрытых дефектов. Возрастание величины  $U_{CCM}$  для последних связано с увеличением внутрисхемных утечек по дефектам в процессе испытаний. БИС, у которых  $U_{CCM} < 2,9 \text{ В}$  характеризуются повышенной надежностью. В результате подтвердилось, что отбраковка по методу второй производной выходной характеристики  $U_{OL} = F(U_{CC})$  обладает высокой корреляцией с температурными испытаниями.

Более масштабные экспериментальные исследования разработанной методики, представленной в виде алгоритма на рис.3., были реализованы с использованием ряда БИС серии 1533, для чего были выбраны различные

типы БИС средней и большой степени интеграции – счетчики, делители, сдвиговые регистры:

K1533ИЕ6 – двоично-десятичный реверсивный счетчик;

K1533ИЕ7 – четырехразрядный двоичный реверсивный счетчик;

K1533ИЕ8 – делитель частоты с переменным коэффициентом деления;

K1533ИР1 – сдвиговой регистр.

Была принята следующая последовательность эксперимента:

1. На входном контроле отбирались БИС, отбракованные при контроле статических параметров при крайних значениях рабочих температур с фиксацией температуры отказа.

2. Проводилось повторное измерение отобранных схем методом второй производной при той температуре, при которой они были забракованы, с выводом значений контролируемых параметров на печатающее устройство.

3. Отбирались БИС, забракованные по параметрам  $U_{0L}, U_{0H}$ , и на них в нормальных условиях проводились измерения статических параметров с целью отбраковки тех из них, которые показали отказы при комнатной температуре. Иначе говоря, для эксперимента отбирались БИС, не удовлетворяющие техническим условиям на границах температурного диапазона, но годные в нормальных условиях.

4. После этого осуществлялся контроль выходных напряжений  $U_{0L}, U_{0H}$ , а также контроль функционирования отобранных схем по специальной диагностической измерительной программе в нормальных условиях при варьировании величины напряжения питания.

5. По распечаткам контролируемых параметров определялась та область допустимого изменения  $U_{CC}$ , в которой дефектная БИС еще является «годной». При этом за критерий отбора принималось условие  $U_{CCM} < 2,9В$ .

Одновременно проводилось измерение по той динамической программе БИС контрольной группы того же типа, но полностью годных по всем критериям выходного контроля.

Количество БИС исследуемой группы (дефектные БИС), отказавших в нормальных условиях, увеличивается при уменьшении напряжения питания. Отбраковка БИС контрольной группы (определение годных БИС) начинается с напряжения около 3,0 В и приобретает катастрофический характер при  $U_{CC} = 2,9 В$ . Таким образом, варьируя критерием отбраковки можно ужесточить или смягчить контроль в определённых пределах.

Таким образом, данная методика обладает высокой точностью контроля, так как предполагает отбраковку БИС не при фиксированном пониженном  $U_{CC}$ , а при напряжении питания, соответствующем максимальной доле внутрисхемной утечки. Кроме того, изложенный в методике подход позволяет определять критерии отбраковки без применения статистической обработки результатов эксперимента, за счет чего снижаются ошибки первого и второго рода.

## 7. СБИСтемное проектирование блока микромонтажных операций

### 7.1. Основы маршрутной технологии микромонтажных операций

*Роль микромонтажных операций в производстве ИЭТ. Требования к микромонтажным операциям в технологии ИМС. Разновидности базовых конструктивно-технологических решений микромонтажа кристаллов: посадка на «эвтектику», клей, легкоплавкий припой; две разновидности подсоединения выводов, варианты подсоединения проволочных выводов. Основные характеристики процессов. Виды корпусов. Сборочное оборудование.*

Микромонтажные соединения прежде всего должны обеспечивать надежную электрическую связь траверсов корпуса с контактными площадками кристалла БИС.

Среди различных методов проволочный микромонтаж остается в условиях серийного производства одним из основных, т.к. он удобен, прост, универсален, а стоимость оборудования относительно невелика.

Стоимость присоединения проволочных выводов составляет значительную часть общей стоимости, поэтому потребность в автоматизации этого процесса весьма велика и продолжает расти с увеличением степени интеграции БИС из-за увеличения количества контактных площадок кристалла и внешних выводов корпуса БИС.

Среди основных методов подсоединения проволочных выводов, таких как: термокомпрессионная сварка (ТКС), термозвуковая сварка (ТЗС), ультразвуковая сварка (УЗС), электроконтактная односторонняя сварка расщепленным электродом (ЭКОС), сварка косвенным импульсным нагревом (СКИН). В НПО "Интеграл" в настоящее время не используются лишь сварка по методам ЭКОС и СКИН. Наиболее широкое распространение получили методы ТКС и ТЗС с использованием золотой проволоки и УЗС с использованием алюминиевой проволоки[149, 151,159].

