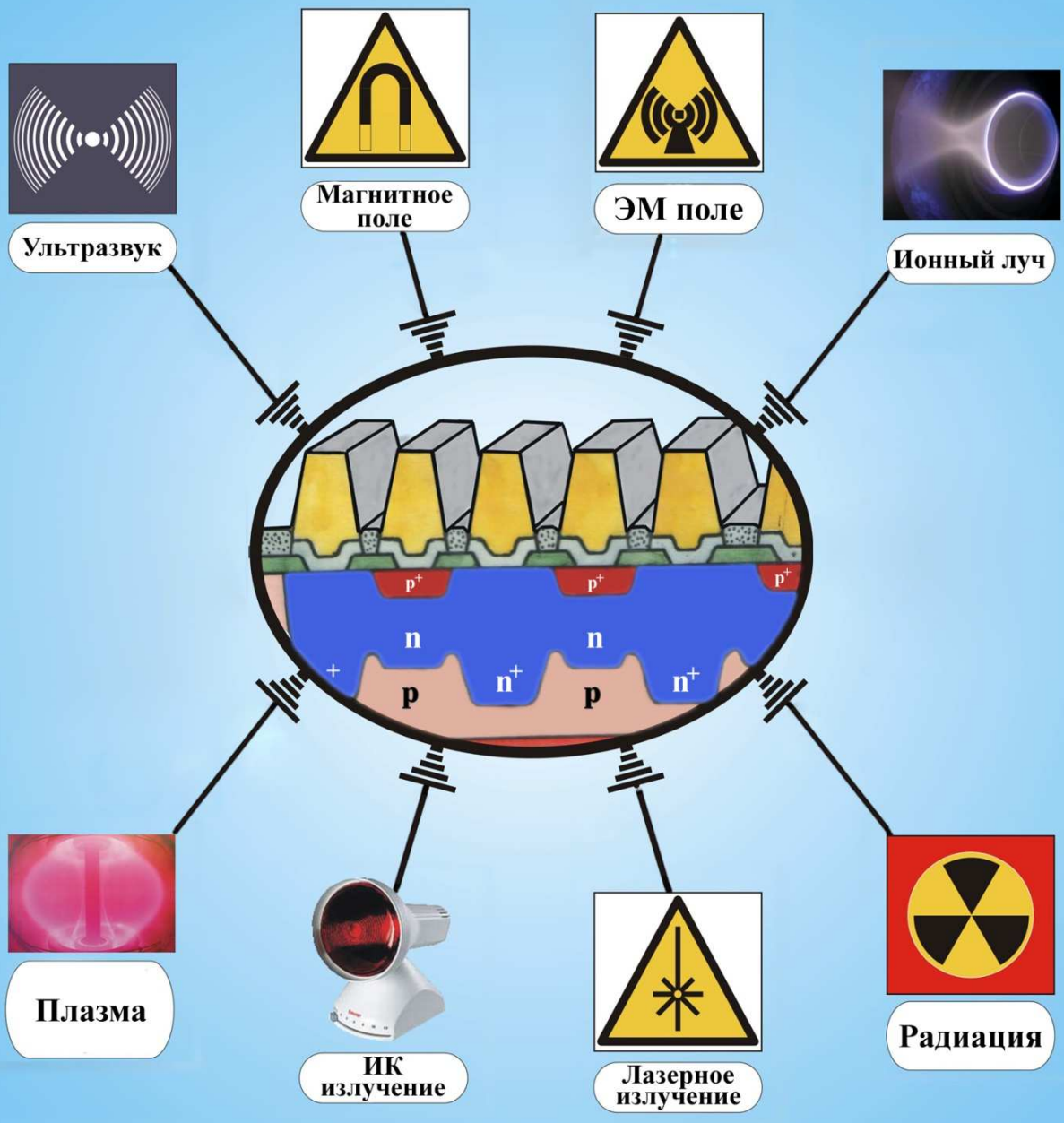
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ



ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Монография

Под редакцией академика НАН Беларуси А. П. Достанко
и доктора технических наук А. М. Русецкого

Минск
«Бестпринт»
2011

УДК 621.762.27
ББК 34.55

А.П. Достанко, А.М. Русецкий, С.В. Бордусов, В.Л. Ланин, Л.П. Ануфриев, С.В. Карпович, В.В. Жарский, В.И. Плебанович, А.Л. Адамович, Ю.А. Грозберг, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, Я.А. Соловьев, И.В. Дайняк Н.С. Ковальчук, И.Б. Петухов, Е.В. Телеш, С.И. Мадвейко

Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и наноэлектроники : монография / А. П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко и д-ра техн. наук А. М. Русецкого. – Минск : Бестпринт, 2011. – 210 с. : ил. – ISBN 985-.

Рассмотрены и обобщены результаты исследований и разработок в области теории, технологии и оборудования для электрофизических методов обработки материалов изделий микро- и наноэлектроники.

Предназначена для инженерно-технических работников предприятий электронной и других отраслей промышленности, специалистов научно-исследовательских институтов, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов технических вузов.

Рекомендовано к изданию Советом БГУИР, протокол № 2 от 20.10. 2011 г.

Рецензенты:
академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор *В. А. Лабунов*,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор *Ф.И. Пантелеенко*

ISBN 985-

© Оформление. УП «Бестпринт», 2011

Electrophicical processes and systems in micro- and nanoelectronics technology

Edited by Academician of National Academy of Science of Belarus
A.P. Dostanko and Dr. Tech. Sci. A.M. Rusetski

Minsk 2011

Electrophysical processes and the equipment in technology micro-and nanoelectronics: monograph / A.P. Dostanko [etc.]; under the editorship of acad. NAS Belarus A.P. Dostanko and Dr. Sci. Tech. A.M. Rusetski. - Minsk: Bestprint, 2011. - 210 p.: – ISBN 985.

Results of researches and workings out in the field of the theory, technology and the equipment for electrophysical methods of processing of materials of products micro-and nanoelectronics are considered and generalized.

It is intended for technical officers of the enterprises electronic and other industries, experts of scientific research institutes, post-graduate students, graduates and students of older years of technical colleges.

A.P. Dostanko, A.M. Rusetski, S. V. Bordusov, V.L. Lanin, L.P. Anufriev,
S.V. Karpovich, V.V. Jarski, V.I. Plebanovich, A.L. Adamovich, Y. A. Grosberg,
D.A. Golosov, S.M. Zavadski, J. A. Solovev, I.V. Dajnijk, N.S. Kovalchuk, I.B. Petuchov,
E.V. Telech, S.I. Madveika

It is recommended to the edition Council BGUIR, the report №2 at 28.10. 2011

Reviewers:
Academician NAS of Belarus, Dr. Sci. Tech., Professor V.A. Labunov,
Corresponding member NAS of Belarus, Dr. Sci. Tech., Professor F.I. Panteleenko

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1
ПРЕЦИЗИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ МАЛОДЕФЕКТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ СУБМИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ 10

1.1. Локализация имплантируемых примесей бора и углерода в кремнии 11
1.2. Пошаговое ионное легирование кремния 18
1.3. Пошаговая имплантация бора в производстве микросхем на биполярных транзисторах 23
1.4. Электрофизические параметры транзисторов и диодов, изготовленных с использованием метода ионного легирования 25
Список литературы к главе 1 33

ГЛАВА 2
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ПЛАЗМОЙ СВЧ РАЗРЯДА 37

2.1. Процессы удаления материала с поверхности твердых тел 37
2.1.1. Активирование поверхности и плазменная очистка 37
2.1.2. Плазменное травление в вакууме 40
2.2. Получение микроразмерных слоев на поверхности твердого тела 49
2.3. Модификация структуры поверхностных слоев твердых тел 54
2.4. Применение СВЧ энергии в технологии микроэлектронных изделий 57
2.5. Тенденции развития процессов СВЧ плазменной обработки изделий электронной техники 61
Список литературы к главе 2 65

ГЛАВА 3
СВЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ 70

3.1. Возбуждение и распространение СВЧ-поля в электродинамической системе «камера-материал» 71
3.2. Моделирование распределения СВЧ-поля в ближней зоне облучателей 73
3.2.1. Электродинамическая модель 73

3.2.2. Распределение СВЧ-поля в ближней зоне
резонансного облучателя 73
3.2.3. Распределение СВЧ-поля в ближней зоне антенной решетки 76
3.3. Конструкции облучателей СВЧ установок 79
3.4. Экспериментальные исследования поля излучения
резонансного облучателя 82
Список литературы к главе 3 84

ГЛАВА 4
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ 85

4.1. Расчет скорости нанесения микроразмерных слоев
при магнетронном распылении 85
4.2. Расчет распределения толщины микроразмерных слоев
на линейно перемещаемые подложки 90
4.3. Расчет распределения толщины микроразмерных слоев
на барабанные подложкодержатели 93
4.4. Расчет элементного состава микроразмерных слоев
при магнетронном распылении мозаичных мишеней 101
Список литературы к главе 4 109

ГЛАВА 5
ФОРМИРОВАНИЕ МЕМБРАН МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
МИКРОННОЙ И СУБМИКРОННОЙ ТОЛЩИНЫ 110

5.1. Микромеханические системы 110
5.2. Технология формирования элементов конструкций
микромеханических систем 111
5.2.1. Осаждение слоев поликристаллического кремния 111
5.2.2. Осаждение слоев нитрида кремния 112
5.2.3. Осаждение слоев диоксида кремния 117
5.2.4. Нанесение слоев платины и никеля 118
5.2.5. Глубокое травление кремния 123
5.2.6. Формирование КНИ-структур 128

5.3. Остаточные напряжения в многослойных системах 133
Список литературы к главе 5 137

ГЛАВА 6
МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ШАРИКА НА ЗОЛОТОЙ И МЕДНОЙ ПРОВОЛОКЕ ПРИ ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКЕ МЕТОДОМ «ШАРИК-КЛИН» 140

6.1. Современное состояние и проблемы технологии термозвукового присоединения золотой и медной проволоки методом «шарик-клин» в изделиях микроэлектроники 140
6.2. Методы формирования шарика в защитной атмосфере 143
6.3. Устройства формирования шарика электроискровым способом 145
6.4. Методы контроля процесса образования шарика 154
6.5. Оборудование термозвукового присоединения проволочных выводов методом «шарик-клин» в изделиях микроэлектроники 155
Список литературы к главе 6 157

ГЛАВА 7
ПРЕЦИЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ПРИВОДА ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ 159

7.1. Исполнительный координатный привод прямого действия для оборудования микро- и наноэлектроники 159
7.2. Установка голографического формирования структур на полупроводниковой пластине 165
7.3. Установка алмазного точения и полирования для прецизионных асферических линз 170
7.4. Координатная пятиосевая установка финишной полировки 175
7.5. Генератор изображения ЭМ-5289 179
Список литературы к главе 7 184

ГЛАВА 8
ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРЯМЫМ ИОННЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТИКИ 185

8.1. Особенности нанесения тонкопленочных покрытий прямым осаждением из ионных потоков 185
8.2. Устройства для генерации ионных потоков 187
8.3. Формирование покрытий из диоксида кремния 189
8.3.1. Формирование покрытий из диоксида кремния с использованием торцевого холловского ускорителя 189
8.3.2. Использование вторичного ионного пучка в ускорителе с анодным слоем для нанесения пленок диоксида кремния 193
8.3.3. Синтез пленок диоксида кремния, легированных фтором 195
8.4. Формирование покрытий из нитрида кремния 197
8.5. Формирование покрытий из нитрида углерода 201
8.6. Формирование покрытий из алмазоподобного углерода 204
8.7. Применение разработанных процессов для синтеза ориентирующих покрытий в ЖК-дисплеях 209
Список литературы к главе 8 213
Заключение 214

ВВЕДЕНИЕ

Электрофизические процессы и оборудование широко применяются в технологии микро– и наноэлектроники. К ним, в частности, относятся плазменные, лазерные, ионно-лучевые и ультразвуковые процессы. Развитие этих технологий является одним из приоритетных направлений современного научно-технического прогресса в Республике Беларусь. Основные их достоинства определяются высокой эффективностью воздействия концентрированных потоков энергии на материалы, что позволяет целенаправленно формировать твердотельные структуры в микро– и наноэлектронике, интенсифицировать процессы обработки материалов и существенно улучшить качественные показатели изделий.

Приведенные в монографии научные и практические результаты получены при выполнении Государственных научно–исследовательских программ: ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии»: № 06-3015 «Изучение процессов генерации и ускорения сильноточных, широких пучков ионов низких энергий и разработка физико-технических основ построения технологических газоразрядных источников» № Гос. регистрации 20061378, № 06-3035 «Исследование физико-химических свойств и особенностей формирования низкотемпературной неравновесной плазмы СВЧ разряда в плазмотронах резонаторного типа с размерами разрядной камеры, сопоставимыми с длиной волны возбуждения плазмы» № Гос. регистрации 20066837, ГППИ «"Материалы в технике»: № 06-3013 «Разработка технологии управления структурой и свойствами микро- и нанослоев нитридов и оксидов реактивными ионно-плазменными методами»№ Гос. регистрации 2006807, № 06-3014 Разработка макетного модуля и технологии получения слоев диэлектрических материалов в условиях импульсного разряда № Гос. регистрации 2006808 в 2006-2010 гг., а также Комплексного задания Министерства образования Республики Беларусь «Модульные технологические системы и процессы формирования функциональных твердотельных микро- и наноструктур».

Участие авторов выразилось следующим образом: глава 1 – Плебанович В.И., глава 2 – Бордусов С.В., Достанко А.П., Мадвейко С.И., глава 3 – А.Л. Адамович, Ю.А. Грозберг, глава 4 – Д.А. Голосов, С.М. Завадский, глава 5 – Л.П. Ануфриев, Я.А. Соловьев, Н.С. Ковальчук, глава 6 – В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, глава 7 – С.В. Карпович, В.В. Жарский, А.М. Русецкий, И.В. Дайняк, глава 8 – А.П. Достанко, Е.В. Телеш.

ГЛАВА 1
ПРЕЦИЗИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ МАЛОДЕФЕКТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ СУБМИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ

Повышение процента выхода годных интегральных микросхем является важнейшей технико-экономической задачей, для чего необходимо различными методами снижать дефектность. Ионное легирование по своей физической сути является источником дефектов, т.к. основано на разрушении связей в кристаллической структуре полупроводника.

В слоях кремния во время ионной имплантации накапливаются в значительных концентрациях устойчивые при комнатных температурах радиационные дефекты. В процессе последующей термообработки, необходимой для отжига дефектов и электрической активации внедренной примеси, точечные дефекты перестраиваются в остаточные протяженные нарушения типа стержнеобразных дефектов {113}, дефектов упаковки, ограниченных дислокационными петлями. Эти нарушения имеют междоузельную природу. Остаточные нарушения вносят глубокие уровни в запрещенную зону кремния и в значительной степени влияют на генерационно-рекомбинационные процессы в ионно-легированных структурах кремния. Тем самым они существенно ухудшают параметры полупроводниковых приборов и интегральных схем и снижают процент выхода годных изделий микроэлектроники [1].

Образование остаточных нарушений в кремнии носит пороговый характер. Это значит, что для образования при термообработке остаточных нарушений необходимо накопление в процессе имплантации критической концентрации точечных дефектов [2]. В случае ионов B^+ пороговая доза ионов составляет $1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ и, например, для дозы ионов $1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ необходимо 10 шагов имплантации и промежуточных отжигов. Это не может быть приемлемым для практического использования. Интересно отметить, что для существенно более тяжелого иона P^+ пороговая доза также составляет $1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$. Аномалии в образовании остаточных нарушений при термообработке кремния, имплантированного ионами B^+ и P^+, заключающиеся в одинаковых пороговых дозах образования остаточных нарушений при существенно (в 10 раз) различающихся эффективностях введения стабильных радиационных дефектов, в работе [3] объясняются влиянием упругих напряжений, создаваемых областями скоплений дефектов, на объединение точечных дефектов в

протяженные нарушения.

Существует и другая принципиальная возможность подавления образования остаточных нарушений в имплантированных слоях кремния, заключающаяся в дополнительной имплантации в слои углерода [2, 4]. Показано, что обычная имплантация углерода не приводит к положительному эффекту [5]. Для того, чтобы атомы С являлись ловушками для избыточных междоузельных атомов Si, необходимо атомы углерода перевести в узлы решетки кремния. Для этого предлагается слои с внедренным углеродом дополнительно имплантировать более тяжелыми ионами (например, Ar) для их аморфизации. Далее необходимо провести быструю рекристаллизацию слоя, в ходе которой атомы углерода располагаются в узлах решетки. После этого в слои кремния имплантируется электрически активная примесь (B или P). Такое количество дополнительных операций делает и этот метод не технологичным для практического использования.

Разработаны методы создания совершенных ионно-легированных слоев кремния с приемлемым для практики количеством операций ионного легирования. В предложенном методе важным является локализация в решетке внедряемых примесей.

1.1. Локализация имплантируемых примесей бора и углерода в кремнии

Локализация в решетке имплантируемых примесей определяется ее взаимодействием с точечными радиационными дефектами. Примесно-дефектное взаимодействие является одной из важнейших проблем физики реального кристалла. По данным разных авторов количество бора в узлах решетки кремния сразу после имплантации при комнатной температуре составляет от 20 до 70 %, имеются сообщения о практически 100 %-ной локализации бора в узлах [6–8]. Что касается имплантации фосфора, то его доля в узлах в целом несколько больше, чем бора, но результаты также сильно различаются [8–10]. Причина расхождений остается не ясной. Некоторые авторы связывают это с неточностями эксперимента либо с некорректной обработкой полученных результатов [6]. Нам представляется, что расхождения определяются условиями имплантации. В работах [11–13] исследована роль плотности тока имплантации на локализацию внедренной примеси бора и углерода в кремнии рентгенодифракционным и электрофизическим методами.

Исследовалась имплантация бора и углерода в кремний n-типа с

исходным удельным сопротивлением ρ_o = 0,5 Ом·см, а также имплантация бора в кремний, сильно легированный при выращивании бором (ρ_o = 0,005 Ом·см); для сравнения изучалась имплантация фосфора в кремний *p*-типа с ρ_o = 10 Ом·см. Имплантацию проводили сканирующим пучком ионов с энергией 100 кэВ при эффективных плотностях тока ионов $J_{эф}$ от 0,04 до 2 мкА·см$^{-2}$.