Основные характеристики указанных методов, применяемых в серийном производстве БИС с использованием разработок в рамках диссертации, приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Характеристики методов подсоединения проволочных выводов при микромонтаже кристаллов БИС

Метод сварки	Основные характеристики процесса	Материал контактных площадок	Материал проволоки	Тип соединения
ТКС	Температура подложки 290-350°C Давление 0,4-2Н Время 0,05-0,5с	Al, Au, Ag	Au AAu, доп. Al Au, доп. С	Внахлестку- внахлестку Встык-внахлестку Внахлестку-

				внахлестку
ТЗС	Температура подложки 105-200°C Частота 66± 6кГц амплитуда 0,5 мкм давление 0,2-1Н Время 0,05-0,2с	Al, Au, Ag	Au, доп. Cu	То же
УЗС	Частота 66± 6кГц амплитуда 0,2-1мкм давление 0,1-1Н Время 0,02-0,1с	Al, Au, Ag Ni и др.	Al Al, доп. Au Al, доп. Cu	Встык-внахлестку То же -«-
ЭКОС		Au, Ni, Ag, Al, Ti	Au, Ag, Cu доп. сплавы на основе Au и Ag	-«-
СКИН		Au, Ni, Ag, Al, Ti	Au, Ag, Al доп. сплавы на основе Au и Ag	-«-

При выборе конкретных методов подсоединения проволочных выводов применительно к типовым конструкциям БИС и режимов микромонтажных операций на стадии освоения производства учитывались результаты исследований, описанные в гл. 5, а также такие критерии качества и эксплуатационной надежности микромонтажных проволочных соединений как уровень механических напряжений или размеры области напряженно-деформированного состояния (НДС) контактного узла сварное соединение - кристалл БИС, ввиду того, что из-за разности КТЛР герметизирующих компаундов, металлов проводников и пленок, диэлектрических слоев, кремниевой подложки, эвтектики (клеевых компаундов) и основания корпуса (выводной рамки) БИС сформированные структуры в кремнии и контактный узел постоянно находятся в напряженном состоянии. Это приводит к прогибу кремниевой подложки, нарушению структурного совершенства кристалла, сужению рабочего температурного диапазона и выходу из строя при многократном термоциклировании, а также ограничивает возможности создания быстродействующих БИС.

Сравнительный анализ качества микросварных соединений показал, что наибольший вклад в развитие дефектов контактного узла в виде локальных полей упругих напряжений вносит метод ТЗС золотой проволоки с ограниченным нагревом кристалла (200°C), при этом ширина поля напряжений по глубине 25 мкм составляет ~200 мкм. При ТЗН инструмент в холодном состоянии в момент касания с подложкой отводит тепло и снижает температуру в зоне сварки на 40-50°C. В условиях серийного производства это обстоятельство вынуждает технологов увеличивать при ТЗС или давление

на инструмент, или температуру нагрева кристалла, или мощность УЗ-генератора. Однако повышение температуры стола ограничивается, например, свойствами клея. Увеличение же амплитуды колебаний инструмента и давления на инструмент приводит к росту остаточных механических напряжений в областях кристалла, прилегающих к контактными площадкам.

В связи с этим в условиях цеха потребовалось ввести подогрев инструмента до 200°C, что обеспечило образование соединений при меньшей энергии активации процесса соединения. Так же, установлено, что нагрев кристаллов БИС, посаженных на клей, в диапазоне температур 200-250°C приводит при использовании данной модификации метода к резкому снижению уровня остаточных напряжений. При этом формирование сварных соединений при ТКС и ТЗС с подогревом инструмента происходит в условиях, когда кристаллы БИС находятся в практически ненагруженном состоянии. Поэтому ширина поля упругих напряжений в кремнии в первом случае уменьшается до 150 мкм, а во втором - до 100 мкм.

Перед УЗС алюминиевой проволоки кристаллы БИС хотя и находятся в ненагретом, наиболее напряженном состоянии, однако процесс сварки в условиях трения окисленных алюминиевых поверхностей, разрушения и выноса пленок и загрязнений контактных поверхностей облегчается настолько, что поле упругих напряжений в кремнии на глубине 25 мкм составляет 70-90 мкм.

Таким образом, используемые в производстве разработанные методы микросварки золотой проволокой по их воздействию на образование полей упругих напряжений в кристалле можно расположить в следующем порядке (по убыванию):

ТЗС с подогревом стола, ТКС, ТЗС с подогревом стола и инструмента, УЗС.

Микромонтажные соединения алюминиевой проволоки с кристаллами БИС, формируемые методом УЗС, обладают наименьшим полем упругих напряжений.

Отмеченные особенности микромонтажных соединений, полученных различными методами, иллюстрируются рис. 6.21, 6.22

На практике перед технологами при освоении техпроцесса ТКС и адаптации его к имеющемуся оборудованию стоят такие задачи как: определить оптимальную схему подвода тепла в зону сварки, необходимую геометрию сварочного инструмента; установить и поддерживать из смены в смену минимально допустимые и оптимальные режимы по температуре, скорости пластической деформации и длительности процессов, обеспечивающих заданное качество микромонтажных соединений.

В НПО "Интеграл" ТКС выполняется микропроволокой диаметром 25 и 30 мкм (серии К155, КР1533, К561 и др.), для микросхем, изготавливаемых в пластмассовых (DIP и SO) корпусах.

Практикой подтверждено, что наиболее эффективным при ТКС является одновременный нагрев прибора (подложки) и инструмента. Он позволяет исключить теплоотвод в инструмент и обеспечить строгое поддержание температуры в зоне сварки. Данное требование реализовано в установках нового поколения семейства ЭМ-4160 разработки и производства концерна точного машиностроения "Планар", г. Минск.

Для обычных при сборке БИС диаметров проводников в пределах 25-50 мкм параметры техпроцесса УЗ-сварки варьируются из следующих основных составляющих:

- частота сварочных импульсов 60-72 кГц выходная мощность УЗ частоты 0,063-6,3 Вт;
- усилие сжатия присоединяемых элементов 0,1-1,2Н время присоединения 0,01-0,2с.

Данные требования реализованы в установках семейства 4020А (4020Б), 4080П разработки и производства ГНП КТМ "Планар", г. Минск.

При этом УЗС рекомендуется проводить таким образом, что первую сварку выполняют на кристалле, т.к. это улучшает условия формирования петли после первой сварки и предупреждает замыкание с краем кристалла.

При этом возрастают требования к вылету проволоки из-под инструмента, который не должен превышать 1-1,5 диаметра проволоки. Кроме того, при микромонтаже в корпус с углублением трудно обеспечить первую сварку на кристалле, а вторую - на выводе с помощью стандартного инструмента с углом подачи проволоки 30°. Для преодоления этой трудности в ряде случаев в серийном производстве в настоящее время используют обратный метод формирования перемычки: сварка выполняется с вывода корпуса на кристалл. При этом для исключения вероятности замыкания корпуса на край кристалла используется инструмент и сварочная СБИС-система с углом подачи проволоки 60°.

Термозвуковая сварка, как наиболее перспективный способ сварки при микромонтаже изделий микроэлектроники, ТЗС используется в серийном производстве в первую очередь при автоматизированной сборке БИС, критичных к температурам свыше 200-250°С. К таким, в условиях производства НПО "Интеграл", относятся БИС и БИС телевизионной тематики (ILA8362ANS, ILA8395N, ILA1519B, ILA1519B, ILA3654Q, ILA8138A, ILA4661N и др.), заказные БИС (ILA84C641NS-068, INA84C640ANS-070 и др.), микросхемы телефонии (серии ЭКР/ЭКФ1436, КР/ЭКР 1008), спецназначения (ЭА133, ЭА1533) и др. Применим этот способ сварки и для сборки толстопленочных ГИС и печатных плат (рис. 6.23, 6.24).

Хотя из всех видов сварки, применяемых в производстве изделий микроэлектроники, ТЗС является более сложной в реализации, она отличается наибольшей гибкостью в выборе режимов, а поэтому весьма перспективна для автоматизированной сборки. Использование при ТЗС УЗ энергии наряду со снижением температуры обусловило ряд преимуществ,

таких, как увеличение скорости, относительная легкость установления приемлемых режимов, улучшение свариваемости более широкой номенклатуры материалов соединяемых поверхностей.

Используемый в серийном производстве материал проводников для ТЗС на НПО "Интеграл" - золотая проволока диаметром 25-50 мкм. Обработываемые корпуса - пластмассовые: DIP с числом выводов 8-52, SOP с числом выводов 8-28, SIL с числом выводов 5-17, TO-220 с числом выводов 3-7, QFP с числом выводов 44-100 и др. Наиболее полно требования к ТЗС реализованы в установках семейства 4060П (перспективные модели 4160) разработки и производства концерна "Планар", г. Минск.

## 7.2. Особенности сборки БИС на выводной рамке

*Эволюция покрытий на выводной рамке и материалов корпусов БИС. Основные маршруты сборки БИС на выводной рамке. Особенности микромонтажа изделий силовой электроники. Контроль качества.*

Эволюция применяемых материалов и их покрытий для базовых конструкций выводных рамок пластмассовых корпусов БИС, базирующаяся на внедрении разработанных методов нанесения тонких пленок и микромонтажа представлена в таблице 7.2.

Таблица 7.2 - Эволюция применяемых материалов для базовых конструкций выводных рамок

Год	Материал выводной рамки	Вид покрытия	Способ нанесения покрытия	Толщина покрытия, мкм
1974	Сплав НКН	Au	Плакированная полоса	4,5 (ширина 6,0 мм)
1979	То же	То же	То же	4,5 (ширина 5,6 мм)
1980	То же	То же	Гальваническое, локальное	4,0
1980	Сплав НФН	Au	Плакированная полоса	4,5
1981	То же	То же	Гальваническое, локальное	3,0
1984	Сплав 42Н	Au	Гальваническое, локальное	2,5
1988	То же	То же	То же	1,3
1994	То же	То же	То же	0,8
с 1998	Медные сплавы	Ag	Плакированная лента (основа)	6,0

с 1995	То же	То же	толщиной 0,4-1,6 мкм) Гальваническое, локальное (основа толщиной 0,15 - 0,25 мкм	4,0
--------	-------	-------	---	-----

Пластмассовые корпуса - самые дешевые и технологически освоенные. В силу своих конструктивных особенностей пластмассовые корпуса предполагают использование для межсоединений золотой проволоки и высокотеплопроводных материалов для корпусирования мощных БИС.

Металлокерамические (МКК) и металлостеклокерамические (МСК) корпуса используются для сборки изделий специального назначения. Определяющим признаком при выборе корпусов для конкретных типов конструкций БИС служит вид материала и покрытие центральной части их основания и материала для изоляции выводов, что отображено в таблице 7.3.