Установлено, что имплантация приводит к увеличению периода решетки (ПР) кремния. Его изменение определяется двумя факторами: радиационными дефектами, увеличивающими ПР, и атомами примеси (бора и углерода), сжимающими решетку, если они располагаются в узлах. Уменьшение ПР обусловлено тем, что ковалентные радиусы атомов B (0,08 нм) и C (0,07 нм) меньше ковалентного радиуса атома Si (0,1175 нм).

На рис. 1.1 (кривая *1*) показано изменение периода решетки Δa в кремнии в результате имплантации ионов B^+ дозой 1,8·10^{15} см$^{-2}$ при различной плотности тока ионного пучка: $J_{эф}$ варьировалась от 0,04 до 2 мкА·см$^{-2}$. Очевидно что, с увеличением эффективной плотности тока ионов от 0,04 до 1 мкА·см$^{-2}$ происходит существенное уменьшение Δa, но затем кривая $\Delta a(J_{эф})$ выходит на насыщение. Отметим, что при имплантации в указанных пределах плотности тока ионов температура образцов заметно не повышалась. Изменение ПР кремния в результате имплантации ионов C^+ дозой 4·10^{14} см$^{-2}$ в зависимости от плотности тока ионного пучка показано на рис. 1.1 кривой *2*. Эта зависимость аналогична зависимости для ионов B^+.

Уменьшение Δa может быть обусловлено тем, что с ростом плотности тока ионов большее число атомов бора (кривая *1*) и углерода (кривая *2*) располагается в узлах решетки. Локализация примесей определяется захватом их на вакансии и вытеснением из узлов междоузельными атомами кремния, возникающими при имплантации (эффект Воткинса). Вакансии в кремнии при имплантации являются подвижными. Поэтому с ростом плотности тока ионов возрастает мгновенная концентрация вакансий, что должно способствовать переходу атомов бора и углерода в узлы решетки. Если выход зависимости $\Delta a(J_{эф})$ на насыщение в случае ионов B^+ (кривая *1*) обусловлен тем, что при $J_{эф}$>1,0 мкА·см$^{-2}$ весь внедренный бор располагается в узлах решетки, то из различия в ковалентных радиусах B и Si и наблюдаемого изменения в Δa можно определить количество бора в узлах решетки при всех значениях плотности тока ионов.

Например, при $J_{эф}$=0,04 мкА·см$^{-2}$ количество бора в узлах решетки составляет 10 %. В случае имплантации углерода наблюдаемое различие в Δa

для максимального и минимального значений плотности тока ионов требует, чтобы разница в концентрациях углерода в узлах решетки составляла $2 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$. Но при дозе $4 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ и энергии ионов 100 кэВ средняя концентрация углерода по профилю внедрения составляет $2 \cdot 10^{19}$ см$^{-2}$. Из этого следует, что при плотности тока ионов C^+, равной 1,0 мкА·см$^{-2}$, весь внедренный углерод локализован в узлах решетки, при 0,05 мкА·см$^{-2}$ – в междоузлиях.

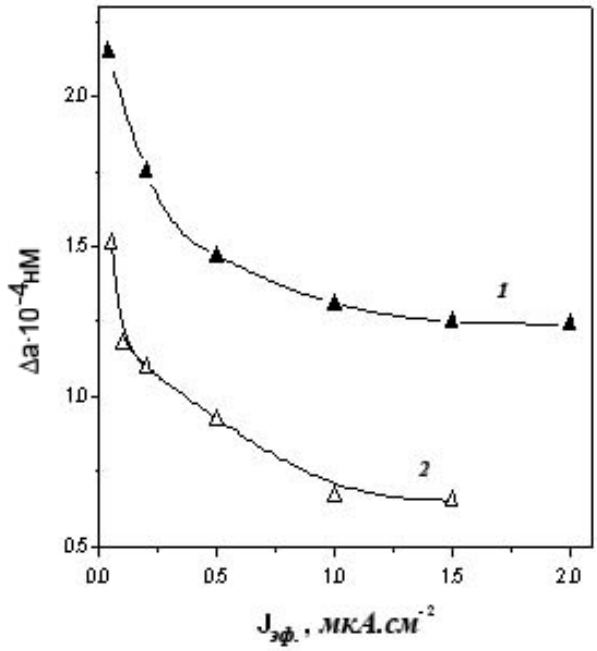


Рис. 1.1. Изменение периода решетки Δa в имплантированном кремнии в зависимости от плотности тока ионов $J_{эф}$: 1 – B^+, $\Phi = 1{,}8 \cdot 10^{15}$см$^{-2}$; *2* – C^+, $\Phi = 4 \cdot 10^{14}$см$^{-2}$

Доля атомов углерода, локализованного в узлах решетки, в зависимости от плотности тока показана на рис. 1.2. На рис. 1.3 представлены кривые восстановления ПР в процессе изохронного отжига для кремния, имплантированного ионами B^+ с плотностью тока ионов $J_{эф}$=0,04 мкА·см$^{-2}$ (кривая *1*) и 2 мкА·см$^{-2}$ (кривая *2*). Кривой *3* показано восстановление ПР в сильно легированном бором кремнии (ρ_o=0,005 Ом·см) и имплантированном ионами B^+ при плотности тока 0,2 мкА·см$^{-2}$. Восстановление ПР (кривая *1*) протекает на трех стадиях: *1* – 100-280, *2* – 380-600 и *3* – 700-900 °С. Первая стадия связывается с отжигом главным образом дивакансий, на второй стадии отжигаются преимущественно многовакансионные комплексы [14]. Аналогичные стадии наблюдаются и в кремнии, имплантированном ионами Si [15]. Третья стадия отжига при 700- 900 °С характерна [16] только для кремния, имплантированного ионами бора; на этой стадии отжигаются комплексы атома

бора с дивакансией.

В кремнии, имплантированном ионами B^+ при плотности тока ионов $J_{эф}$=2 мкА·см$^{-2}$, на кривые восстановления ПР накладываются стадии «обратного» отжига в области 120 и 480 °С (кривая *2*). Аналогичные стадии «обратного» отжига наблюдаются в сильно легированном бором кремнии, облученном ионами B^+ с плотностью тока 0,2 мкА·см$^{-2}$ (кривая *3*).

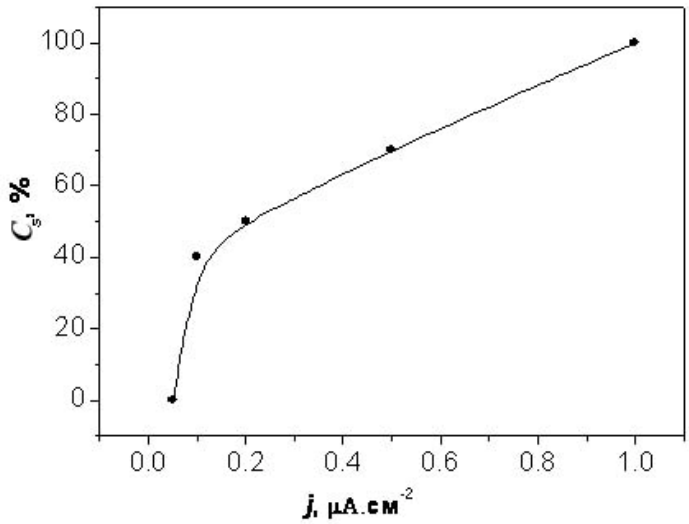


Рис. 1.2. Доля атомов углерода в узлах решетки кремния в зависимости от плотности тока имплантации

Характерные стадии «обратного» отжига связываются с вытеснением бора из узлов междоузельными атомами Si [15]. Свободные атомы кремния образуются при развале междоузельных комплексов. При 120 °С отжигаются Si-P6-центры [17], при 480 °С – Si-B3 [18]. Существование стадий «обратного» отжига свидетельствует об увеличении количества атомов бора в узлах решетки с ростом плотности тока имплантации, что предполагалось на основе зависимостей $\Delta a(J_{эф})$, представленных на рис. 1.1.

Характерным для процесса ионного легирования, особенно легких ионов, является высокий уровень неупругих потерь. При имплантации в кремний ионов B^+ и C^+ с энергией 100 кэВ неупругие потери составляют около 80 %, и с увеличением плотности тока ионов уровень ионизации в кристалле возрастает. Можно предположить, что при высоком уровне ионизации процесс вытеснения примесей замещения подавляется. Эти соображения подтверждаются результатами электрофизических исследований имплантированного кремния. На рис. 1.4 приведены кривые электрической активации имплантированного бора в кремнии, т. е. зависимость слоевой концентрации носителей заряда от температуры изохронного отжига (15 минут) $N_s(T)$ – кривая *1*.

Кривая *2* соответствует зависимости $N_s(T)$, полученной при изохронном отжиге с одновременным облучением имплантированного слоя электронами с энергией 10 кэВ и плотностью тока 5 мкА·см$^{-2}$. В случае «подсветки» электронами зависимость $N_s(T)$ не содержит стадии «обратного» отжига, характерной для кривой электрической активации бора в кремнии (кривая 1). Стадия «обратного» отжига в кривой электрической активации имплантированного бора в кремнии, как известно [19], обусловлена вытеснением бора из узлов междоузельными атомами Si, образующимися при отжиге междоузельных комплексов Si-B3. Повышая уровень ионизации в кристалле путем облучения электронами, мы подавляем процесс замещения по Воткинсу.

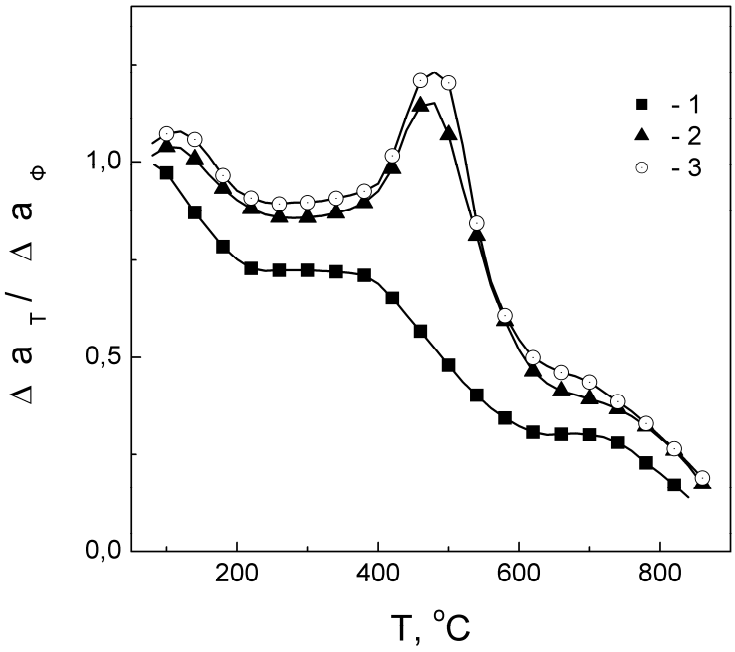


Рис. 1.3. Восстановление периода решетки в кремнии, имплантированном ионами B^+ $\Delta a_Ф$ – изменение ПР в результате имплантации дозой $Ф$, Δa_T – изменение ПР в результате имплантации и отжига: *1* – Si:P, ρ_0 = 0,5 Ом·см; $J_{эф}$ = 0,04 мкА·см$^{-2}$; *2* – Si:P, ρ_0 = 0,5 Ом·см; $J_{эф}$ = 2 мкА·см$^{-2}$; *3* – Si:B, ρ_0 = 0,005 Ом·см; $J_{эф}$ = 0,2 мкА·см$^{-2}$

Стадия «обратного» отжига на кривой $N_s(T)$ наблюдалась в работе [20] и для имплантированного фосфора. Поскольку фосфор вытесняется значительно меньше, чем бор [20], то для ее наблюдения необходима большая доза фосфора, выше $1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$. При таких дозах фосфора имплантированный слой становится аморфным. Поэтому для наблюдения вытеснения фосфора из узлов решетки междоузельными атомами Si (кривая *3*) образцы кремния после имплантации

фосфора дозой $1{,}5\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ отжигались для рекристаллизации аморфного слоя и затем облучались ионами Si^+ дозой $1\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ для введения радиационных дефектов. Если изохронный отжиг проводился при одновременном облучении имплантированного слоя электронами с энергией 10 кэВ, то стадия «обратного» отжига не наблюдалась (кривая *4*).

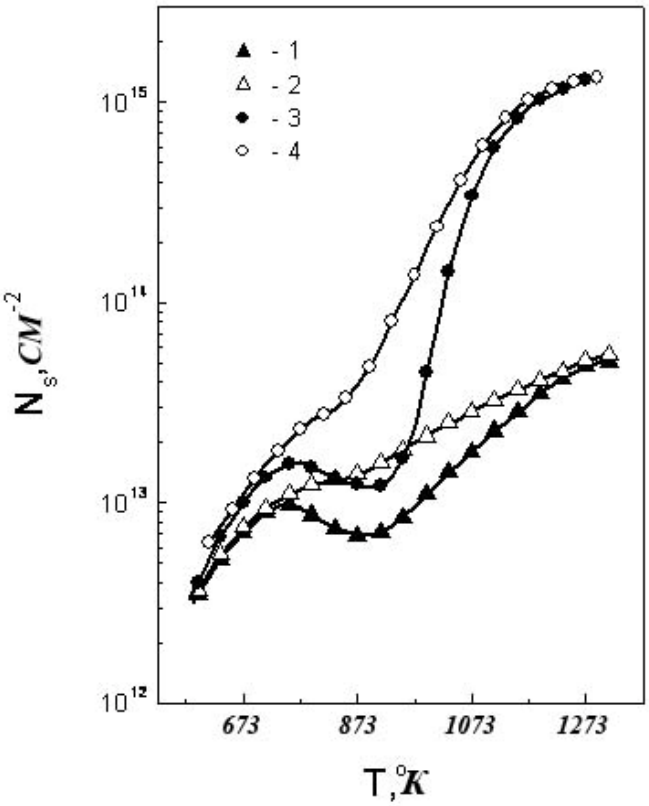


Рис. 1.4. Электрическая активация имплантированных атомов бора (*1*, *2*) и фосфора (*3*, *4*) *2*, *4* – отжиг с подсветкой электронами

Можно предположить, что подавление вытеснения примесей из узлов в междоузлия обусловлено зарядовым состоянием компонентов. Если при высоком уровне ионизации междоузельный атом Si захватывает неравновесный носитель заряда, например, электрон и заряжается отрицательно, то он не сможет вытеснить в силу электростатического барьера атом бора, который в узле является отрицательно заряженным ионом. Но такая схема, видимо, не работает, поскольку с увеличением уровня ионизации подавляется вытеснение и положительного иона фосфора (см. рис. 1.4, кривая *4*).

В работе [20] развито представление, согласно которому из узлов решетки вытесняются междоузельными атомами Si все примеси замещения, у которых ковалентный радиус не совпадает с ковалентным радиусом атома решетки. Междоузельные атомы Si движутся к источнику искажения (атом замещения) в поле упругих деформаций, создаваемых этим атомом. На

атомном уровне это представляется следующим образом. Атомы решетки, смещенные из равновесных положений относительно атома замещения, поляризуются, т. е. на каждом из них образуется электрический диполь. Под влиянием диполей смещенных атомов решетки на междоузельном атоме индуцируется дипольный момент. В результате диполь-дипольного взаимодействия междоузельный атом Si притягивается к поляризованным атомам решетки. Поскольку величина дипольного момента на смещенных атомах решетки нарастает к источнику деформации, то междоузельный атом Si движется к атому замещения. Схематически это показано на рис. 1.5. Если теперь в слое создается высокий уровень ионизации, то неравновесные электроны и дырки экранируют диполи на смещенных атомах решетки, и описанный механизм миграции не работает. Таким образом, повышая уровень ионизации, можно подавить вытеснение примесей из узлов решетки как в процессе имплантации, так и в процессе последующего отжига.

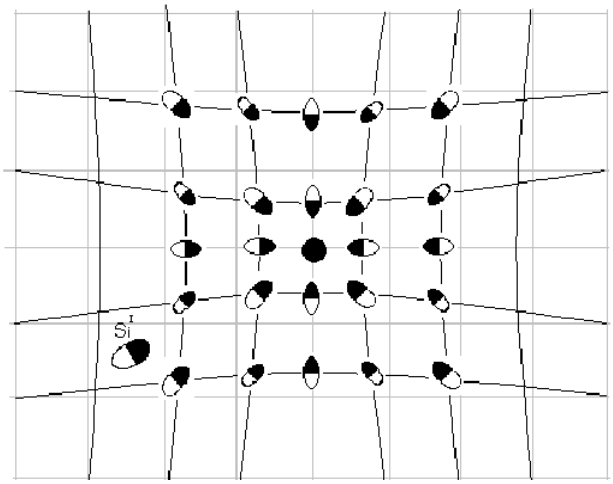


Рис. 1.5. Движение атома Si в кремнии в поле упругих деформаций, создаваемых примесью замещения [20]

Поэтому имплантацию ионов бора и углерода в кремний целесообразно проводить при максимально возможных плотностях тока ионов, не превышающих однако значений, при которых происходит разогрев образцов. При высокой плотности тока ионов практически весь бор и углерод будут располагаться в узлах решетки, и тем самым при последующем отжиге междоузельные атомы бора и углерода будут ловушками для междоузельных атомов кремния. Это должно подавлять формирование дислокационных петель внедренного типа.

Таким образом, результаты исследований показывают: количество примесей бора и углерода, располагающихся в узлах решетки кремния

непосредственно при имплантации при комнатных температурах, зависит от плотности тока ионов. Во-первых, потому, что с ростом плотности тока имплантации растет мгновенная концентрация вакансий, и это способствует переходу примеси в узлы решетки. Во-вторых, с ростом плотности тока ионов и соответствующим повышением концентрации неравновесных носителей заряда подавляется процесс вытеснения примесей замещения из узлов решетки междоузельными атомами кремния.

1.2. Пошаговое ионное легирование кремния

Образование остаточных нарушений в кремнии носит пороговый характер, как это было отмечено выше. Это положено в основу пошагового метода ионного легирования кремния. Однако для создания высоколегированных слоев кремния число операций может быть слишком велико для того, чтобы этот метод нашел практическое применение.

Для уменьшения числа операций предлагается эффект пороговой дозы совместить с эффектом аннигиляции дефектов на примесях замещения [21–23], используя явление Воткинса [24]. Это явление заключается в вытеснении примесей замещения (B, Ga, Al) из узлов решетки в междоузлия междоузельными атомами Si, образующимися при облучении. Явление вытеснение бора из узлов наблюдается и при термообработке имплантированного кремния. В этом случае источником междоузельных атомов Si являются междоузельные комплексы типа Si-B3 [18], распадающиеся при температуре 480°C и естественно при более высоких температурах, при которых проводят термическую обработку имплантированного кремния для электрической активации внедренной примеси.

После первого шага имплантации бора допороговой дозой ($1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$) и отжига ($T \geq 900$ °C) вся внедренная примесь располагается в узлах решетки [2]. Если атомы бора являются ловушками для междоузельных атомов Si через эффект Воткинса, то следующая доза бора может быть больше пороговой. Поскольку эффективность введения устойчивых радиационных дефектов при имплантации ионов B^+ составляет порядка 1 на ион, то всякая следующая доза будет больше предыдущей на дозу ранее внедренного и термоактивированного бора. Условием положительного эффекта является сохранение бора в узлах решетки в процессе следующего шага имплантации, т. е. эффект Воткинса в процессе имплантации необходимо подавить. При этом в процессе

имплантации число выбитых из узлов решетки атомов Si в 20 раз превышает число образующихся устойчивых комплексов [24].

Результаты исследования вытеснения атомов бора из узлов решетки кремния во время имплантации представлены на рис. 1.6 [13]. Здесь показано изменение периода решетки (ПР) Δa в кремнии, сильно легированном бором (ρ_0=0,005 Ом·см) в результате имплантации ионов B^+ в зависимости от плотности тока ионного пучка $J_{эф}$. Изменение ПР определяется радиационными дефектами, которые увеличивают ПР, и атомами бора, сжимающими решетку кремния, если они располагаются в узлах, вследствие различия в ковалентных радиусах атомов B (0,08 нм) и Si (0,1175 нм). Наблюдаемая зависимость $\Delta a(J_{эф})$ может быть объяснена тем, что с уменьшением плотности тока ионного пучка растет эффективность вытеснения бора из узлов решетки. Исходя из соотношения ковалентных радиусов бора и кремния и различия в Δa для сильно легированного бором кремния и слабо легированного кремния *n*-типа, можно оценить концентрации вытесненного бора из узлов решетки. Результаты представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Концентрация бора, вытесненного из узлов решетки при имплантации ионов бора

$J_{эф}$, мкА·см$^{-2}$	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0
C_i^S, см$^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{19}$	$1{,}4\cdot10^{19}$	$6{,}7\cdot10^{18}$	$8{,}6\cdot10^{17}$	$3\cdot10^{17}$

Концентрация вытесненного из узлов решетки бора в результате имплантации ионами B^+ дозой $1{,}8\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ при $J_{эф}$=0,05 мкА·см$^{-2}$ составляет $2{,}1\cdot10^{19}$ см$^{-3}$. Исходная концентрация бора в кремнии составляла $3\cdot10^{19}$ см$^{-3}$. При $J_{эф}$=1 мкА·см$^{-2}$ вытесняется лишь $3\cdot10^{17}$ см$^{-3}$ атомов бора. Таким образом, варьируя плотность тока ионов при имплантации, можно управлять процессом замещения по Воткинсу, и при плотностях тока ионов $J_{эф}$ больше 1 мкА·см$^{-2}$ вытеснение бора может быть подавлено практически полностью.

Влияние плотности тока имплантации на эффективность вытеснения бора из узлов решетки междоузельными атомами Si объясняется уровнем ионизации в слое внедрения. В пользу этого говорят исследования электрической активации внедренного бора в процессе изохронного отжига (рис. 1.4). Таким образом, повышая уровень ионизации, можно подавить вытеснение примесей из узлов решетки в процессе имплантации.

На рис. 1.7, *а* показаны электронные микрофотографии кремния, имплантированного ионами бора дозами $3\cdot10^{14}$, $7\cdot10^{14}$ и $1{,}5\cdot10^{15}$ см$^{-2}$. Отжиг проводился при 900 ^{o}C в течение 15 мин. На рис. 1.7*б* представлены микрофотографии ПЭМ кремния, имплантированного бором такими же результирующими дозами, но пошаговым методом. В отличие от чисто пошагового метода [2] доза $3\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ набиралась не в три, а в два приема: после первой имплантации пороговой дозой $1\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ проводился отжиг структур при температуре 900 ^{o}C в течение 15 минут.

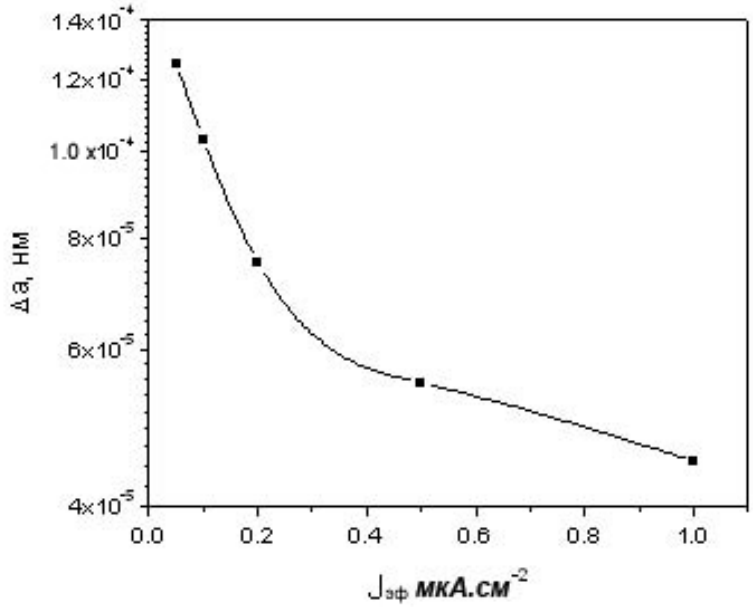


Рис. 1.6. Изменение периода решетки Δa в кремнии, сильно легированном бором (ρ_0 = 0,005 Ом·см) в зависимости от плотности тока имплантации ионов B^+ $J_{эф}$. Доза бора $1{,}8\cdot10^{14}$ см$^{-2}$

Образцы облучались дозой в два раза превышающей пороговую, т.е. $2\cdot10^{14}$ см$^{-2}$. Эффективная плотность тока ионного пучка составляла 1,5 мкА·см$^{-2}$. Затем проводилась термообработка в аналогичных условиях. Доза $7\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ набиралась в три шага. Первые два шага аналогичны предыдущему случаю ($1\cdot10^{14}$ см$^{-2}$+$2\cdot10^{14}$ см$^{-2}$). В третьем шаге имплантировалась доза бора $4\cdot10^{14}$ см$^{-2}$. Доза $1{,}5\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ набиралась в четыре шага. В образцы предыдущей партии {$1\cdot10^{14}$+$2\cdot10^{14}$+ $4\cdot10^{14}$ (см$^{-2}$)} добавлялась доза бора $8\cdot10^{14}$ см$^{-2}$.

Как видно из рис. 1.7, *а* при обычном режиме имплантации в слоях кремния с увеличением дозы имплантации растет концентрация остаточных нарушений. При дозе ионов бора $1{,}5\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ их концентрация составляет порядка 10^{11} см$^{-2}$. В слоях кремния, созданных модифицированным пошаговым методом, остаточные дефекты не выявляются (рис. 1.7, *б*). Отсутствие остаточных нарушений обусловлено тем, что междоузельные атомы Si, образующиеся при

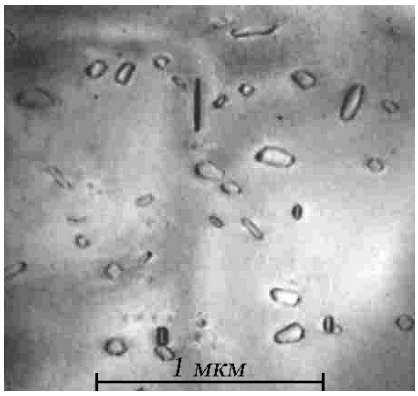
отжиге комплексов радиационных дефектов, расходуются на вытеснение бора из узлов решетки и не участвуют в создании протяженных нарушений.

Такая ситуация может быть реализована лишь при соблюдении условий, обеспечивающих сохранение атомов бора в узлах решетки во время имплантации. На рис. 1.7, *в* показана микрофотография кремния, имплантированного ионами бора дозой $1{,}5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ пошаговым методом, аналогично партии 3, но последний шаг имплантации дозой $8 \cdot 10^{14}$ $см^{-2}$ был выполнен при плотности тока ионов 0,05 $мкА \cdot см^{-2}$. Концентрация остаточных нарушений в этом случае составляет порядка $5 \cdot 10^{9}$ $см^{-2}$. Это является результатом того, что во время имплантации атомы бора были вытеснены из узлов решетки междоузельными атомами Si, возникающими при внедрении и не могли быть ловушками для атомов Si, возникающих при распаде комплексов радиационных дефектов.

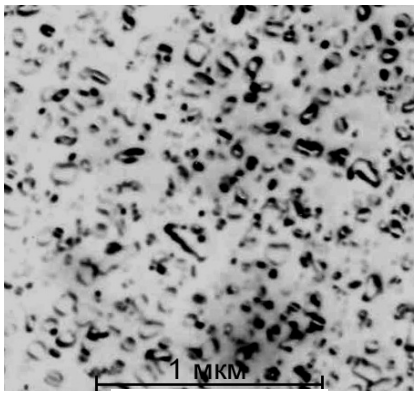
Может возникнуть вопрос, что в конечном итоге в результате термообработки все атомы бора окажутся в узлах, т. е. будут возникать собственные междоузельные атомы. Но процесс захвата бора на термодинамически равновесные вакансии протекает достаточно медленно и не создает такого пересыщения атомами Si, как это имеет место при распаде междоузельных комплексов, созданных при имплантации.

При дозах имплантации, выше $1{,}5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ и температуре отжига 1150 °С в процессе отжига при расположении атомов бора в узлах в силу несовпадения периодов решетки в слое внедрения и в кристалле образуются дислокации несоответствия. Сетка дислокаций несоответствия показана на микрофотографии ПЭМ на рис. 1.7, *г* для образца кремния, имплантированного бором дозой $1{,}8 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$. Интересно отметить, что в этом случае дислокационные петли отсутствуют. Это объясняется тем, что линии дислокаций поглощают избыточные атомы кремния (переползание дислокаций) [25]. Таким образом, в разработанном методе подавление образование дислокационных петель из избыточных междоузельных атомов кремния основано на совмещении эффекта пороговой дозы образования остаточных нарушений и эффекта аннигиляции точечных дефектов на примесных атомах бора через эффект замещения по Воткинсу во время термообработки.

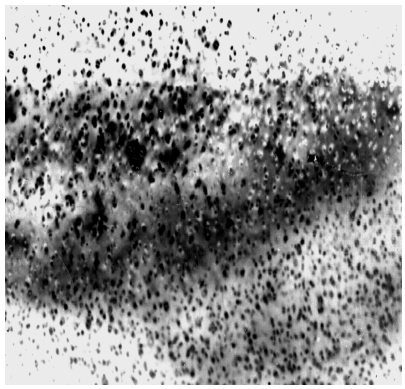
Необходимым условием положительного эффекта является сохранение атомов бора в узлах решетки во время очередного шага имплантации. Это реализуется при плотностях тока ионов не ниже 1 $мкА \cdot см^{-2}$, обеспечивающих уровень ионизации в слое внедрения, блокирующий процесс замещения. При дозе бора $1{,}5 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ число шагов имплантации с 15 при обычном пошаговом методе снижается до 4.



$3 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

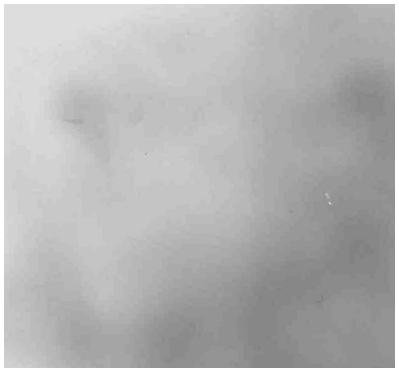


$7 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$



$1{,}5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$

а

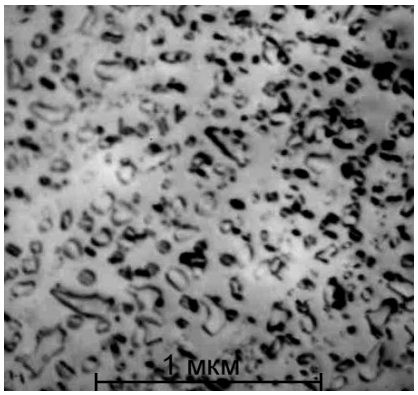


$(1+2) \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

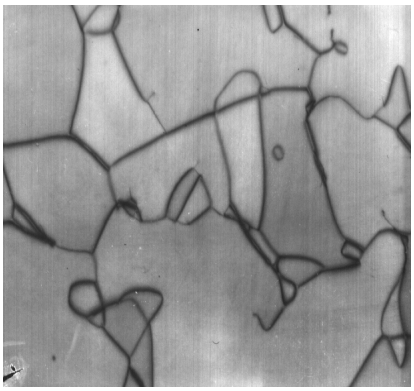
$(1+2+4) \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

$(1+2+4+8) \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

б



$(1+2+4+8) \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$



$1{,}8 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$

в *г*

Рис. 1.7. Электронные фотографии кремния, имплантированного: ионами B^+ (*а*), ионами B^+ пошаговым методом с плотностью тока ионов $J_{эф} = 1{,}5$ мкА·см$^{-2}$ (*б*), пошаговым методом при $J_{эф} = 0{,}05$ мкА·см$^{-2}$ для последнего шага (*в*), доза $1{,}8 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ (*г*)

1.3. Пошаговая имплантация бора в производстве микросхем на биполярных транзисторах

Преимущества пошаговой имплантации проверены на примере создания интегральных микросхем (ИС) на основе биполярных транзисторов [25, 26], где используется ионная имплантация бора для формирования одновременно: базы вертикальных *n-p-n* транзисторов, эмиттера и коллектора горизонтальных *p-n-p* транзисторов и четырех входных диодов, образующих диодный мост. Ионное легирование проводится через маску оксида кремния толщиной 700 нм без маски фоторезиста. Поэтому при пошаговом режиме ионного легирования не требуется после каждого шага внедрения бора и отжига выполнять трудоемкую операцию фотолитографии. Доза имплантации ионов B^+ для формирования указанных слоев составляет $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ (85 мкК·см$^{-2}$). Эта доза в пять раз превышает пороговую дозу образования остаточных нарушений. Плотность протяженных нарушений в таких слоях составляет $3 \cdot 10^{8}$ см$^{-2}$ (рис. 1.8). При такой дозе для подавления образования остаточных нарушений необходимо в обычном пошаговом режиме проводить 5 операций ионного легирования. В модернизированном нами пошаговом методе требуется 3 шага $(1+2+2) \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$.

Для возможного уменьшения числа шагов ионного легирования исследовано образование остаточных нарушений в кремнии, имплантированном ионами B^+ через окисный слой толщиной 150 нм. В этом случае часть потерь энергии иона, в том числе и на упругие взаимодействия, приходится на слой окисла. На рис. 1.9 показаны профили упругих потерь ионов B^+ с энергией 60 кэВ, внедряемых в кремний с окисным слоем (кривая *1*), и профиль распределения бора (кривая *2*). Как видно из рисунка, в окисном слое на упругие взаимодействия, т. е. на смещение атомов и создание точечных радиационных дефектов (и их скоплений), из которых затем при термообработке формируются остаточные нарушения, теряется около трети энергии иона бора.

В силу этого можно ожидать, что пороговая доза образования остаточных нарушений при внедрении через слой окисла несколько возрастет. На рис. 1.10 показаны микрофотографии ПЭМ кремния, имплантированного ионами B^+ с энергией 60 кэВ дозой $2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ и $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ через окисный слой толщиной 150 нм и отожженного при температуре 900 °С в течение 15 мин.

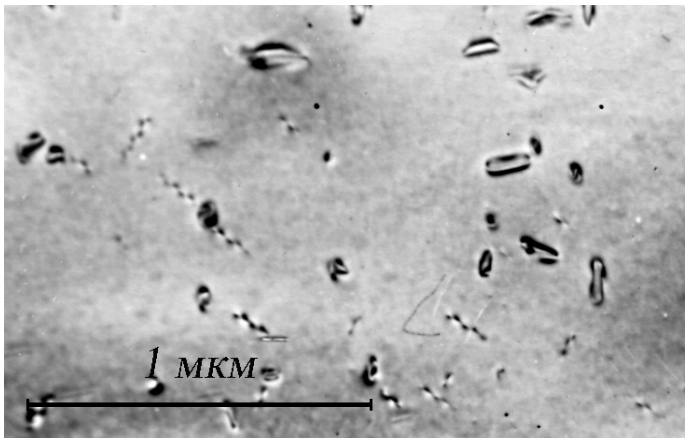


Рис. 1.8. Микрофотография ПЭМ кремния,
имплантированного ионами B^+ дозой $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

В этом случае остаточные нарушения либо не выявляются, либо выявляются одиночные дефекты. Выявление одиночных дефектов может свидетельствовать, что плотность нарушений в слое может составлять 10^6 см$^{-2}$.