Таблица 7.3 –Характеристика применяемых корпусов БИС

Тип корпуса	Материал основания и покрытие под кристалл	Материал для изоляции выводов	Материал вывода корпуса
МСК	Стеклокерамика	Стеклокерамика	сплав 29НК
401.14-4	Ni-Au(гальв.)	то же	то же
401.14-5	Ni-Au(гальв.)	то же	то же
401.14-5.08	Ni-Au(хим.)	то же	то же
401.14-5I	Ni(хим.)	то же	то же
401.14-5НБ	Ni-In(гальв.)	то же	то же
401.14-5НБ	Ni-B(гальв)	то же	то же
МКК	керамика	керамика	сплав 29НК с заменой на сплав 42Н
402.16-32	Ni-Au(гальв.)	то же	то же
427.18-1	то же	то же	то же
4153.20-1	то же	то же	то же
405.24-2	то же	то же	то же
4118.24-1	то же	то же	то же
и т.д.			
То же	Керамика	то же	то же
	Ni (хим.)	то же	то же
	Ni-In (гальв.)	то же	то же
	Ni-B	то же	то же
	Ni-Au (хим.)	то же	то же

Для посадки кристаллов методом клеевой композиции толщина пленки золота в зоне разварки должна быть не менее 1,5-2 мкм, при каталитическом золочении - 0,1 мкм. Для корпусов с покрытием из Ni, Ni-In, Ni-B покрытие золотом отсутствует. Для посадки кристаллов методом эвтектической пайки в зоне посадки создается пленка золота толщиной не менее 3 мкм.

Эволюция применяемых материалов покрытий для базовых конструкций МСК и МКК приведена в таблице 7.4.

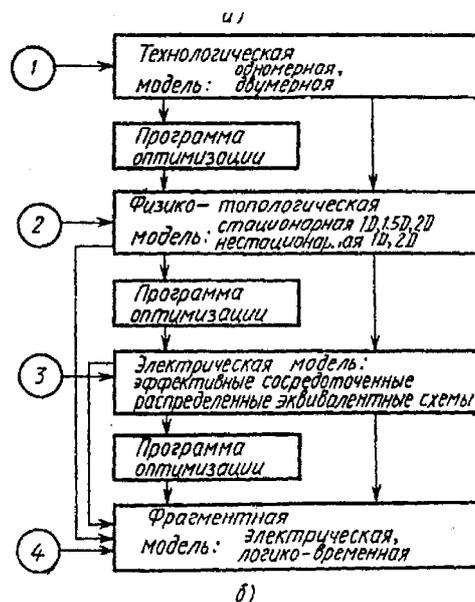
Таблица 7.4 – Характеристики покрытий корпусов БИС

Год	Вид покрытия	Толщина покрытия, мкм	Способ посадки кристалла
<b>МСК</b>			
1965	Ni-Au Ni-Au	6,0 сплошное золочение 4,0 сплошное золочение	эвтектика клеевая композиция
1980	Ni-Au Ni-Au Ni	6,0/2,0 селективное золочение 4,0/1,5 селективное золочение 6,0 золотое покрытие	эвтектика клеевая композиция Клеевая композиция
1993	Ni-In Ni-B хим.Ni <sub>3</sub> - хим.Au 0,1	отсутствует То же То же 0,1 каталитическое золочение	То же То же То же клеевая композиция
<b>МКК</b>			
1974	Ni-Au	4,0 сплошное золочение 3,0 сплошное золочение	эвтектика клеевая композиция
1985 г.Дон- ской	Ni-Au	5,0/2,0/2,0 селективное золочение	эвтектика
1989 г.Й-Ола	Ni-Au	5,0/1,5/1,0 селективное золочение	эвтектика или клеевая
1989	Ni-Au	2,0/0,25/0,75 селективное золочение	эвтектика на сплав Zn-Al-Ge
1992	Ni(Hд9) (Ni3.м.Ni6) Ni-B(Hт9) (Ni3.м.Ni6пб .Ni-B 9,99)	9,0 золотое покрытие отсутствует 9,0 золотое покрытие отсутствует	клеевая композиция то же
1992	Ni3.хим.An	0,1 каталитическое золочение	то же

## 8. Методы автоматизированного проектирования электрической схемы и топологических чертежей БИС

*Роль САПР в совершенствовании разработки и производства БИС. Интерфейсные БИС, БИС на биполярных транзисторах с диодами Шоттки, их основные параметры. Особенности автоматизированного проектирования БИС. Основные средства автоматизированной разработки электрической схемы БИС. Интерактивный, символический и библиотечный методы проектирования топологических чертежей. Методы проверки, влияние малых топологических размеров биполярных транзисторов.*

Взаимодействие программ многоуровневого моделирования БИС и СБИС иллюстрируется рисунком 8.1.



Взаимодействие программ многоуровневого моделирования в рамках «супер-САПР» БИС:

а — с последовательной передачей выходной информации; б — использованием программ оптимизации для определения параметров модели последующего уровня расчета БИС

Рисунок 8.1 – Взаимодействие программ многоуровневого моделирования БИС и СБИС

## 9. Основы бездефектного проектирования топологического чертежа БИС

*Основные принципы бездефектного проектирования БИС. Алгоритмы синтеза и контроля эскиза топологического чертежа БИС. Основные операции проектирования. Учёт взаимодействия элементов друг с другом и влияния межэлементных соединений.*

Интерактивный метод проектирования топологических чертежей.

Интерактивный метод проектирования стал применяться в практике разработки БИС и СБИС ещё в начале 70-х годов с появлением первых интерактивных графических СБИС-ем (ИГС).