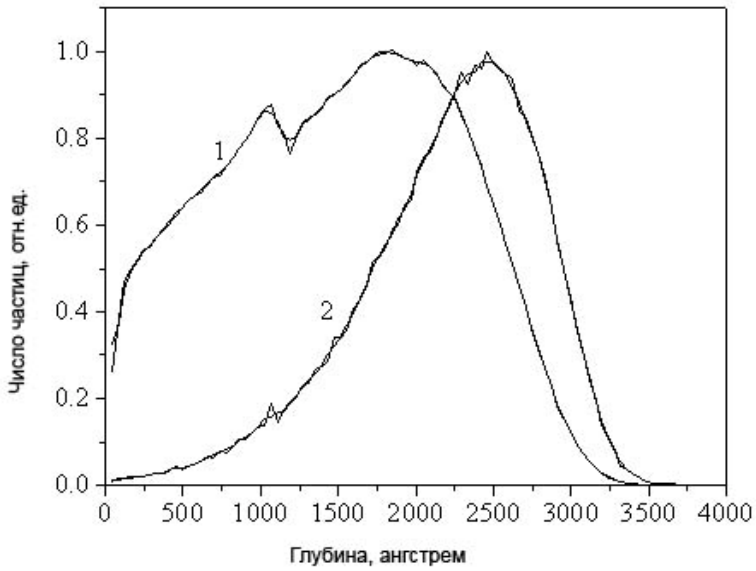
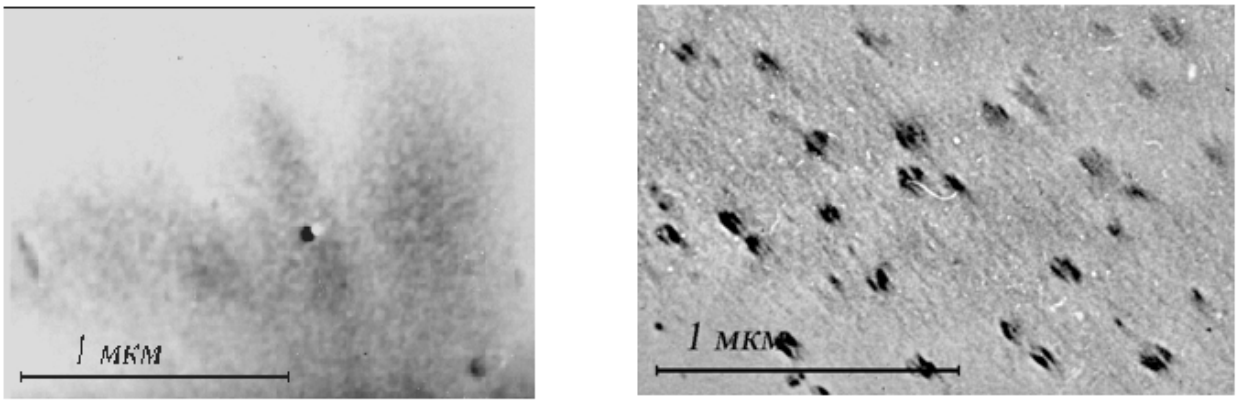


Рис. 1.9. Профили распределения упругих потерь (*1*)
и внедренных ионов бора (*2*) в кремнии

Плотность остаточных дефектов в этом случае практически такая же как и при внедрении бора непосредственно в кремний (рис. 1.8). Но в кремнии, имплантированном через окисный слой, как видно из рис. 1.10, б, при термообработке преимущественно образуются дислокационные петли, тогда как в случае имплантации без слоя окисла образуется более широкий спектр остаточных нарушений: петли, обычные и зигзагообразные стержневые

дефекты [28]. Возможно, это является результатом того, что в кремнии, имплантированном через окисел, остаточные дефекты образуются как из точечных дефектов радиационного происхождения, так и за счет дефектов, генерируемых в слое кремния при окислении. Известно, что при достаточно больших скоростях окисления концентрация избыточных атомов кремния может быть настолько велика, что протяженные нарушения образуются непосредственно в этом процессе [29].

Таким образом, если имплантация бора через окисный слой при дозах близких к пороговой ($1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$) дает некоторый эффект, то при дозе бора $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ заметного различия в концентрациях остаточных нарушений не наблюдается (рис. 1.8 и 1.10, б). Исходя из полученных результатов на контрольных пластинах, для эксперимента на рабочих пластинах были выбраны два процесса: ионное легирование в два и три шага.



а б

Рис. 1.10. Микрофотография ПЭМ кремния, имплантированного ионами B^+ дозой $2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ (а) и $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ (б) через слой окисла толщиной 150 нм

1.4. Электрофизические параметры транзисторов и диодов, изготовленных с использованием метода ионного легирования

Структура вертикального и горизонтального биполярного транзисторов схематически показана на рис. 1.11 и 1.12. Глубина *p*-*n*-перехода в области базы вертикального *n*-*p*-*n* транзистора и в области эмиттера горизонтального *p*-*n*-*p* транзистора составляет 2,1 мкм. Процесс формирования *p*-типа слоев в данном изделии состоит из следующих операций:

1. Создание окисного слоя толщиной 700 нм методом пирогенного окисления при 1100 °С.

2. Фотолитография и травление окисла. В слое окисла вскрываются окна,

в которых формируются области базы *n-p-n* транзисторов, эмиттера и коллектора *p-n-p* транзисторов, а также *p*-области входных диодов.

3. Создание окисных слоев вскрытых окон пирогенным окислением при 925 °С перед ионным легированием бора. Толщина окисла составляет 150 нм.
4. Ионное легирование бором. Доза 85 мкК·см$^{-2}$. Энергия ионов 60 кэВ.
5. Химическая очистка.
6. Отжиг и окисление базы при 1100 °С.

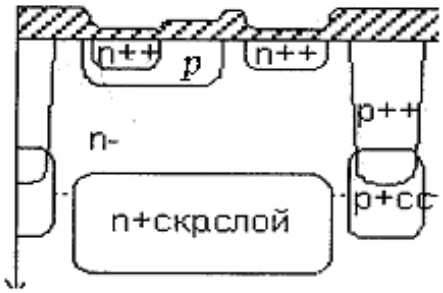


Рис. 1.11. Структура вертикального *n-p-n* транзистора

Рис. 1.12. Структура горизонтального *p-n-p* транзистора

На этих рисунках показаны:

n+скр.слой – сильно легированный сурьмой скрытый слой *n*-типа проводимости для снижения последовательного сопротивления коллектора;

p++ – сильно легированная бором область разделения элементов ИМС;

p+*cc* – сильно легированный бором скрытый слой *p*-типа проводимости;

n- – область слабо легированного коллектора *n-p-n* вертикального транзистора и область слабо легированной базы горизонтального *p-n-p* транзистора;

p – легированная бором область базы вертикального *n-p-n* транзистора, области эмиттера и коллектора горизонтального *p-n-p* транзистора;

n++ – сильно легированная фосфором область эмиттера вертикального *n-p-n* транзистора и контакта к базе горизонтального *p-n-p* транзистора.

Ионное легирование бором проводилось в 1 шаг (стандартная технология), в два и в три шага. В случае трех шагов суммарная доза набиралась как (16+32+37) мкК·см$^{-2}$ с промежуточными отжигами при 850 °С в течение 30 мин в атмосфере азота. В двух шаговом методе легирования первая доза составляла 28 мкК·см$^{-2}$, вторая – 57 мкК·см$^{-2}$ с аналогичным промежуточным отжигом.

Эксперимент проводился на рабочей партии изделия в количестве 48

пластин. На 5 пластинах ионное легирование бора было сделано в 3 шага, на 4 пластинах – в два шага. Остальные пластины изготавливались по текущему режиму с легированием бора в 1 шаг. На диодах измерялись следующие параметры: ток утечки диода при обратном смещении 5 В; обратное напряжение при уровне тока 100 мкА; прямое падение напряжения при уровне тока 100 мкА; вольт-амперная характеристика диода при обратном смещении.

Результаты измерений представлены в табл. 1.2. Каждый параметр измерялся в двух точках на пластине. Анализ полученных результатов свидетельствует, что токи утечки диодов на опытных пластинах с ионным легированием в три шага в среднем на 50 % меньше, чем на пластинах со стандартным легированием бора в 1 шаг. Напряжение пробоя на опытных партиях на 2-4 В выше, чем на текущих пластинах. Величина прямого падения напряжения на диодах опытных и стандартных пластин практически одинаковы. На рис. 1.14 приведены вольт-амперные характеристики при обратном смещении входных диодов с опытных (имплантация в три шага) и стандартных пластин. Эти кривые являются характерными для этих партий диодов и демонстрируют положительный эффект пошагового метода ионного легирования бора при создании входных диодов в изделии.

На *n-p-n* вертикальных и *p-n-p* горизонтальных транзисторах были измерены зависимости тока коллектора, тока базы и коэффициента усиления от напряжения на базе и коллекторе. Наиболее заметные различия наблюдаются в зависимостях коэффициента усиления β от напряжения на базе для горизонтального *p-n-p* транзистора (рис. 1.15). На опытных пластинах величина β составляет 220-230, на текущих – 170-190. В то же время для вертикального *n-p-n* транзистора существенных различий в параметрах опытных и контрольных образцов не зарегистрировано.

В ионно-легированных слоях образующиеся при термообработке из точечных радиационных дефектов протяженные нарушения вносят глубокие уровни в запрещенную зону кремния [1]. Эти нарушения являются центрами рекомбинации неравновесных носителей заряда. Подавление образования протяженных нарушений путем пошаговой имплантации бора приводит к увеличению коэффициента усиления горизонтальных транзисторов (рис. 1.14). В случае горизонтального *p-n-p* транзистора пошаговой имплантацией формировались и коллектор, и эмиттер, т. е. подавлялось образование остаточных нарушений на обоих переходах: база-коллектор, база-эмиттер. В вертикальном *n-p-n* транзисторе пошаговой имплантацией бора формировалась только база.

Таблица 1.2

Электрофизические параметры диодов

Номер диода	Параметр	Ед. изм.	Пл. хххх-44 (3 шага ИЛ)	Пл. хххх-47 (1 шаг ИЛ)	Режим измерения
D1.1	Ток утечки	пА	44,4 43,5	53,1 54,9	U=5 В
	Напряжение пробоя	В	84,4 84,6	82,5 82,5	I_R=100 мкА
	Прямое напряжение	В	0,55 0,55	0,57 0,57	I_F=100 мкА
D1.2	Ток утечки	пА	36,6 59,0	53,6 74,1	Ток утечки
	Напряжение пробоя	В	84,6 84,4	82,5 83,5	Напряжение пробоя
	Прямое напряжение	В	0,55 0,55	0,57 0,57	Прямое напряжение
D2.1	Ток утечки	пА	36,8 29,2	43,3 70,5	Ток утечки
	Напряжение пробоя	В	81,8 82,5	77,6 78,4	Напряжение пробоя
	Прямое напряжение	В	0,56 0,56	0,57 0,57	Прямое напряжение
D2.2	Ток утечки	пА	36,7 52,6	49,5 44,9	Ток утечки
	Напряжение пробоя	В	82,5 82,5	78,5 78,5	Напряжение пробоя
	Прямое напряжение	В	0,56 0,56	0,57 0,57	Прямое напряжение

Протяженные нарушения с уровнями энергии в средине запрещенной зоны являются также генерационными центрами и увеличивают токи утечки диодов. При формировании входных диодов пошаговой имплантацией бора токи утечки заметно ниже (рис. 1.13).

Вольтамперные характеристики идеального полупроводникового *p*-*n*-перехода могут быть удовлетворительно описаны с помощью формулы Шокли.

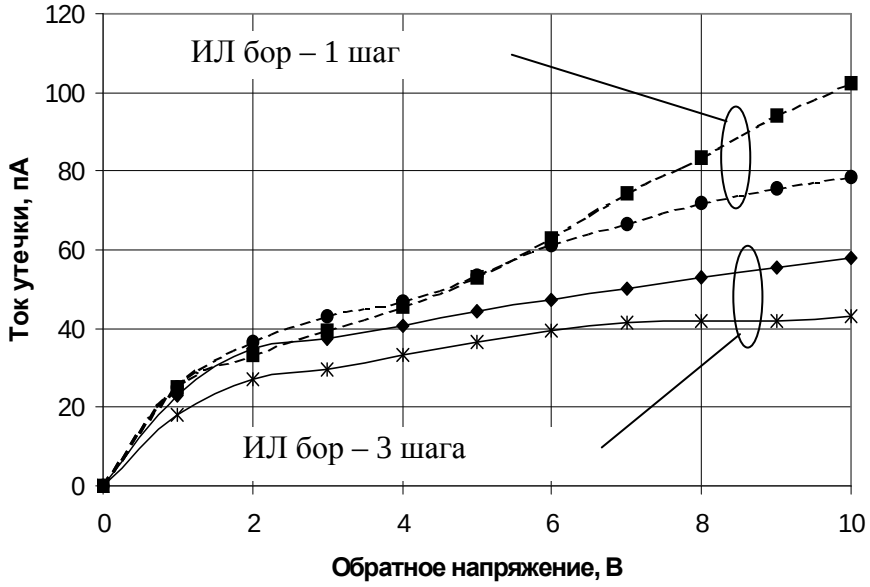


Рис. 1.13. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики входных планарных диодов на опытной (3 шага) и текущей (1 шаг) пластинах

Для кремниевых *p*-*n*-переходов наблюдается лишь качественное согласие с формулой Шокли. Основными причинами отклонения характеристики от идеальной являются [30]:

1. Влияние поверхности; в основном за счет ионных зарядов на ней или вблизи нее, которые индуцируют заряды в полупроводнике. Это приводит к образованию так называемых поверхностных каналов или поверхностных обедненных слоев.

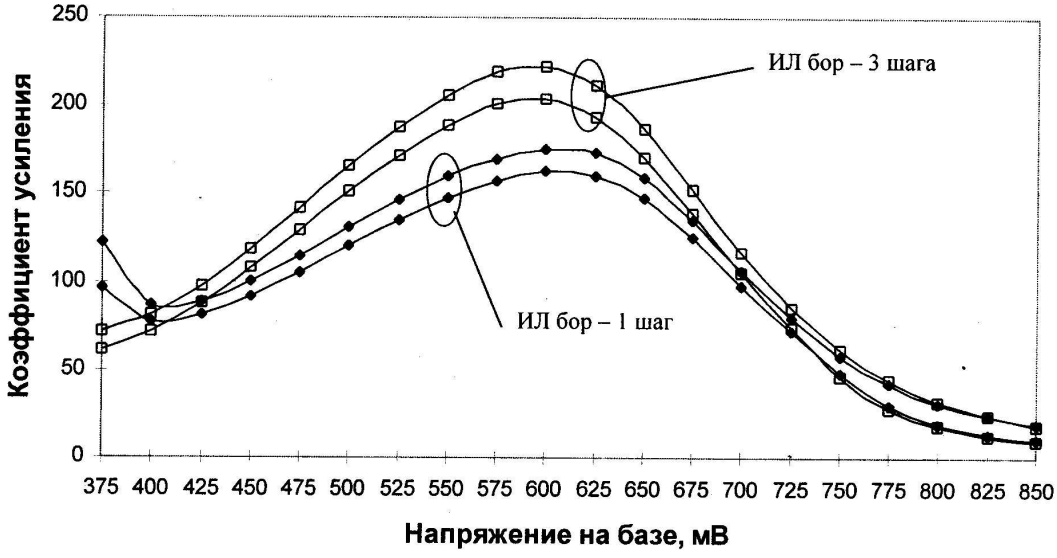


Рис. 1.14. Зависимости коэффициента усиления горизонтальных транзисторов от напряжения на базе для опытной (3 шага) и текущей (1 шаг) партии

Наличие канала влияет на обедненную область *p*-*n*-перехода и вызывает возрастание поверхностных токов утечки. Для интегральных схем, составляющих основу современной электронной техники, можно ограничиться лишь рассмотрением эффектов на границе раздела кремний – диоксид кремния.

2. Генерация и рекомбинация носителей в обедненном слое.

3. Туннелирование носителей между состояниями в запрещенной зоне.

4. Влияние последовательного сопротивления.

5. Пробой перехода под действием достаточно большого электрического поля.

В кремниевых планарных *p*-*n*-переходах поверхностные токи утечки обычно намного меньше генерационного тока в обедненной области.

На рис. 1.15 и 1.16 приведены обратные ветви вольт-амперных характеристик диодов с опытных (имплантация в три шага, рис. 1.17) и стандартных пластин (рис. 1.16), построенные в двойном логарифмическом масштабе. Как видно из рис. 1.16-1.17, для вольт-амперных характеристик диодов при обратном смещении, изготовленных как по технологии трехшаговой имплантации, так и по стандартной технологии присуще наличие двух участков со степенной зависимостью тока от напряжения $J \sim V^n$. На первом участке для низких напряжений $n \approx 0{,}5$, что характерно для обратной вольт-амперной зависимости идеального диода [30]. В диодах, созданных трехшаговой имплантацией бора, зависимости обратного тока от напряжения лежат несколько ниже по сравнению с зависимостями для базовых приборов. Это говорит о снижении генерационных процессов в обедненной области.

При напряжениях выше 5 В показатель степенной зависимости тока от напряжения *n* изменяется**,** причем величина показателя зависит от выбранной технологии ионной имплантации. В диодах, создаваемых трехшаговой имплантацией B^+, при напряжениях выше 5 В показатель *n* принимает значения ниже 0,5, как это необходимо для диода, в котором плотность тока обусловлена генерацией в обедненной области. Причина снижения показателя n остается пока не ясной.

Высокие значения *n* (выше 0,5) наблюдались в приборах, изготовленных по стандартной технологии имплантации, и характерны для диодов с дислокациями в области *p*-*n*-перехода [31]. На рис. 1.17 представлены обратные вольт-амперные характеристики *p*-*n*-переходов с различной плотностью дислокаций [31, 32].

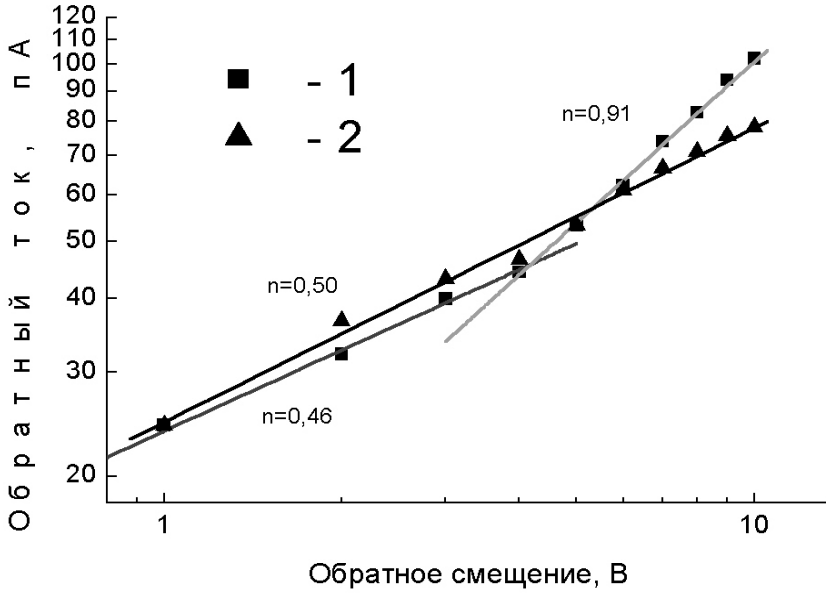


Рис. 1.15. Вольт-амперная характеристика диода при обратном смещении, изготовленного по стандартной технологии: 1 - образец 1; 2 - образец 2

Как следует из рисунка, дислокации заметно увеличивают токи утечки *p*-*n*-перехода. Особенно губительно для приборов сочетание дислокаций и примесей металлов с большими коэффициентами диффузии. В кремниевых переходах при декорировании дислокаций металлическими примесями наблюдалось увеличение токов утечки вплоть до короткого замыкания *p*-*n*-перехода [32–34].

В настоящее время существует лишь качественное объяснение результатов экспериментов, в которых увеличение токов утечки связывается с образованием по дислокациям «мостиков» повышенной проводимости через область пространственного заряда *p*-*n*-перехода [31, 32, 35]. Оценки [35] дают сопротивления этих «мостиков» от 20 МОм до нескольких Ом. Эта интерпретация опирается на известный факт стекания примеси к дислокациям.

Наиболее распространенное объяснение влияния дислокаций на токи утечки основывается на предположении, что дислокация в кремнии *n*-типа ведет себя как цепочка акцепторов, а в *p*-кремнии – как цепочка доноров. Поэтому из условий электронейтральности дислокация должна образовывать вокруг себя трубку повышенной концентрации основных носителей заряда [31].

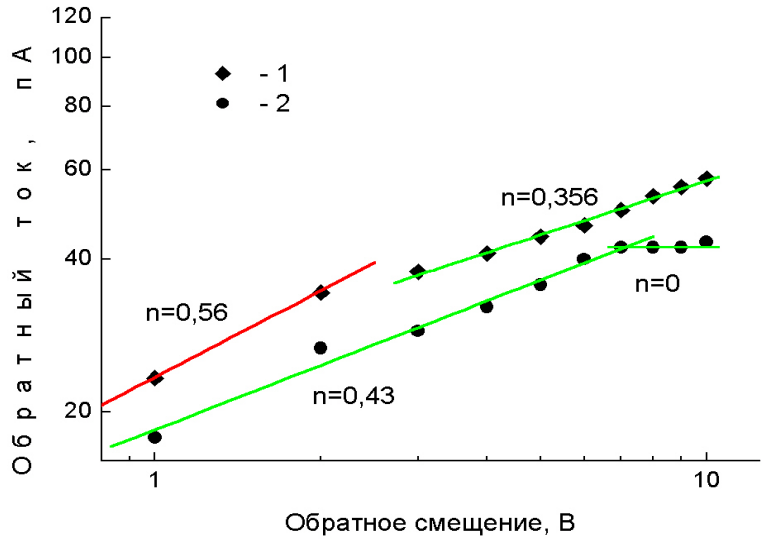


Рис. 1.16. Вольт-амперная характеристика диода при обратном смещении, изготовленного по технологии трехшаговой имплантации:
1- образец 1; 2- образец 2

Таким образом, можно предположить, что наблюдаемое нами уменьшение токов утечки в диодах, изготовленных по трехшаговой технологии имплантации по сравнению с диодами стандартной технологии, обусловлено, с одной стороны, снижением генерационных центров, связанных с дислокационными петлями.

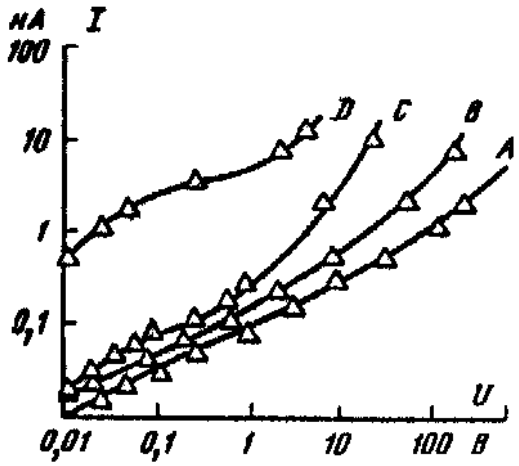


Рис. 1.17. Обратные вольт-амперные характеристики *p-n*-переходов с различной плотностью дислокаций [31, 32] : *A* – плотность дислокаций менее 10^3 см$^{-2}$; *B* – более $5 \cdot 10^7$ см$^{-2}$; *C* – 10^7 см$^{-2}$ (нестабильных дислокаций); *D* – диоды с крупными выделениями меди

С другой стороны, снижение плотности дислокаций в области *p*-*n*-перехода устраняет проводящий канал вдоль линий дислокаций. Подавление образования остаточных нарушений посредством пошаговой имплантации бора обеспечивает повышение процента выхода годных изделий. Результаты контроля функционирования кристаллов показаны в таблице 1.3. Видно, что при двухшаговой имплантации бора средний съем годных кристаллов увеличивается на 11,6 %, при имплантации бора в три шага съем годных изделий увеличивается на 15,5 %.

Таблица 1.3

Средний съем годных кристаллов на экспериментальных пластинах с ионной имплантацией бора в базу в 3 и 2 шага и текущих пластинах с имплантацией в один шаг

Режим ИЛ бора	Количество пластин	Средний съем годных кристаллов	Процент увеличения съема
3 шага	5	1267	15,5
2 шага	4	1224	11,6
1 шаг (текущий)	35	1097	–

Таким образом, использование в производстве ИС разработанного пошагового метода ионного легирования позволяет получать бездислокационные структуры кремния и тем самым улучшать электрофизические характеристики элементов интегральных схем (снизить токи утечки диодов, повысить коэффициенты усиления транзисторов) и повысить процент выхода годных изделий.

Список литературы к главе 1

1. Челядинский, А.Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А.Р. Челядинский, Ф.Ф. Комаров // Успехи физич. наук. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 813–846.

2. Челядинский, А.Р. Модель пары: атом фосфора–междоузельный атом кремния / А.Р. Челядинский, В.А. Буренков // ФТТ. – 1998. – Т. 40, № 11. – С. 1995–1998.

3. Чернышев, А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.А. Чернышев. – М: Радио и связь, 1988. – 256 с.

5 Конструктивно-технологические особенности интегральных схем, влияющие на их надежность / М.И. Горлов [и др.] // Машиностроитель. – 2005. – № 10. – С.37-39.

4. Jones, K.S. A systematic analysis of defects in ion-implanted silicon / K.S. Jones, S. Prussin, E.R. Weber // Appl. Phys. A. – 1988. – Vol. 45, № 1. – P. 1–3.

6. North, J.C. Channeling study of boron-implanted silicon / J.C. North, W.M. Gibson // Appl. Phys. Lett. – 1970. – Vol. 16, № 3. – P. 126–129.

7. The lattice location of boron ions implanted into silicon / G. Fladda [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1970. – Vol. 16, № 8. – P. 313–315.

8. Proton and alpha-particle channeling tool for locating foreign atoms in crystals / L. Erikson [et al.] // Can. Nucl. Tech. – 1966. – Vol. 5, № 1. – P. 40–43.

9. Исследование метостоположения атомов фосфора в решетке кремния с помощью ядерной реакции ^{31}P (p, α_0) ^{28}Si / Н.А. Скакун [и др.] // ФТП. – 1975. – Т. 9, № 4. – С. 755–756.

10. Ion implantation of silicon and germanium at room temperature. Analysis by means of 1.0 MeV helium ion scattering / J.W. Mayer [et al.] // Can. J. Phys. – 1968. – Vol. 46. – P. 663–673.

11. Плебанович, В.И. Локализация имплантированных примесей бора и углерода в кремнии / В.И. Плебанович, А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаев // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2006. –№ 2. – С. 16–20.

12. Образование остаточных нарушений в кремнии, имплантированном ионами углерода и бора / В.И. Плебанович, А.И. Белоус, А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаев // Доклады БГУИР. – 2006. – № 12(14). – С. 42–48.

13. Efficiency of Watkins substitution in silicon during implantation and annealing / A.R. Chelyadinskii, V.I. Plebanovich, V.Yu. Yavid, P. Zukowski // Материалы и структуры современной электроники: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 5-6 октября 2006 г. / БГУИР. – Минск, 2006. – С. 172–175.

14. Hirvonen, J.K. Lattice disorder in ion implanted boron-doped silicon / J.K. Hirvonen, F.H. Eisen // Appl. Phys. Lett. – 1971. – Vol. 19, № 1. – P. 14–16.

15. Bicknell, R.W. The role of the impurities on extended defect formation in irradiated silicon / R.W. Bicknell // Proc. R.Soc. London. Ser. A – 1969. – Vol. 311. – P. 75–79.

16. Стельмах, В.Ф. Рентгенодифракционные исследования кремния, имплантированного ионами бора / В.Ф. Стельмах, В.Д. Ткачев, А.Р. Челядинский // ФТТ. – 1978. – Т. 20, № 7. – С. 2196–2200.

17. Pre-amorphization damage in ion-implanted silicon / R.J. Schreutelkamp [et al.] // Mater. Scie. Rep. – 1991. – Vol. 6, № 7–8. – P. 275–366.

18. Werner, P. Investigation of C_xSi_{1-x} defects in C implanted silicon by transmission electron microscopy / P. Werner, S. Eichler, G. Mariani // Appl. Phys. Lett. – 1997. – № 2. – P 252–254.

19. Емцев, В.В. Точечные дефекты, возникающие в кремнии с примесью бора, галлия и индия при низкотемпературном гамма-облучении / В.В. Емцев, М.А. Маргарян // Письма в ЖТФ. – 1984. – № 10. – С. 1063–1065.

20. Lee, Y.H. Silicon di-interstitial in ion-implanted silicon / Y.H. Lee // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73, № 8. – P. 1119–1123.

21. Пошаговый метод ионного легирования кремния / В.И. Плебанович, А.И. Белоус, А.Р.Челядинский, В.Б.Оджаев // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 6. – С. 47–51.

22. Создание бездислокационных ионно-легированных слоев кремния / В.И. Плебанович, А.И. Белоус, А.Р.Челядинский, В.Б.Оджаев // ФТТ. – 2008. – Т. 50, № 8. – С. 1378–1382.

23. Создание бездислокационных ионно-легированных слоев кремния / А.Р.Челядинский, В.И. Плебанович, А.И. Белоус, В.Б.Оджаев // Материалы и структуры современной электроники: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 5-6 октября 2006 г. / БГУ. – Минск, 2006. – С. 237–242.

24. Watkins, G.D. Defects in irradiated silicon: EPR and electron-nuclear double resonance of interstitial boron / G.D. Watkins // Phys. Rev. – 1975. – Vol. 12, № 12. – P. 5824–5839.

25. Калинин, В.В. Образование дислокационных сеток при отжиге имплантированных бором слоев кремния / В.В. Калинин, Н.Н. Герасименко, С.И. Стенин // ФТТ. – 1976. – Т. 18, № 9. – С. 2803–2805.

26. Пошаговый метод ионного легирования кремния в создании интегральных микросхем / В.И. Плебанович, А.Р. Челядинский, Ю.Б. Васильев, А.И. Гладчук, В.Е.Осипов // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37, № 3. – С. 213–218.

27. Пошаговый метод ионного легирования кремния в создании интегральных микросхем / В.И. Плебанович, А.Р. Челядинский, Ю.Б. Васильев, А.И. Гладчук, В.Е.Осипов // Физика, материаловедение и физико-химические основы технологии получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе: материалы IV Российской науч. конф. с международным участием, Москва, 3-6 июля 2007 / Гос. технол. ун-т. – М.:, 2007. – С. 254–255.

28. Agarwal, A. Interstitial defects in silicon from 1–5 keV Si+ ion implantation / A. Agarwal // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 70, № 25. – P. 3332–3334.

29. Lambert, J.A. The generation of point defects during the oxidation / J.A. Lambert, P.S. Dobson // Phil. Mag. A. – 1981. – Vol. 44, № 5. – P. 1031–1042.

30. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / Зи С. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – С. 455.

31. Сорокин, Ю.Г. Влияние дислокаций на электрические параметры *p-n*-переходов / Ю.Г. Сорокин // Тр. Всес. Электротехнического института. – 1980. – № 90. – С. 91–101.

32. Lawrence, J.E. Behavior of dislocations in silicon semiconductor devices: diffusion, electrical / J.E. Lawrence // J. Electrochem. Soc. – 1968. – Vol. 115. – P. 860–865.

33. Lawrence, J.E. Electrical properties of copper segregates in silicon *p-n*-junctions / J.E. Lawrence // J. Electrochem. Soc. – 1965. – Vol. 112. – P. 796–800.

34. Mayer, A. The quality of starting silicon / A. Mayer // Solid State Technol. – 1972. – Vol. 15, № 4. – P. 38–45.

35. Plantinga, G.H. Effect dislocations on the transistors parameters fabricated by shallow diffusion / G.H. Plantinga // IEEE Trans. Electron Devices. – 1969. – Vol. 16, №4. – P. 394–400.

ГЛАВА 2
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ПЛАЗМОЙ СВЧ РАЗРЯДА

В настоящее время в научных исследованиях и промышленности широкое применение находят устройства и процессы вакуумной плазменной обработки твердых тел в сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полях (микроволновой плазме) [1,2]. Одной из первых областей практического использования этого метода стало травление поверхностей в субмикронной технологии микроэлектроники, преимущества которого состоят в уменьшении подтравов и увеличении эффективности защитных масок в результате воздействия более концентрированных потоков химически активных частиц с меньшей кинетической энергией. Неравновесная плазма СВЧ разрядов позволяет осуществлять плазмохимические процессы при низкой температуре газа, но при более высокой температуре электронов. Такие особенности работы СВЧ генераторов плазмы, как отсутствие электродов, возможность осуществления режима, при котором нагрузка не влияет на работу СВЧ генератора, высокий КПД преобразования тока промышленной частоты в СВЧ ток, обусловливают повышенное внимание к ним исследователей и практиков. В связи с этим обработка поверхностей материалов неравновесной плазмой СВЧ разряда находит все более широкое применение в качестве промышленных технологий изделий микроэлектроники.

2.1. Процессы удаления материала с поверхности твердых тел

2.1.1. Активирование поверхности и плазменная очистка

Перед проведением ряда технологических процессов (например, высокотемпературное окисление, первая фотолитография, нанесение металлической либо диэлектрической пленки и т.д.) следует провести очистку подложек для удаления как органических, так и неорганических загрязнений в виде инородных атомов и молекул, появляющихся на предыдущих этапах технологических процессов или во время переноса подложек с одной технологической линии на другую. Если такие загрязнения не удалить, то возможно ухудшение электрических характеристик приборов, а также понижение надежности интегральных микросхем.

Плазменная очистка поверхности подложек происходит вследствие химического взаимодействия загрязнений с ионами и радикалами активных газов с образованием летучих соединений, которые удаляются из реакционного

объема в процессе откачки. Очищенные и активированные поверхности подложек обладают высокой прочности связью с наносимыми пленками [3]. Травление и очистка пластин перед осаждением пленок в едином вакуумном цикле позволяют уменьшить уровень загрязнений, получить хорошую текстуру, адгезию, микроструктуру и снизить электромиграцию в пленках.

Основными компонентами газовой смеси для очистки поверхности подложки от органических загрязнений с использованием СВЧ разряда является кислород с небольшими (до 1 об. %) добавками аргона, азота или гелия. Добавки H_2, N_2, Ar, He катализируют процессы диссоциации молекул кислорода в плазме до атомарного состояния и тем самым ускоряют процесс очистки. Плазменная обработка используется также с целью удаления собственного оксида, т.е. оксида, образующегося на чистой поверхности кремния в атмосфере кремния в качестве предварительной очистки перед осаждением пленочных слоев различных материалов и составов. В этом случае используется H_2 с добавками H_2O и NF_3. Как правило, процесс реализуется способом травления "вне зоны разряда" [4]. Это позволяет свести к минимуму поверхностные повреждения и переосаждение.

Низкотемпературная очистка позволяет получить чистую поверхность без каких-либо дефектов. Установлено [5], что в случае плазменной очистки, проводимой в режиме реактивной ионно-лучевой обработки, имеется критическая доза облучения ионами водорода, выше которой на очищенной поверхности начинают наблюдаться кристаллические дефекты. Они впоследствии могут сказаться на качестве наносимых поверх эпитаксиальных слоев. Кроме того, определенные режимы низкотемпературной очистки в водородной плазме с источником, работающим в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), способствуют процессу образования шероховатости поверхности кремниевой пластины. По данным исследований [6] установлено, что шероховатость поверхности, в частности пластины Si (100), в сильной степени связана с зародышеобразованием и ростом пластинчатых дефектов (100) в подповерхностной области кремния: травление протекает в основном в местах пересечения этих дефектов и поверхности кремния. Уровень содержания этих дефектов и, следовательно, степень шероховатости поверхности кремниевой пластины можно контролировать, управляя величинами потока ионов водорода и температурой подложки в интервале 170 – 450 ^{0}C. Разработанный и исследованный в [7] процесс очистки in situ контактных отверстий размером < 0,5 мкм в схемах динамических ЗУПВ с использованием плазмы H_2, Ar и их смесей, возбуждаемой от источника ЭЦР,

показал, что плазма высокой плотности, но с малой энергией ионов вносит минимальные повреждения в поверхностный слой, а благодаря высокой направленности эффективно удаляет поверхностные примеси из контактных отверстий, что обеспечивает получение низкого и стабильного контактного сопротивления. Кроме того, при такой очистке создается форма профиля контакта, способствующая заполнению отверстия алюминием.