При использовании этого метода в качестве основного инструмента проектирования разработчику предоставляется удобное средство обработки графической информации – графический редактор. Благодаря этому процесс создания топологических чертежей ИС сводится к многократному применению процедур ввода и редактирования геометрических фигур, а роль ЭВМ – к обеспечению надежного способа хранения, удобного отображения и оперативного изменения описания чертежей топологических слоев.

Кодирование топологических чертежей отдельных элементов БИС и СБИС и их размещение на общем поле чертежа осуществляется при использовании интерактивного метода совместно с созданием (трассировкой) соединений между ними. При этом, как уже отмечалось ранее, в случае необходимости разработчиком в известных пределах модифицируются и сами элементы.

Такое совместное решение задач размещения, трассировки и модификации, осуществляемое широким использованием интеллекта и опыта разработчик, позволяет создавать при небольших объемах информации наиболее компактные топологические чертежи. Это особенно важно при разработке изделий массового потребления, таких, как микросхемы ОЗУ, микропроцессоры, микрокалькуляторы, синтезаторы речи и т. д.

Таким образом, основными достоинствами метода являются технологическая независимость и возможность наиболее полного использования особенностей технологического процесса производства ИС, позволяющего модифицировать конструкции элементов в процессе разработки топологических слоев.

Главный недостаток интерактивного метода — относительно низкая скорость проектирования (10-20 элементов в день), определяемая большим объемом подготавливаемой проектной информации. Вместе с тем внедрение ИГС позволило в 4-5 раз сократить цикл разработки топологии по сравнению с применением автоматизированных СБИС-ем изготовления фотошаблонов (АСИФ), в рамках которых осуществлялось простое кодирование вручную подготовленных топологических чертежей. Интерактивный метод

проектирования получил широкое распространение как за рубежом, так и в Беларуси.

Рассматриваемый метод широко применяется при проектировании топологических чертежей БИС и СБИС, особенно предназначенных для серийного выпуска на отечественных и зарубежных предприятиях. Номенклатура ИГС только за рубежом включает несколько десятков типов.

Развитие метода в основном определяется совершенствованием технических средств ИГС. Большие возможности используемых в современных ИГС широкоформатных графических дисплеев, а также расширение набора и увеличение скорости выполнения процедур проектирования за счет использования более мощных ЭВМ и интеллектуальных рабочих станций позволяют проектировать СБИС.

Как уже отмечалось, исходной информацией для начала проектирования топологических чертежей БИС и СБИС при использовании метода являются полученная на предыдущих этапах электрическая схема и рассчитанные конструкции активных и пассивных элементов. В процессе разработки информация о каждом топологическом слое хранится в ИГС.

Процесс разработки топологических чертежей при использовании интерактивного метода можно представить в виде следующей последовательности действий:

- 1) проектирование топологических чертежей;
- 2) контроль конструкторско-техно-логических ограничений;
- 3) в случае нарушения конструкторско-технологических ограничений возврат на шаг 1;
- 4) восстановление из топологического чертежа реализованной электрической схемы;
- 5) при обнаружении формальных ошибок реализации электрической схемы возврат на шаг 1;
- 6) сравнение восстановленной электрической схемы с исходной;
- 7) при обнаружении ошибок несоответствия возврат на шаг 1;
- 8) анализ работоспособности реализованной электрической схемы с помощью контрольного моделирования или схемотехнического расчета;
- 9) в случае сбоев в функционировании реализованной электрической схемы возврат на шаг 1;
- 10) переход к подготовке управляющей информации для генератора изображения шаблонов.

Анализ различных алгоритмов контроля конструкторско-технологических ограничений показывает, что они в основном сводятся к упорядочению математической модели БИС, позволяющему выделить из нее элементы изображения топологического слоя, элементы БИС и соединения между ними, и отличаются друг от друга лишь способом выполнения сортировки информации. Поэтому затраты машинного времени на выпол-

нение одного из видов такого контроля примерно пропорциональны величине  $(N / \log_2 N_i)$ , где  $N$  — число упорядочиваемых объектов (в зависимости от операции контроля  $N_i$  — число координат в описании одного или всей совокупности топологических чертежей БИС). Так как  $N_i = 10(i + 2)$ , где  $i$  — степень интеграции БИС, можно считать, что при соответствующей сложности проектируемого изделия полностью выполнить операции контроля конструкторско-технологических ограничений на существующих технических средствах практически невозможно. Частичная же проверка приводит к появлению большого числа ложных ошибок, дезориентирующих разработчика.

Для сокращения числа ошибок в состав операций интерактивного проектирования вводятся процедуры, позволяющие создавать библиотеку, в состав которой могут быть включены топологические чертежи как отдельных элементов БИС, так и целых фрагментов (частей) топологического чертежа. Однако при существующих средствах использования библиотеки введение в ее состав элемента равносильно отказу от возможности последующей модификации вводимого в каталог объекта. Поэтому при использовании интерактивного метода библиотека элементов, как правило, не создается, а библиотека фрагментов существует лишь в рамках проектирования конкретной БИС.

Символический метод проектирования топологических чертежей основан на замене сложного объекта проектирования на его упрощенный вариант. Таким образом символический метод, так же как и метод интерактивного проектирования, является способом автоматизированного проектирования, при котором наиболее ответственные этапы выполняет разработчик вручную, в ПЭВМ выполняет операции преобразования и контроля.

Вместе с тем за счет применения в символическом методе более наглядного изображения топологического чертежа и более широкого использования при его разработке библиотеки проектирования удается резко поднять производительность труда конструктора, существенно уменьшить число ошибок, а также упростить аппарат их обнаружения. Исходной информацией для начала проектирования топологического чертежа символическим методом является принципиальная электрическая схема.

Рассматриваемый метод является технологически не ориентированным. Однако, как будет показано ниже, применяемые при его использовании способы выбора библиотеки и алгоритмы генерации топологических чертежей вызывают ряд трудностей при разработке КМОП-, ТТЛШ-, ЭСЛ-, И<sup>2</sup>Л-микросхем. Метод получил наибольшее распространение при проектировании МОП ИС.

Существует несколько вариантов реализации символического метода, рассматривать которые целесообразно, основываясь на использовании при их создании способов перехода от проектируемого эскиза к топологическим чертежам.

Реализация метода на основе применения фиксированной сетки - один из первых, наиболее распространенных и отработанных вариантов символического проектирования. Так как при использовании этого подхода можно полностью отказаться от применения графических изображений, он получил название символьного метода проектирования. Его также называют сеточным проектированием, проектированием на основе коммутационной схемы и эскизно-символьным методом.

Примером использования этого подхода является применение упоминавшейся выше масштабной сетки постоянного большого шага непосредственно в процессе кодирования.

## 10. Модели и библиотеки для синтеза топологического чертежа БИС

*БИС на основе интегральной инжекционной логики. Интегральные МОП транзисторы с малыми топологическими размерами. Классификация библиотечных элементов. Способы построения моделей библиотечных элементов и их настройка. Модель библиотечного элемента на этапе синтеза его эскиза. Алгоритмы синтеза эскиза топологического чертежа и его синтез на основе построенного эскиза.*

Библиотечные элементы и виды их настройки.

Анализ характера разработки БИС и СБИС различной степени интеграции показывает, что при их создании в общем случае можно использовать унифицированные проектные решения трех типов сложности; образующие соответственно три уровня библиотеки проектирования. Уточним состав этих уровней, а также требования к подготовке библиотечных элементов и необходимые при проектировании современных СБИС варианты их настройки.

Первый уровень библиотеки образуют объекты, необходимые и достаточные для реализации в полупроводниковой пластине принципиальной электрической схемы. К ним в первую очередь следует отнести элементы СБИС, а также соединения между ними, межслойные переходы и т. д. Характеристики топологического чертежа и электрофизические параметры библиотечных элементов этого уровня уточняются на этапе отработки технологического процесса. Начало стандартизации библиотечных элементов было положено при переходе от проектирования ИС к проектированию СБИС и затем БИС.

Можно считать, что к моменту освоения разработки СБИС проектные решения уровня были в основном унифицированы. Главным достижением этого этапа стандартизации является унификация конструкции элементов СБИС. Так, можно считать общепринятой линейную конструкцию элемента СБИС, в соответствии с которой входящие в его структуру области выравниваются вдоль одной оси, расположенной в плоскости поверхности кристалла и проходящей через центры проекций областей на эту поверхность.

Необходимость введения такой стандартизации была вызвана в первую очередь сложностью учета и моделирования протекающих в элементах СБИС электрофизических процессов. Вместе с тем эти конструкции упрощают подвод соединений к электродам элементов СБИС, а также реализацию их сквозного прохода над элементом с подключением или без подключения к нему. Характерной чертой конструирования СБИС является также переход к использованию элементов, содержащих несколько

практически идентичных электродов, что также облегчает реализацию разводки соединений.

Результатом разработки библиотечного элемента первого уровня сложности являются правила построения его топологического чертежа, описание его возможных модификаций, схемотехническая модель. При проектировании библиотечных элементов рассматриваемого уровня, удается зафиксировать не конкретный совмещенный топологический чертеж, а лишь правила его синтеза. Это свидетельствует о том, что их следует рассматривать как настраиваемые (модифицируемые) объекты. При этом в качестве допустимых модификаций регистрируются настройки, либо не приводящие к существенным изменениям параметров, например увеличение расстояния между отдельными электродами, их возможная перестановка, либо сопровождающиеся контролируемым изменением таковых, например увеличение (уменьшение) площади эмиттера, ширины затвора, шины металлизации и т. д. В общем случае изменение значений параметров выбранной схемотехнической модели, которая может быть уникальной или стандартной, связано с модификацией конструкции библиотечного элемента.

Анализируя типичные приемы модификаций библиотечных элементов этого уровня, можно указать следующие причины их проведения: улучшение топологических характеристик (обеспечение удобства реализации соединения с другими элементами), необходимость изменения электрофизических характеристик или количества электродов в соответствии с выбранной принципиальной электрической схемой. К приемам модификаций можно отнести и такие изменения библиотечного элемента, которые изменяют характер его функционирования, например переход от конструкции транзистора к конструкции диода.

Применение библиотечных элементов первого уровня сложности, очевидно, ориентировано на максимальное использование особенностей реализации электрической схемы в полупроводниковой пластине. Однако при переходе к созданию СБИС из-за высокой степени интеграции стали активно использоваться библиотеки типовых решений как при разработке электрической схемы, так и при выполнении топологических чертежей, позволяющие представить их с гораздо меньшей степенью детализации. Такой прием дает возможность существенно сократить сроки проектирования и повысить наглядность.