Подготовка поверхности перед нанесением пленки для улучшения адгезии и управления составом границы раздела в режиме ионно-лучевой очистки проводится с использованием инертных газов в диапазоне энергий ионов от нескольких десятков до нескольких сотен электронвольт. СВЧ ионные источники, обеспечивающие большую плотность тока ионного пучка и сравнительно низкие энергии ионов, хорошо подходят для подготовки поверхности полимеров и других синтетических материалов перед нанесением металлов. Эти процессы могут также проводиться с применением активных газов, таких, как кислород или фторуглероды.

Еще одной перспективной областью применения ЭЦР источников является очистка поверхности полупроводниковой пластины перед процессом эпитаксии от примесей углерода и оксидов. Если оксид можно удалить высокотемпературным отжигом (800–1000 ^{0}C), то для удаления углерода приходится применять методы ионно-плазменного распыления, которые, однако, вносят радиационные нарушения, устраняемые также высокотемпературным отжигом (700 ^{0}C). Обработка в ЭЦР источнике в плазме водорода позволяет легко удалить углерод и оксид при температуре не выше 400 ^{0}C [8].

Процесс СВЧ плазмохимической обработки весьма перспективен для межоперационной очистки технологических и плазменных камер плазменных установок. В [9,10] предлагаются методы высокоэффективной СВЧ плазменной очистки плазменного технологического оборудования от остатков продуктов плазменных реакций. В частности, это может быть двухстадийный процесс [9]. На первой стадии производятся напуск в плазменную камеру из системы газоснабжения плазмообразующего газа и возбуждение плазмы под действием СВЧ энергии. Химически активные радикалы, образующиеся в плазме разряда, взаимодействуют с остатками загрязнений на внутренней поверхности технологической камеры и оснастки. На второй стадии к реакционно-способному газу добавляется инертный газ, после чего вновь возбуждается газовый разряд. Инертный газ, кроме того, может продуваться через

технологическую камеру перед первой стадией с целью удаления осевших частиц, не связанных с конструктивными элементами. Реакционно-способным (реактивным) газом рекомендовано выбирать NF_3, однако могут использоваться и другие фторсодержащие газы, такие, как CF_4, SF_6 и др. Более того, в качестве реактивных газов могут быть использованы вместо фторсодержащих газов хлор- или другие галогенсодержащие газы.

2.1.2. Плазменное травление в вакууме

Газовая плазма СВЧ разряда применяется для реализации практически всех процессов вакуумного газоплазменного травления, используемых в производстве кремниевых микроэлектронных приборов (табл. 2.1).

Таблица 2.1.

Основные процессы вакуумного газоплазменного травления в производстве кремниевых микроприборов

Травление	Функциональный слой (травимый материал)	Материал подслоя	Материал маски
Затворов	Поликремний, тугоплавкие металлы, их силициды и полициды	SiO_2	Фоторезист (ФР)
Канавок	Монокристаллический кремний	Отсутствует	ФР+SiO_2
Защитного слоя	Нитрид кремния	SiO_2	Фоторезист
Межслойной изоляции для планаризации	Система фосфорносиликатное стекло (ФСС) - SiO_2	Отсутствует	Фоторезист
Контактных окон различной глубины	Система ФСС - SiO_2	Si, тугоплавкие металлы, их силициды, моно-Si	Фоторезист
Планаризирующих слоев маскирующих покрытий	Фоторезисты, полиимид	Si, система ФСС - SiO_2 сплавы Al	SiO_2, Si_3N_4, ФСС, металлы
Контактных окон различной глубины	Система ФСС - SiO_2	Сплавы Al	Фоторезист
Металлизации на Si подложке	Al/Si; Al/Si/Cu; Al/Si/Ti; Al/Si + TiW; AlN+ Al/Si	ФСС	Фоторезист

Плазма СВЧ разряда позволяет реализовать все виды физико-химического взаимодействия энергетических и химически активных частиц с поверхностными атомами или молекулами обрабатываемого материала.

В процессах ***реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ)*** обрабатываемый материал вынесен из зоны плазмы разряда, находится в вакууме и подвергается воздействию пучка ускоренных ионов химически активного газа, которые в процессе перезарядки, диссоциации и нейтрализации в пучке и на поверхности материала могут образовывать реакционно-способные травящие частицы и производить травление.

Отличительной особенностью механизма РИЛТ по сравнению с другими процессами вакуумно-плазменного травления является то, что в нем используется как физическое, так и химическое взаимодействие ускоренных ионов с атомами поверхностных слоев обрабатываемого материала. По сравнению с ИЛТ при этом значительно повышается скорость травления материала, а в некоторых случаях также степень использования рабочего газа.

Процессы РИЛТ с применением плазмы СВЧ разряда реализуются в газоразрядных системах, использующих явление электронного циклотронного резонанса. К настоящему времени имеются сообщения о травлении с помощью этих газоразрядных систем практически всех материалов микроэлектроники в широком наборе газов и их смесей (табл. 2.2).

Используя возможность изменения угла падения пучка, с помощью РИЛТ удалось создать в диоксиде кремния решетки косоугольного профиля с субмикронным периодом. Показана возможность травления Si, Mo, Ti и сплавов Al. Применение РИЛТ при обработке материалов типа $A^{III}B^{V}$ позволило, опираясь на расширенные возможности метода, получить рельеф с профилем, не достижимым другими методами. Сопряженная с РИЛТ техника, названная ***травлением, стимулированным ионным пучком***, использована при изготовлении приборов на GaAs.

Типовые технологические режимы обработки: степень предварительного вакуума не хуже $7 \cdot 10^{-4}$ Па, рабочее давление порядка $5 \cdot 10^{-2}$ Па, плотность ионного тока не менее 5 мА/см^2 , энергия ионов в процессе травления 20 – 40 эВ. Такие режимы дают возможность осуществлять анизотропное травление с нулевым подтравом под маску с высокой селективностью травления материалов.

Таблица 2.2.

Травление в СВЧ ЭЦР реакторах [1,11]

Материал	Мощность, Вт	Давление, Па	Газ	Потенциал смещения, В	Скорость травления, нм/мин	Анизотропия	Селективность
1	2	3	4	5	6	7	8
Si	700	$2{,}6\cdot10^{-2}-1{,}2\cdot10^{-1}$	I_2+SF_6	–75 (13,56 МГц)	0–400	1–0,75	5–10 (Si/SiO_2)
	700	$2{,}6\cdot10^{-2}-1{,}2\cdot10^{-1}$	Br_2+SF_6	–75 (13,56 МГц)	50–1500	1–0,5	7–10 (Si/SiO_2)
	700	0,13	Cl_2+SF_6	–75 (13,56 МГц)	200–1500	1–0,5	10–12 (Si/SiO_2)
	700	$2{,}6\cdot10^{-2}$–$1{,}2\cdot10^{-1}$	Cl_2+Br_2	–75 (13,56 МГц)	0–200	~1	до 28 (Si/SiO_2)
	300	$5\cdot10^{-2}-2\cdot10^{-1}$	SF_6+CCl_4	–100 ÷ +25 (постоянное напряжение)	30–90	—	—
	300	$5\cdot10^{-2}$–$2\cdot10^{-1}$	SF_6+Ar	–100 ÷ +25 (постоянное напряжение)	60–120	—	~12 (Si/SiO_2)
Поли–Si	200–1000	$6{,}5\cdot10^{-2}$	Cl_2	–10 ÷ –20	20–50		—
	300	$1{,}3\cdot10^{-1}$	Cl_2	–150 ÷ –200	85	Высокая	18 (поли–Si/SiO_2)
	1000	$6{,}5\cdot10^{-2}$–$4\cdot10^{-1}$	Cl_2	—	180–320	0,95	100–260 (поли–Si/SiO_2)

Окончание табл. 2.2.

1	2	3	4	5	6	7	8
SiO_2	60	$6{,}7 \cdot 10^{-2}$	CF_4	0–125 (амплитуда 800 кГц)	10–30	—	1,4 (SiO_2/Si)
	60	$6{,}7 \cdot 10^{-2}$	C_3F_8	0–125 (амплитуда 800 кГц)	0–40	—	4,0 (SiO_2/Si)
	700	$2{,}6 \cdot 10^{-2}$–$1{,}3 \cdot 10^{-1}$	SF_6+I_2, (Br_2, Cl_2)	–75 (13,56 МГц)	5–150	—	0,1–0,2 (SiO_2/Si)
	1400	$1{,}3 \cdot 10^{-1}$–1,4	C_3F_8 C_3F_8+H_2 C_3F_8+He	0–100 (13,56 МГц)	50–350 0–30 260–370	Высокая — —	1,3–9,0 (SiO_2/Si) 1,0–3,0 (SiO_2/Si) 1,0–2,1 (SiO_2/Si)
W	600	$3 \cdot 10^{-3}$–$3 \cdot 10^{-2}$	SF_6	–70 (постоянное напряжение)	0–50	~1	—
Фоторезист	400–1000	$5{,}3 \cdot 10^{-2}$–$6{,}7 \cdot 10^{-1}$	O_2	0 ÷ –300	200–900	—	—
Полиимид	400–1000	$5{,}3 \cdot 10^{-2}$–$6{,}7 \cdot 10^{-1}$	O_2	0 ÷ –300	50–200	—	—
	1400–1500	$1{,}5 \cdot 10^{-1}$–2,0	O_2+CF_4	0<–70 (13,56 МГц)	100–1500	Высокая	Высокая (PI/Si_3N_4) Высокая (PI/Si)
InP	250	$1{,}3 \cdot 10^{-1}$	CH_4+H_2+Ar	0 ÷ –200	5–35	—	—
	50–300	$1{,}3 \cdot 10^{-1}$–2,6	CH_4+H_2+Ar	–88 ÷ –329	10–100	—	—
GaAs	50–300	$1{,}3 \cdot 10^{-1}$–2,6	CCl_2F_2+O_2	–88 ÷ –329	10–80	—	—
	400	$1{,}3 \cdot 10^{-1}$	CH_4+H_2+Ar	0 ÷ –40	25	—	—
Al–Si–Cu	—	1,5–2,6	Cl_2+BCl_3	ВЧ–смещение	650–850	—	2,5–3,1 (Al/резист)

Уникальные характеристики этого метода, такие, как независимое регулирование параметров процесса, возможность изменения угла падения пучка, совместимость с аналитической аппаратурой для изучения поверхности, позволяют использовать его для травления новых структур, материалов, плохо поддающихся обработке другими методами, а также для достижения лучшего понимания механизмов всех ионно-стимулированных процессов травления.

При ***реактивном ионно-плазменном травлении (РИПТ)*** обрабатываемые изделия находятся в контакте с плазмой СВЧ разряда и размещаются, как правило, на электроде, подключенном к источнику СВЧ, ВЧ, НЧ либо постоянного напряжения. Возможно также их расположение в зоне разряда на заземленном подложкодержателе [12]. Удаление материала происходит как за счет физического распыления ускоренными ионами химически активных газов, так и в результате химических реакций между свободными атомами и радикалами, образующимися в газоразрядной плазме, и поверхностными атомами подвергаемого травлению материала. Газоразрядная плазма стимулирует процессы, происходящие и в газовой фазе, и на поверхности твердого тела. При этом физическое распыление активирует поверхность материала, повышая скорость химических реакций, которые в свою очередь ослабляют химические связи поверхностных атомов, увеличивая тем самым скорость их физического распыления. Эти процессы отличаются высокой степенью равномерности обработки по пластине – 96 – 97 %, более высокими по сравнению с обработкой в плазме ВЧ либо НЧ разряда скоростями травления, возможностью селективного управления ходом процесса за счет изменения параметров сигнала, подаваемого на подложкодержатель-электрод.

Достоинством РИПТ также является возможность точного и анизотропного воспроизведения элементов с малыми размерами для создания плотноупакованных структур. Однако на вертикальных стенках рельефа, обычно получающихся при РИПТ, толщина металлических пленок, нанесенных испарением или распылением, значительно уменьшается (на 50% и более). Кроме того, появляется возможность увеличения напряжений в металле и его растрескивания на прямых углах при входе в контактное окно и на его дне. Поэтому профиль контактного окна желательно иметь наклонным. Оптимальной представляется величина 60–70^{o}, выбранная исходя из электрических характеристик и соображений экономного использования поверхности, а сглаженные края в верхней части и у дна окна позволяют

уменьшить проблемы, связанные с напряжениями и растрескиванием металлических пленок.

Удаление поверхностных слоев при ***ионно-лучевом травлении (ИЛТ)*** осуществляется в результате физического распыления энергетическими ионами инертных газов или ионами, которые химически не реагируют с обрабатываемым материалом. При ИЛТ поверхность обрабатываемого материала не контактирует с плазмой и последняя используется только в качестве источника ионов, осуществляющих процесс травления.

Ионы генерируются в разряде в отдельной «ионной пушке», фокусируются и ускоряются (с малым разбросом по энергии) по направлению к обрабатываемому образцу, который находится в вакууме 10^{-2}–10^{-4} Па и может устанавливаться на охлаждаемом держателе с тем, чтобы при травлении его поверхность не сильно нагревалась. Образец может быть расположен под любым углом по отношению к ионному пучку. Для компенсации положительного объемного заряда пучка в него подается поток электронов, так что никаких нежелательных эффектов зарядки образца не происходит.

Эффективность реализации ИЛТ зависит от оптимального выбора режимов всех составляющих стадий этого процесса. Основными стадиями ИЛТ являются генерация ионов, распространение пучка ионов в вакууме и взаимодействие пучка ионов инертного газа с поверхностью обрабатываемого материала. Процессы ИЛТ реализуются с помощью ионных источников различной конструкции, использующих в качестве рабочих газов H_2, He, Ar. Давление газов поддерживается в диапазоне $0{,}133$–$1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па. Использование СВЧ разрядов позволяет эффективно формировать пучки ионов с энергией 10 – 100 эВ с большими поперечными сечениями (диаметром до 300 мм) различной конфигурации (круглые, овальные, кольцевые, прямоугольные, Н-образные и т.д.). При этом степень ионизации достигает 30% и выше, а концентрация электронов n_e во много раз (более 100) превышает критическую [13].

ИЛТ находит практическое применение еще в нескольких областях помимо микроэлектроники, причем основным направлением является создание СБИС на цилиндрических магнитных доменах. Кроме того, ИЛТ используется при изготовлении приборов на основе поверхностных акустических волн, оптических компонентов и тонкопленочных приборов.

ИЛТ является методом анизотропного травления с очень высоким разрешением, который обеспечивает хорошую равномерность обработки, воспроизводимость скорости и внесение минимальных загрязнений. К недостаткам метода относятся низкие скорость и селективность травления и

возможность радиационного повреждения приборов при непосредственном травлении чувствительных к облучению полупроводника или границы раздела.

Увеличение выхода годных изделий за счет использования ИЛТ определенных, нечувствительных к облучению слоев может быть получено и для других типов СБИС. Оно уже нашло широкое применение при изготовлении ИС средней .и высокой .степени интеграции на GaAs, а при переходе к СБИС на GaAs ионно-лучевое травление, по-видимому, будет .играть еще более важную роль.

В основе процессов ***радикального травления (РТ)*** лежат гетерогенные химические реакции, происходящие на границе двух фаз – твердой и газообразной, между свободными атомами и радикалами, образующимися при диссоциации молекул рабочего газа в низкотемпературной плазме газовых разрядов, и активными центрами обрабатываемого материала, представляющими собой поверхностные атомы со свободными валентностями. Обрабатываемый материал при РТ находится в зоне, отделенной от плазмы перфорированным металлическим экраном, магнитным полем, расстоянием или другими способами. Такое разделение области плазмы (разрядной области) и области, в которой размещен обрабатываемый материал (реакционной области), не позволяет ионам и электронам достигать поверхности материала и, в то же время, практически не создает преграды для реакционно-способных незаряженных частиц, которые, достигая поверхности обрабатываемого материала, вступают с ним в химическую реакцию с образованием стабильных летучих соединений, удаляемых из реакционной зоны в результате ее непрерывной откачки. В качестве примера на рис. 2.1 показана только одна из реакций диссоциации в плазме применительно к травлению в четырехфтористом углероде. Более подробно эти процессы описаны в [14].

РТ с помощью плазмы СВЧ разряда в реакторах с потоком газа подвергаются лишь материалы, образующие летучие соединения с радикалами, такие, как кремний и его соединения, молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, тантал и титан. В промышленности реакторы высокого давления с потоком газа применяются в основном для травления поликристаллического кремния и нитрида кремния на подслое диоксида кремния, так как при отсутствии заряженных частиц и малом поступлении тепла от плазмы достигается высокая селективность травления. Ограниченное поступление тепла из зоны активации в зону обработки способствует также высокой устойчивости фоторезистивных масок и стабильности температуры пластин. Процессы реализуются при низких температурах подложек (310–370 К) и характеризуются отсутствием

радиационных повреждений и деградации электрофизических параметров обрабатываемых структур.