Так, при разработке БИС и СБИС стали создаваться библиотеки стандартных схемотехнических решений. В качестве примеров таких решений можно указать принципиальные электрические схемы реализации элементарных логических вентилей, запоминающих элементов и их простейших комбинаций. Основным стимулом для явления библиотек такого типа явилось широкое распространение библиотечных методов проектирования, обеспечивающих гораздо большую степень автоматизации, чем

интерактивный и символический методы разработки. Будем считать, что элементы указанных библиотек являются унифицированными проектными решениями второго уровня сложности. Как было отмечено выше, они представляют собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом элементов первого уровня сложности. Эта совокупность различается как в электрической схеме, так и в топологическом чертеже библиотечных элементов второго уровня. Поэтому целесообразным является установление взаимнооднозначного соответствия между объектами электрической схемы и топологического чертежа этого вида элементов.

Примеры библиотек символьных эскизов и соответствующих топологических чертежей в различных СБИСтемах проектирования приведены на рисунке 10.1.

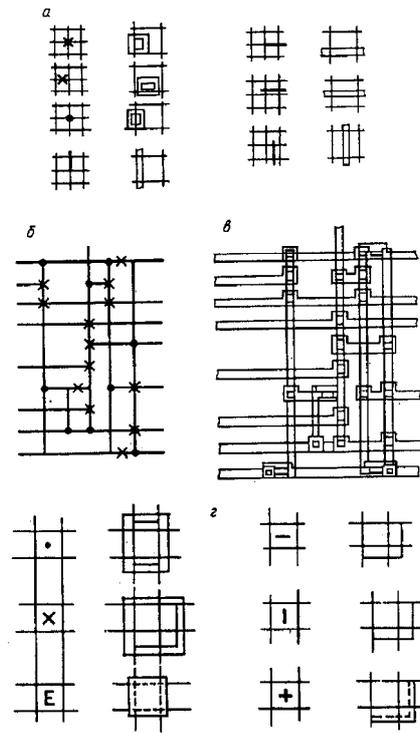


Рисунок 10.1 – Примеры библиотек символьных эскизов и соответствующих топологических чертежей в различных СБИСтемах проектирования

Соответственно схемотехнические характеристики элемента второго уровня библиотеки проектирования определяются параметрами входящих в него элементов БИС и СБИС, схемой их соединения и параметрами соединений. Библиотечному элементу второго уровня ставится в соответствие логическая модель, используемая на этапе моделирования функциональной электрической схемы БИС и СБИС. Характеристики такой модели, очевидно, также могут быть выражены через характеристики входящих в состав элемента второго уровня элементов первого уровня сложности.

К недостаткам рассматриваемого этапа унификации проектных решений следует отнести фиксированный характер созданных библиотечных элементов. Появление и применение таких элементов явилось определенным отступлением от способов микроэлектронной реализации электрической схемы, заменой их методами создания РЭС. При этом их использование влечет за собой в первую очередь избыточность состава библиотеки. Так, в ней должно находиться несколько элементов, выполняющих одну и ту же логическую операцию, но имеющих разное число входов и обладающих разной нагрузочной способностью. Однако даже в этом случае удастся удовлетворить лишь часть требований разработчика. В силу этого для БИС и СБИС, созданных с использованием такого рода библиотечных элементов, отмечено то, что схемотехнические и топологические решения не всегда являются оптимальными.

Очевидно, что использование идей параметрического задания элемента позволило бы ликвидировать как первый, так и второй из отмеченных недостатков. Благодаря возможности настройки элемента по числу входов и нагрузочной способности можно хранить в библиотеке вместо группы элементов один параметризуемый элемент, обеспечив плавное изменение указанных характеристик в некотором выбранном диапазоне. При более детальном анализе можно показать, что по отношению к элементам анализируемого уровня сложности могут быть приняты к рассмотрению все типы указанных выше модификаций для элементов первого уровня. С учетом достаточно высокой трудоемкости подготовки рассматриваемых элементов для них становится актуальной и задача автоматической перенастройки топологического чертежа на новые проектные нормы. Отсутствие средств выполнения модификации такого рода в существующих САПР приводит к тому, что применение элементов второго уровня сложности препятствует использованию последних достижений технологии изготовления БИС и СБИС при их проектировании.

Унифицированные решения третьего уровня сложности стали использоваться только при переходе к проектированию БИС и СБИС. Они представляют собой стандартные функциональные блоки в микроэлектронном исполнении, выполняющие передачу, хранение, преобразование и обработку цифровых данных (регистры, счетчики, арифметико-логические устройства, дешифраторы, мультиплексоры, ПЛИС, ПЗУ, ОЗУ и т. д.). Электрическая схема

таких блоков представляет собой схему соединений элементов второго и первого уровней сложности. На совмещенном топологическом чертеже таких элементов также можно указать топологические чертежи элементов меньшей сложности и соединений между ними. Характеристики этих составных частей, схема их соединения являются источником для построения функциональной модели, используемой при выполнении регистрового моделирования разрабатываемой БИС и СБИС.