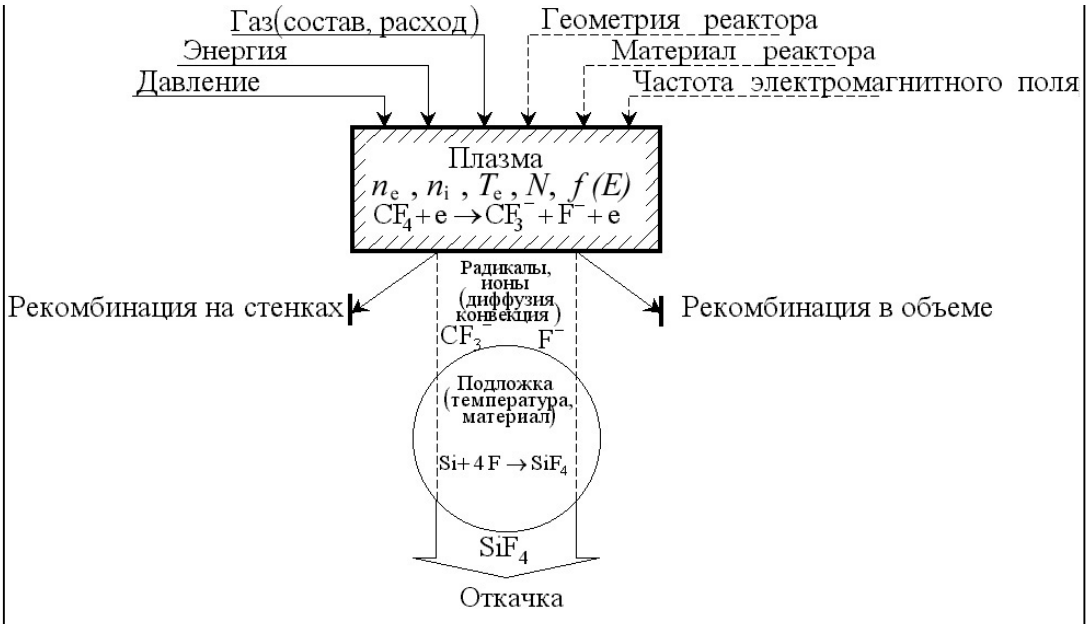


Рис. 2.1. Схема процесса радикального травления

При принудительном подогреве пластин до 470–525 К, наоборот, наблюдается эффективное удаление фоторезистивных слоев (до 2 мкм/мин) в потоке активированного кислорода [15,16]. Этому методу удаления фоторезиста сейчас уделяется особое внимание, так как вследствие незначительного воздействия заряженных частиц возможно удаление масок с тонких диэлектрических слоев без их пробоя, что особенно важно при изготовлении ИМС с уровнем интеграции 1–64 Мбит.

Альтернативный метод удаления фоторезиста – обработка его озон-кислородной смесью. Озон синтезирует в разряде в потоке кислорода, который затем направляют на обрабатываемую поверхность [17]. Этому методу присущи: высокая скорость и отсутствие потребности в создании вакуума; меньшие затраты; механическое воздействие струи, повышающее полноту очистки; отсутствие эффекта аморфизации поверхности полупроводника и появление поверхностных состояний.

В основе СВЧ ***плазменного травления (ПТ)*** лежат активируемые излучением плазмы, электронами и ионами гетерогенные химические реакции между свободными атомами и радикалами и поверхностными атомами обрабатываемого материала. В отличие от РТ обрабатываемый материал при этом находится непосредственно в зоне плазмы или же на электродах и подложкодержателях, соприкасающихся с плазмой. Свободные атомы и радикалы вступают в реакцию с поверхностными атомами материала и,

взаимодействуя с ними, образуют летучие соединения, в то время как излучение плазмы, электроны и ионы активируют эти реакции, существенно увеличивая скорость их протекания. Обрабатываемая поверхность находится под отрицательным "плавающим" потенциалом по отношению к плазме. Однако эта разность потенциалов между плазмой и обрабатываемой поверхностью не может обеспечить заряженным частицам энергию, необходимую для эффективного физического распыления, поскольку даже при энергии 100 эВ коэффициент распыления составляет 0,1 атом/ион. В то же время энергия ионов, электронов и фотонов достаточна для разрушения химической связи между поверхностными атомами материала, активации химических реакций и стимулирования процессов десорбции образующихся продуктов, что вызывает увеличение скорости травления. СВЧ плазменное травление реализуется в реакционно-разрядных камерах больших объемов [18–20], разработанных специально для обработки кремниевых пластин диаметром 150 и 200 мм, при этом конструкции разрядных систем ориентированы на проведение процессов поштучной обработки с целью формирования рисунка в нанесенных пленках, глубинного травления материала пластины и т.д.

Основная проблема для реакторов с низким вакуумом (70–1300 Па) –это невысокая анизотропия травления ($v_{\text{норм}}/v_{\text{бок}} = 2-3$) из-за химического характера травления радикалами с неупорядоченным по направлению движением. Поэтому такие установки используют для размерного травления при изготовлении микросхем степени интеграции до 64–256 К, а при большей степени интеграции – только для мягкого селективного дотравливания слоев.

Хорошие технические показатели имеют процессы групповой обработки подложек в объеме плазмы СВЧ разряда при удалении фоторезистивных и полимерных покрытий [21,22]. Скорость удаления достигает нескольких десятых микрометров в минуту. Процессы характеризуются высокой производительностью и экологической безопасностью.

При ***радиационно-стимулированном травлении (РСТ)*** *с*тимуляция процессов травления материалов может осуществляться потоками ионов, электронов и излучений (инфракрасным, видимой области, ультрафиолетовым и рентгеновским) [23]. При этом поток стимулирующего воздействия и поток частиц, производящих травление, генерируются независимо друг от друга и подаются к обрабатываемой поверхности. При такой организации процесса травления повышаются и количественные, и качественные показатели процесса. Так, например, в [24] предлагается способ, значительно повышающий

скорость травления GaAs. Подложка GaAs с маской размещается в камере обработки на вращающемся держателе. С камерой обработки соединены камеры генерации плазмы и генерации ионов. В камеру генерации плазмы до определенного давления напускается Cl_2 и подается СВЧ мощность. Под воздействием электронного циклотронного резонанса генерируется плазма. Путем подачи напряжения на вытягивающий электрод пучок ионов Cl^+ направляется в камеру обработки на подложку. Одновременно в камере генерации ионов создаются ионы Ar^+, которые также направляются на подложку. Ионная бомбардировка приводит к образованию в подложке аморфного слоя толщиной 20–30 нм. При таком способе подачи ионов Ar^+ и Cl^+ на подложке не образуются продукты, препятствующие быстрому травлению, и подложка не загрязняется. Метод травления***, стимулированный нейтральным лучом (NBA)***, позволяет полностью исключить наведенный на поверхности электрический заряд [25]. В этом процессе нейтральные радикалы CF_x (x=1–3), генерированные в HF_3 плазме, и нейтральный луч одновременно действуют на слой SiO_2. Нейтральный луч с энергией несколько сотен электрон-вольт получается из ионного луча с помощью реакций обмена зарядами.

2.2. Получение микроразмерных слоев на поверхности твердого тела

Плазменные СВЧ разрядные устройства могут быть использованы для осаждения пленок металлов, сплавов, диэлектриков, полупроводников, сверхпроводников, выращивания эпитаксиальных пленок.

Плазменное осаждение из парогазовых смесей (ПГС) позволяет формировать пленки при очень низкой температуре подложки. Это достигается за счет реакции между газами в тлеющем разряде, который обеспечивает основное количество энергии, необходимой для протекания реакции. Температура образца поддерживается в пределах 370 – 670 К. Чтобы избавиться от радиационных нарушений, осаждения полимеров и образования побочных продуктов реакции. В устройствах для осаждения пленок из газовой фазы плазму, возбуждаемую с помощью СВЧ разряда, используют только для диссоциации исходного продукта, не допуская ее присутствия в рабочем объеме реактора. В разрядную камеру подается инертный газ, а реактивный газ поступает в пространство перед подложкой (камеру перезарядки). В камере перезарядки происходит обмен заряда между газами и формируется вторичный поток плазмы, который транспортируется к подложке и осаждается на ней в виде пленки определенного состава.

Этот метод пригоден для формирования пленок с использованием практически любых материалов. Исходные реагенты подбирают по свойствам их паров – важны достаточно высокое давление паров, определенная температура подложек, чистота используемых реагентов, от которой в первую очередь зависит чистота формируемых пленок, а также возможность утилизации продуктов реакции. Физические свойства пленок SiO_2, полученных этим методом при температуре, близкой к комнатной, идентичны свойствам термического оксида SiO_2, полученного при 1000°С [11]. Кроме того, при использовании плазмы СВЧ разряда обеспечивается резкая граница раздела между диэлектриком и полупроводником с низкой плотностью фиксированного заряда и высокое напряжение пробоя ($5 \cdot 10^6$ В/см), а также возможно перед осаждением слоя проводить очистку пластины ионами инертного газа, подавая на нее отрицательное напряжение смещения.

Плазмохимическим методом с помощью СВЧ разряда можно осаждать большое число неорганических и органических соединений – SiO_2, Si_3N_4, Si_xN_Y, аморфный кремний, Cd, GeO_2 , B_2H_3, Ti_xO_y, Sn_xO_y, Fe_2O_3, гексаметилдисилоксан и т.д. на поверхности различной формы. Так, в частности, СВЧ плазменное осаждение диэлектрических пленок на металлические поверхности с малым радиусом кривизны может быть использовано для изоляции проводников различных датчиков, работающих в агрессивных и химически активных средах, для пассивации различных металлических поверхностей, а также при изготовлении волоконно-оптических заготовок с различными показателями преломления по их сечению и протяженных изделий с малым радиусом кривизны. Предложен и технически реализован способ СВЧ плазменного осаждения диэлектрических пленок Si_3N_4 или SiO_2 на металлические поверхности [26], включающий синтез их в скрещенных потоках плазмообразующего и кремнийсодержащего газов вблизи (или на) нагретой ИК излучением до 80 – 200°С обрабатываемой поверхности, причем поток ИК излучения должен быть направлен навстречу плазменному потоку. Для получения равномерных покрытий на протяженных изделиях с малым радиусом кривизны изделия располагают перпендикулярно плазменному потоку и вращают вокруг своей продольной оси. Полученные экспериментально на металлических поверхностях с малым радиусом кривизны ($r \leq 0{,}1$ мкм, иглы) пленки SiO_2 и Si_3N_4 разной толщины (0,8-3,0 мкм) равномерно покрывали поверхность металла, в том числе и поверхность острия, были плотные, без пор.

Наиболее широкое применение для реализации этих процессов получили СВЧ разрядные системы с ЭЦР возбуждением плазмы (табл. 2.3). Существенные результаты в области практического использования ЭЦР источников для нанесения тонкопленочных слоев имеют японские фирмы - изготовители полупроводниковых приборов. Так, в низкотемпературной технологии изготовления МОП БИС фирмы NTT предусмотрено создание самосовмещенного затвора со слоем двуоксида кремния толщиной 400 нм, выращиваемым при температуре 50-150 ^{0}C ионно-плазменным осаждением из парогазовой смеси (ПГС) с помощью ЭЦР источника [27]. Процесс осаждения SiO_2 производится в смеси SiH_4 с кислородом и аргоном при низком давлении 10^{-1} – 10^{-3} Па при подаче на подложку ВЧ напряжения смещения частотой 13,56 МГц для обеспечения процесса планаризации пленки. После нанесения диоксида не требуется никакой дополнительной термообработки, что позволяет изготавливать по этой технологии мелкие переходы истока и стока (с глубиной залегания примерно 0,15 мкм) и очень тонкий слой подзатворного диоксида (8 нм). Это, в свою очередь, способствует подавлению эффекта короткого канала, а также дает возможность применять алюминиевый электрод для уменьшения времени распространения сигнала в межсоединениях. В качестве межуровнего диэлектрика в схеме используется аналогично выращенный слой диоксида кремния. По этой технологии изготовлены образцы МОП-транзисторов, результаты испытаний которых подтвердили пригодность предлагаемой технологии для изготовления новых поколений МОП СБИС. Фирмой NTT также разработан аналогичный низкотемпературный метод осаждения пассивирующих пленок Si_3N_4 , при котором вместо O_2 в ПГС вводится N_2. Основное достоинство этого метода – возможность выращивания слоев без нагрева подложки, что позволяет шире применять пленки Si_3N_4 , в которых меньше включений атомов водорода, чем в пленках, выращенных традиционным ионно-плазменным методом. В результате снижается пороговое напряжение изготавливаемых приборов и исключается деградация их электрофизических параметров.

При проведении процессов плазменной полимеризации СВЧ разряды являются более эффективными источниками радикалов и ионов [11], чем широко используемые разряды постоянного тока и ВЧ. И, как следствие этого, они позволяют проводить процессы с более высокими скоростями, обеспечивая большую производительность оборудования.

Таблица 2.3

Режимы осаждения пленок в СВЧ ЭЦР реакторах [1]

Материал пленки	Мощность, Вт	Давление, Па	Температура подложки, °C	Скорость роста, нм/мин	Газ	Расход газа (соотношение расходов), $см^3$/мин
SiO_2	50–300	$2{,}7 \cdot 10^{-2}$	50–150	15–40	O_2 (в плазму) SiH_4 (к подложке)	—
	400–650	$10^{-2} - 1$	30–200	10–70	O_2 (в плазму) SiH_4 (к подложке)	(2,2:1)
	300–500	$1{,}2 \cdot 10^{-1}$	25–300	—	O_2 (в плазму) SiH_4 (к подложке)	6–30 10–15
Si_3N_4	100–300	$2{,}7 \cdot 10^{-2}$	50–150	20–30	N_2 (в плазму) SiH_4 (к подложке)	—
	300–500	$5{,}3 \cdot 10^{-2}$ – $1{,}6 \cdot 10^{-1}$	25–300	—	N_2 (в плазму) SiH_4 (к подложке)	10–30 6–15
Si	—	$2{,}7 \cdot 10^{-2}$	50–150	20–30	Ar (в плазму) SiH_4 (к подложке)	—
α–Si	500	$6{,}7 \cdot 10^{-1}$–20	50–150	35–70	Ar (в плазму) SiH_4 (к подложке)	(4:1)
α–Si:H	50–350	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$ – $2{,}7 \cdot 10^{-1}$	<60	30–90	SiH_4 (к подложке)	4–30
	200	$4 \cdot 10^{-2}$	Без подогрева	—	Ar (в плазму) SiH_4 (в плазму)	2 3
GaN AlN	10–120	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$ – $1{,}3 \cdot 10^{-2}$	400–600	—	N_2 (в плазму) Ga, Al (пары к подложке)	3

Получаемые при этом пленки имеют хорошее значение величины относительной диэлектрической проницаемости (на уровне 2,5 и ниже) и удовлетворительное содержание примеси фтора (порядка 18-30 %).

С использованием ЭЦР СВЧ вакуумно-плазменных источников разработаны процессы осаждения графитовых и алмазоподобных углеродных пленок (АПП) из различных плазмообразующих сред: паров этилового спирта, ацетилена, метана с добавками водорода, кислорода и без них.

В зависимости от используемых режимов генерации плазмы получены алмазоподобные пленки с широким диапазоном механических и электрофизических свойств: величина удельного сопротивления пленок изменялась от 10 до 10^7 Ом·м, а показатель преломления – от 1,4 до 2,5; диэлектрическая проницаемость составляла 2–8. Большие значения этого параметра соответствуют характеристикам природного алмаза.

Ионно-плазменное распыление (ИПР). При осаждении тонких пленок материал, который должен напыляться, используется в качестве катода мишени в системе с тлеющим разрядом в инертном газе (Ar или Xe), кислороде, азоте, инициируемым СВЧ разрядом в режиме электронного циклотронного резонанса при давлении 1 – 10 Па и при величине напряжения на катоде в несколько киловольт. Подложка, на которую нужно осадить пленку, располагается на аноде. Положительные ионы газа, создаваемые в разряде, ускоряются по направлению к катоду и достигают его с большой энергией, возрастание которой происходит в прикатодной области. В результате ионной бомбардировки материал с катода распыляется главным образом в виде нейтральных атомов, но частично и в виде ионов, попадающих в область СВЧ разряда. Распыленное вещество конденсируется на всей окружающей площади, в том числе на подложках, расположенных на аноде. Композиционный состав и микроструктура получаемых пленок могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от используемой газовой смеси и энергии осаждаемых частиц.

При реактивном распылении происходит химическое взаимодействие материала на поверхности мишени с химически активной плазмой или взаимодействие атомов мишени, осажденных на поверхности подложки. Осаждение пленок оксида или нитрида кремния осуществляется путем распыления кремниевой мишени в среде O_2 или N_2.

В случае реактивного распыления Ta и Al в среде Ar + O_2 получаются высококачественные пленки Ta_2O_5 и Al_2O_3, имеющие разброс коэффициента преломления на пластинах диаметром 150 мм не более 0,01 при неравномерности пленки по толщине 5%.

Распылением в атмосфере Ar получают пленки металлов с ровной зеркальной поверхностью и хорошей адгезией к подложке. Энергия ионов, бомбардирующих подложку, составляет $(1,6 – 4,8)\cdot 10^{-18}$ Дж (10–30 эВ) и зависит от СВЧ мощности и давления рабочего газа. С помощью ЭЦР устройства с кольцевой мишенью были без последующего отжига получены ВТСП пленки Y – Ba – Cu – O с T_c = 73 K [28]. На мишень подавалось ВЧ-напряжение смещения с частотой 13,56 МГц (ВЧ мощность на мишени 700 Вт). Температура подложки в процессе нанесения составляла 650 ^{0}C, рабочее давление – 0,02 Па. После нанесения на подложку пленки сначала охлаждали в атмосфере азота со скоростью 100 ^{o}C / мин до температуры 400 ^{0}C, а затем на воздухе со скоростью 50 ^{0}C / мин до комнатной температуры.

Таким образом, катодным распылением с использованием СВЧ разряда получают проводящие (металлические), диэлектрические (оксидные, нитридные), силицидные и другие пленки, характеризующиеся большой прочностью сцепления с подложкой и высокими электрофизическими показателями. Улучшение свойств пленок по сравнению с широко распространенными способами термического испарения в вакууме и ионного распыления может быть связано с воздействием плазмы при ЭЦР и ионной бомбардировки, что ведет к повышению скорости распыления мишени и интенсификации реакций формирования пленочного покрытия.