С переходом к использованию унифицированных проектных решений третьего уровня сложности из-за невозможности хранить все варианты их реализации вновь возник вопрос о разработке методов параметризации библиотечных элементов. Достаточно сказать, что при подготовке элементов этого уровня сложности становится очевидной необходимость разработки средств их автоматической модификации в процессе проектирования БИС и СБИС исходя из требуемых разрядности и перечня операций обработки информации, выбранных технологических норм, окружения на топологическом чертеже. Таким образом, отсутствие таких средств препятствует проведению рассматриваемого этапа и дальнейших этапов унификации проектных решений, являющихся неперенным условием совершенствования САПР и поддержания трудоемкости разработки на соответствующем уровне.

Подготовка и использование сложных библиотечных элементов в первую очередь создают предпосылки для более широкого применения методологии нисходящего проектирования. Вместе с тем введение в состав САПР средств их модификации расширяет по сравнению с существующими подходами и возможности восходящего метода разработки, позволяя добиваться максимальной оптимизации проекта. Это особенно важно при создании полностью заказных СБИС. Таким образом, переход к использованию параметризуемых элементов следует считать необходимым условием совершенствования средств их автоматизации.

Сформулируем общие требования к библиотеке настраиваемых элементов СБИС на основе обеспечения СБИС темного подхода к проектированию особо сложных СБИС, проведенного выше анализа и рассмотрения этапов проектирования и методов их автоматизации, выполненных в предыдущих главах.

Библиотека проектирования должна иметь иерархическую структуру. В общем случае в ней могут содержаться элементы  $N$  уровней сложности. При этом библиотечный элемент  $n$ -го уровня сложности ( $n = 2, N$ ) должен быть представлен в виде некоторой схемы соединения элементов  $(n - i)$  - уровней.

Под библиотечным элементом должна пониматься совокупность взаимосвязанных описаний всех аспектов его функционирования и реализации, необходимых и достаточных для выполнения анализа электрической схемы и проектирования топологического чертежа с любой допустимой в используемой САПР степенью детализации. Исходя из этого,

можно предположить следующий необходимый состав описания библиотечного элемента: алгоритмическая модель, определяющая его функционирование, электрическая схема, топологическая информация, условное обозначение на электрической схеме, условное (упрощенное) изображение на топологическом чертеже. Та или иная часть описания должна быть по возможности единообразной для библиотечного элемента любого уровня сложности.

Должна допускаться возможность модификации библиотечного элемента любого уровня сложности. Можно указать типы его настроек: настройка на новые проектные нормы, на требование интерфейса подключения в электрической схеме, на необходимый набор выполняемых операций, на параметры переключения, на требования интерфейса окружения в топологическом чертеже. При этом в ходе настройки выполняется соответствующая автоматическая корректировка всех составных частей описания библиотечного элемента.

Под настройкой на новые проектные нормы понимают автоматическое перестроение топологического чертежа библиотечного элемента, при котором набор и схема соединения его составных частей не изменяются. Настройка такого рода не вызывает изменений в электрической схеме и функциональной модели, но может привести к изменению компоновки топологического чертежа и характеристик переключения библиотечного элемента. При этом изменение последних является следствием изменения характеристик переключения входящих в его состав элементов. Как частный случай настройки на новые проектные нормы можно рассматривать линейное масштабирование топологического чертежа.

Настройка на интерфейс связности в электрической схеме предполагает изменение по желанию разработчика разрядности того или иного входа (выхода) и (или) их состава. Очевидно, что целью такой настройки является ликвидация избыточности в электрической схеме и топологическом чертеже проектируемой БИС и СБИС. Поэтому ее выполнение сопровождается устранением (добавлением) из электрической схемы библиотечного элемента некоторого набора элементов и соединений. Соответствующие изменения при этом должны быть проведены и в топологическом чертеже. При этом может быть скорректирована и компоновка топологического чертежа. Изменения электрической схемы и топологического чертежа должны сопровождаться также корректировкой функциональной модели библиотечного элемента и значений параметров его переключения. В результате настройки изменяются также его условное изображение и обозначение.

Настройка на требуемые характеристики переключения подразумевает такие изменения библиотечного элемента, при которых с учетом параметров его нагрузки (число подключенных к выходу элементов, емкость и сопротивление соединения) обеспечивается требуемое время распространения электрического возмущения от его выхода ко входам элементов-

последователей. При проектировании полностью заказных СБИС такая настройка библиотечного элемента может быть достигнута только за счет изменения параметров и конструкции тех или иных входящих в его состав элементов более низкого уровня сложности без изменения схемы их соединения.

По характеру выполнения такая настройка может рассматриваться как частный случай настройки на новые проектные нормы. При фиксированных размерах элементов, входящих в состав модифицируемого библиотечного элемента, выполнение настройки сопровождается изменением его электрической схемы, поэтому по характеру исполнения она может рассматриваться как частный случай настройки на интерфейс связности. Такая настройка имеет место, например, при проектировании полузаказных БИС и СБИС.

Частным случаем настройки на интерфейс связности можно рассматривать и настройку на требуемый перечень операций обработки, так как ее выполнение также предполагает изменение электрической схемы библиотечного элемента. Другой характер имеют лишь производимые при этом изменения в функциональной модели.

Напротив, настройка на интерфейс окружения подразумевает изменение только топологических свойств библиотечного элемента (изменение положения и числа мест подключения соединений). Так как в результате могут измениться лишь компоновка его топологического чертежа и параметры отдельных составных частей, такая модификация может рассматриваться как частный случай настройки на новые проектные нормы, в том числе субмикронные, на которые НПО «Интеграл» осуществляет переход в 2007 г.