СВЧ плазменные технологии используются как в автоэпитаксиальных (выращивание кремния на кремнии) [29], так и в гетероэпитаксиальных (выращивание слоя δ-GaN_YAs_{1-Y} на подложке из GaAs [30]) процессах. Формирование структур производится при невысоких температурах (400-600 ^{o}C) и давлениях $6,5\cdot 10^{-3} – 1,3\cdot 10^{-2}$ Па. Качество получаемых структур не уступает по свойствам пленкам, выращенным методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

2.3. Модификация структуры поверхностных слоев твердых тел

Наиболее общим применением ***ионной имплантации*** в случае использования в качестве источников ионов СВЧ разряда [27,31] является процесс ионного легирования кремния при изготовлении приборов. В качестве легирующей примеси используются ионы бора, индия, фосфора, мышьяка с энергией 3–500 эВ, имплантируемые в приповерхностную область кремниевой подложки на глубину 10–100 нм. Получение ионных пучков примесных элементов осуществляется путем ионизации паров твердых материалов, помещенных в печь, сообщающуюся с ионизационной камерой. Нужную

концентрацию легирующей примеси в кремнии в диапазоне 10^{14}–10^{21} $см^{-3}$ получают после отжига (нагрева до выбранной температуры в интервале 870–1270 К). Высокоинтенсивные пучки ионов кислорода применяются для формирования скрытого слоя SiO_2 методом SIMOX (Separation by Implanted Oxygen) [25]. Используемый для этих целей СВЧ ионный источник должен обладать следующими свойствами:

1) высокой плотностью тока порядка 100 мА/см² и высокой интенсивностью экстрагирования, по крайней мере 100 мА/см², через одно – или многоапертурную оптику с сечением порядка 1 см²;

2) высокой стабильностью луча и большим временем эксплуатации;

3) большим отношением O^+/O_2^+ порядка 80%.

Сравнительный анализ микроволновых источников и источников типа дуопигатрон для имплантации кислорода, проведенный в [32], показал, что микроволновые источники обладают лучшей стабильностью, большим соотношением O^+/O_2^+ и лучшей эффективностью. Более того, отсутствие газа – носителя аргона, необходимого для надежной работы дуопигатрона, улучшает качество работы ускорителя.

Наряду с ионно-лучевой имплантацией СВЧ разряды используются в процессах плазменно-ионной имплантации, основанных на приложении к подложке отрицательных импульсов высокого напряжения, обеспечивающих вытягивание ионов из плазмы и ускорение их по направлению к подложке [33]. Метод плазменно-ионной имплантации, называемый еще методом ионной имплантации погружением в плазму, служит для упрощения процесса обработки и обеспечения объемного внедрения ионов в твердый материал при температуре, близкой к комнатной. Один из вариантов реализации этого метода описан в [34] и состоит в следующем.

Исходный материал для последующего формирования ионного потока помещается в микроволновую камеру и испаряется лазерным лучом для создания газовой плазмы. В результате диффузионного движения плазма окружает объект обработки. К объекту обработки прикладывается импульс напряжения отрицательной полярности такой длительности, чтобы в условиях имеющихся плотности плазмы и расстояния от образца до стенок разрядной камеры избежать возникновения дугового разряда. В результате этого происходит имплантация ионов по всей поверхности объекта обработки. Воздействие лазерного импульса и импульса постоянного тока высокого напряжения периодически повторяется до тех пор, пока не будет достигнута требуемая величина дозы имплантируемого материала.

Основное преимущество плазменно-ионной имплантации перед ионно-лучевой – простота обработки больших площадей или 3-мерных объектов выпуклой формы и возможности использования широкой области ионных энергий от нескольких электронвольт до 250 кэВ.

Плазменное окисление – низкотемпературный процесс, проходящий в вакууме в тлеющем разряде чистого кислорода. Плазма формируется с помощью высокочастотного либо сверхвысокочастотного разряда. При размещении подложки в области с однородной плотностью плазменного разряда и подаче на нее менее положительного потенциала по сравнению с потенциалом плазменного разряда происходит вытягивание из последнего и адсорбция на подложке активных заряженных частиц окислителя (кислорода). Скорость роста оксидных пленок обычно возрастает с увеличением температуры подложки, плотности плазменного разряда и уровня легирования подложки.

Процесс анодного плазменного окисления позволяет выращивать высококачественные оксидные пленки, обладая при этом всеми преимуществами низкотемпературного процесса, а именно: ограничивает перераспределение в предварительно сформированных диффузионных областях и подавляет образование дефектов. Анодным плазменным окислением можно выращивать относительно толстые оксидные пленки (до 1 мкм) при низких температурах (< 870 К) со скоростью роста 1 мкм/ч.

Наибольшее число сообщений о процессах низкотемпературного окисления в кислородной плазме СВЧ разряда относится к плазменному анодированию кремния, окислению тонких металлических (Al, Ta, Ti, Nb) и полупроводниковых (GaAs, Si) пленок. При этом отмечается, что наряду с более высокими скоростями роста пленки, формируемые в СВЧ разряде, отличаются хорошими электрофизическими свойствами. В частности, в работах [35,36] сообщается о получении оксидных пленок на кремнии со следующими параметрами: пробивное напряжение порядка $E_d \approx 3{,}9 \cdot 10^6$ В/см, плотность поверхностных состояний $N_{ss} = 9{,}5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$, относительная диэлектрическая проницаемость в пределах $\varepsilon_{ox} = 3{,}66–3{,}97$. Формирование туннельно-тонких слоев окисленного кремния в объеме кислородной плазмы СВЧ разряда может также проводиться и без подключения подложки к источнику напряжения [37].

Плазменное азотирование и цементация поверхностных слоев материала. В процессах производства изделий электронной техники находит применение азотирование (нитрирование) поверхности Si-подложек [38] и металлических образцов [39] с целью получения нитридных или

оксинитридных слоев. Азотирование проводится как в самом СВЧ разряде в азоте либо смеси N_2 + H_2, так и в послесвечении (т.е. вне зоны разряда). Рабочие режимы процесса (СВЧ мощность, нагрев подложек, давление и расход газа, состав газовой смеси и т.д.) зависят от обрабатываемого материала и конструктивных особенностей газоразрядного устройства. Формируемые этим способом слои имеют ряд преимуществ по сравнению с полученными термическим путем. Так, например, для тонких слоев нитрида или оксинитрида кремния это прежде всего лучшие электрические характеристики пробоя, стабильность зарядовых характеристик слоя при термополевых испытаниях, снижение потенциального барьера для носителей на границе нитрированного диэлектрика с подложкой для уменьшения питающих напряжений РПЗУ с электрическим перепрограммированием.

Характерной чертой ***термического отжига*** в СВЧ полях является то, что в отличие от традиционных методов нагрева, при которых тепловой поток на пластину направляется извне, вызывая при этом значительный градиент температур между нагретой поверхностью и центром пластины, при СВЧ обработке он поступает как бы от «внутреннего» источника тепла, так как пластина нагревается за счет выделения тепла в объеме материала [40].

Исследования по СВЧ отжигу МОП структур с мелкозалегающими переходами и БИС с субмикронными размерами показали эффективность данного метода нагрева полупроводниковых пластин. Для предотвращения возникновения разряда СВЧ нагрев проводится, как правило, при давлении не выше 1 Па в атмосфере азота или аргона [41], при этом в зависимости от режимов обработки время выхода температуры подложки на стационарное значение составляет 1–2 мин.

2.4. Применение СВЧ энергии в технологии микроэлектронных изделий

Применение СВЧ энергии в производстве микроструктур не ограничивается процессами плазменной очистки, травления, модификации поверхностных слоев материала, а также нанесением на его поверхность пленок других материалов. СВЧ энергия также используется в источниках рентгеновского излучения, для термической обработки органических и неорганических маскирующих слоев, в процессах сухого фототермического удаления фоторезистивных пленок, для резки материалов и т.д. Часть из этих процессов находится пока еще на стадии изучения и исследования, а часть прошли опытно-промышленную апробацию и готовы к практическому применению.

В сообщениях о применении СВЧ энергии для сушки и задубливания фоторезистивных пленок при изготовлении ИС на кремниевых подложках [41] и других применений [42] указывается на высокую эффективность этого метода обработки. Сушка слоя фоторезиста в СВЧ поле происходит в основном за счет нагрева подложки до температуры 80–120 °С, в процессе которого тепло передается через весь объем материала, имеющего свойства диэлектрика с потерями.

Температура пластины определяется поглощенной СВЧ мощностью:

$$P_{\text{пот}} \sim E^2 \operatorname{tg} \delta, \qquad (2.1)$$

где E–напряженность электрического поля; tgδ–тангенс угла диэлектрических потерь материала пластины.

Мощность потерь на единицу объема составляет [1]:

$$P = 0{,}287 E^2 f\, \varepsilon'' \cdot 10^{-6}, \text{ Вт/см}^3, \qquad (2.2)$$

где f – частота, МГц; ε''–коэффициент диэлектрических потерь материала [43]:

$$\varepsilon'' = (\tau_{\text{нч}} / \omega)(1/1+\omega\tau) \qquad (2.3)$$

где $\tau_{\text{нч}}$–проводимость полупроводника на низких частотах; ω – угловая частота; τ –усредненное время между столкновениями носителей заряда полупроводника.

Чем выше ε'' и E, тем больше мощность, рассеиваемая в пластине, тем быстрее происходят нагрев подложки и сушка резиста. Устройство для СВЧ нагрева должно обеспечивать высокое значение напряженности электрического поля. Кроме того, взаимодействие между нагреваемым материалом и электрическим полем зависит от направления вектора E по отношению к обрабатываемой поверхности.

При расположении диэлектрической пластины параллельно вектору электрического поля оно втягивается в диэлектрик, в результате чего фазовая скорость и длина волны в диэлектрике становятся меньше, чем в волноводе, заполненном воздухом. Когда длина волны в диэлектрике будет равна длине волны в свободном пространстве, внутри диэлектрика на границе воздух–диэлектрик возникает явление полного внутреннего отражения и большая доля энергии передается в той части, которая заполнена диэлектриком.

Максимальный эффект достигается в случае, если диэлектрик помещен в области наибольшей напряженности электрического поля.

Когда плоскость диэлектрика расположена перпендикулярно электрическому полю, нагрев идет аналогично обычному диэлектрическому нагреву на низкой частоте. Мощность потерь в этом случае [44] составляет:

$$P_{пот}=2\pi f E^2 \varepsilon_0 \varepsilon'_r \operatorname{tg}\delta, \qquad (2.4)$$

где ε_0 –диэлектрическая постоянная; ε'_r –диэлектрическая проницаемость материала.

Основными требованиями, предъявляемыми к устройству для сушки резиста, являются обеспечение равномерности нагрева по всей площади пластины и высокая скорость нагрева. Реальное время обработки должно составлять 20–25 с, а неравномерность сушки ~5%.

СВЧ сушка пригодна лишь для фоторезиста, нанесенного на пластины с высоким поверхностным сопротивлением. Там, где по условиям технологического процесса до первой фотолитографии требуется провести металлизацию поверхности пластин или легирование ее примесью, снижающей поверхностное сопротивление до единиц Ом на квадрат и менее, пластины кремния практически не нагреваются вследствие экранирования их поверхностными слоями с высокой проводимостью. СВЧ сушка обеспечивает равномерное высыхание резиста, а время обработки снижается до секунд. Кроме того, после СВЧ сушки время экспонирования и проявления резиста уменьшается в 1,5–2,0 раза. Это дает возможность повысить производительность процесса на 20%.

Для использования в производстве полупроводниковых приборов при проведении таких процессов, как отжиг эпитаксиальных структур, снятие механических напряжений, вжигание контактов, сушка и полимеризация фоторезиста на подложках из кремния и арсенида галлия разработана установка для термообработки в СВЧ поле "Электроника 502Т" [40]. Установка обеспечивает сокращение продолжительности процесса в 10 – 100 раз; может комплектоваться процессором, позволяющим задавать программу термообработки, последовательность и продолжительность уровней подаваемой мощности.

Удаление фоторезиста – завершающая операция технологического процесса фотолитографии, которая во многом определяет качество выполнения последующих циклов: диффузии, окисления, металлизации. Кроме плазмохимического метода удаления фоторезиста, который рассмотрен выше, СВЧ энергия может быть использована при удалении

фоторезистивной пленки фототермическим методом, результатом которого является окислительная деструкция пленки в кислороде или кислородсодержащих газах. В [45] приведены данные по удалению промышленно используемых фоторезистов PMMA, OMR, CMS, AZ – 1350 J. Удаление фоторезиста осуществлялось при температуре подложки 400 – 430 К в атмосфере кислорода при давлении $6{,}6 \cdot 10^4$ Па и скорости потока 50 л/мин под воздействием ультрафиолетового излучения с плотностью потока энергии 2,4 Вт/см^2, создаваемого СВЧ разрядной лампой, наполненной смесью аргона с парами ртути. В зависимости от режимов обработки и типа фоторезиста время полного удаления пленки составляет 15–30 мин.

Экспонирование фоторезистивного слоя – технологическая операция по формированию защитного рельефа, обеспечивающая перенос изображения с фотошаблона на пластину. Имеются сообщения [46,47] об использовании в качестве источников света при экспонировании ламп СВЧ разрядов низкого давления мощностью от 100 до 500 Вт, интенсивно излучающих в коротковолновой области спектра, что соответствует полосе максимальной чувствительности большинства фоторезистов (300-450 нм). Для этой цели в Nagaya University (Япония) разработан новый вид источника вакуумного ультрафиолета на основе безэлектродного разряда в аргоне при давлении 0,65 Па и величине газового потока 12 см^3/мин. Источник обеспечивает спектр излучения в диапазоне $50 - 110$ нм с потоком фотонов $2{,}5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$ и энергией 13,5 эВ. Излучение в этом диапазоне может быть использовано как для процессов литографии с высоким разрешением, так и для активируемого фотонами осаждения и травления различных материалов [13].

СВЧ разрядные источники используются в технологиях получения высокояркостного луча для проведения процессов ионно-лучевой микролитографии [48]. При этом отмечается, что они обладают малым рассеянием по скоростям ионов до 1эВ в высокоплотном хорошо сфокусированном луче.

Разработан и исследован экспериментальный вариант СВЧ разрядного источника рентгеновского излучения [49], показавший возможность создания на базе СВЧ разряда с ЭЦР источников интенсивного рентгеновского излучения для использования в промышленности и сельскохозяйственном производстве.

2.5. Тенденции развития процессов СВЧ плазменной обработки изделий электронной техники

Анализ конструктивных решений и способов организации процессов СВЧ плазменной обработки материалов показывает, что разработка СВЧ плазменного оборудования для использования в технологических процессах изготовления интегральных схем ведется по двум направлениям. Первое – это разработка оборудования для процессов групповой непрецизионной обработки (плазменная очистка и активирование поверхности подложек, радикальное и плазменное травление, плазмохимическое осаждение тонких пленок и т.д.), проводимой в диапазоне давлений 50–400 Па. Второе направление – создание оборудования для проведения процессов прецизионного индивидуального травления в диапазоне давлений 0,013З–50 Па с целью формирования микрорельефа поверхности с заранее заданными характеристиками.

Существуют два подхода к организации всех процессов обработки подложек с использованием плазмы СВЧ разряда. В одном случае область генерации СВЧ плазмы отделена от рабочей зоны, где находятся обрабатываемые подложки (бесконтактная плазменная обработка). СВЧ энергия в этом случае используется для ионизации и активации газа (т.е. перевода его из нейтрального в активное состояние) с последующим воздействием на обрабатываемую поверхность определенным сортом плазменных частиц. В другом случае плазма генерируется в самой рабочей камере, и подложки находятся с ней в непосредственном контакте.

Примером первого подхода служит травление "вне зоны разряда" в системах с ЭЦР при вынесении подложек на определенное расстояние от зоны разряда, в различного типа ионных источниках, плазмохимическое осаждение из газовой фазы и т.д. В этом случае СВЧ плазма является источником возбужденных ионов, свободных радикалов и электронов, служащих средой, в которой возбуждается плазма, формируемая под действием постоянного напряжения, НЧ или ВЧ поля. Гибридная (комбинированный разряд) плазма используется для воздействия на поверхность образца частицами, отличающимися энергией и составом от находящихся в СВЧ разряде. Второй подход используется в процессах ионно-химического травления в комбинированных (СВЧ+НЧ, СВЧ+ВЧ) разрядах, плазмохимического травления, окисления кремния, модификации поверхности материалов и т.д.

Переход промышленности на обработку кремниевых пластин большого диаметра (200 и 300 мм) ставит задачу значительного увеличения размеров плазмообразующих камер газоразрядных устройств как для контактной, так и

для бесконтактной плазменной обработки. Это вызвано необходимостью равномерной обработки поверхности подложек, что может быть достигнуто, в частности, за счет увеличения диаметров разрядных устройств.

Увеличение габаритных размеров обрабатываемых изделий и повышение требований к качественным показателям процесса обработки требуют поиска новых подходов к организации процессов обработки.

На рис. 2.2 приведена схема, систематизирующая известные в настоящее время технические приемы организации процессов обработки поверхности материалов с использованием газовой плазмы СВЧ разряда. Она показывает насколько разнообразны методы дополнительного внешнего энергетического стимулирования процессов как на поверхности пластины, так и в приповерхностном плазменном слое. Такое воздействие ускоряет протекание плазменных процессов, позволяет эффективно управлять качественным составом и энергетическими характеристиками плазмы вблизи поверхности подложки, способствует достижению более равномерного распределения характеристик плазмы в зоне формирования разряда или обработки подложек, повышает качество процесса за счет введения дополнительного, легко автоматизируемого канала управления процессом обработки.

Такой подход наблюдается при реализации процессов как групповой, так и индивидуальной обработки подложек. Например, для интенсификации процессов радикального травления (удаление фоторезиста, травление SiO_2, Si_3N_4) может быть использован ИК нагрев. В процессах реактивного ионно-плазменного [50,51], реактивного ионно-лучевого [52], ионно-лучевого травления [53], плазмостимулированного парофазнохимического осаждения пленочных материалов [54,55,56], плазменной модификации поверхности [57,58] и т.д. используются постоянное и переменные магнитные и электрические поля различного диапазона частот. В качестве внешних стимулирующих энергетических факторов применяются также различные виды радиационного излучения (ионного, электронного, рентгеновского, фотонного), характеризующиеся специфическими механизмами их воздействия на обрабатываемый материал и процессы в объеме газового разряда.

К примеру, травление с возбуждением и нагревом поверхности связано с поглощением излучения в ИК видимой и УФ областях спектра большинством материалов, применяемых в производстве ИС (что прежде всего относится к металлам). Диоксид кремния сильно поглощает излучение ИК фотонов с λ = 10 мкм. Кремний имеет максимум поглощения при λ = 265 нм. Лазерный

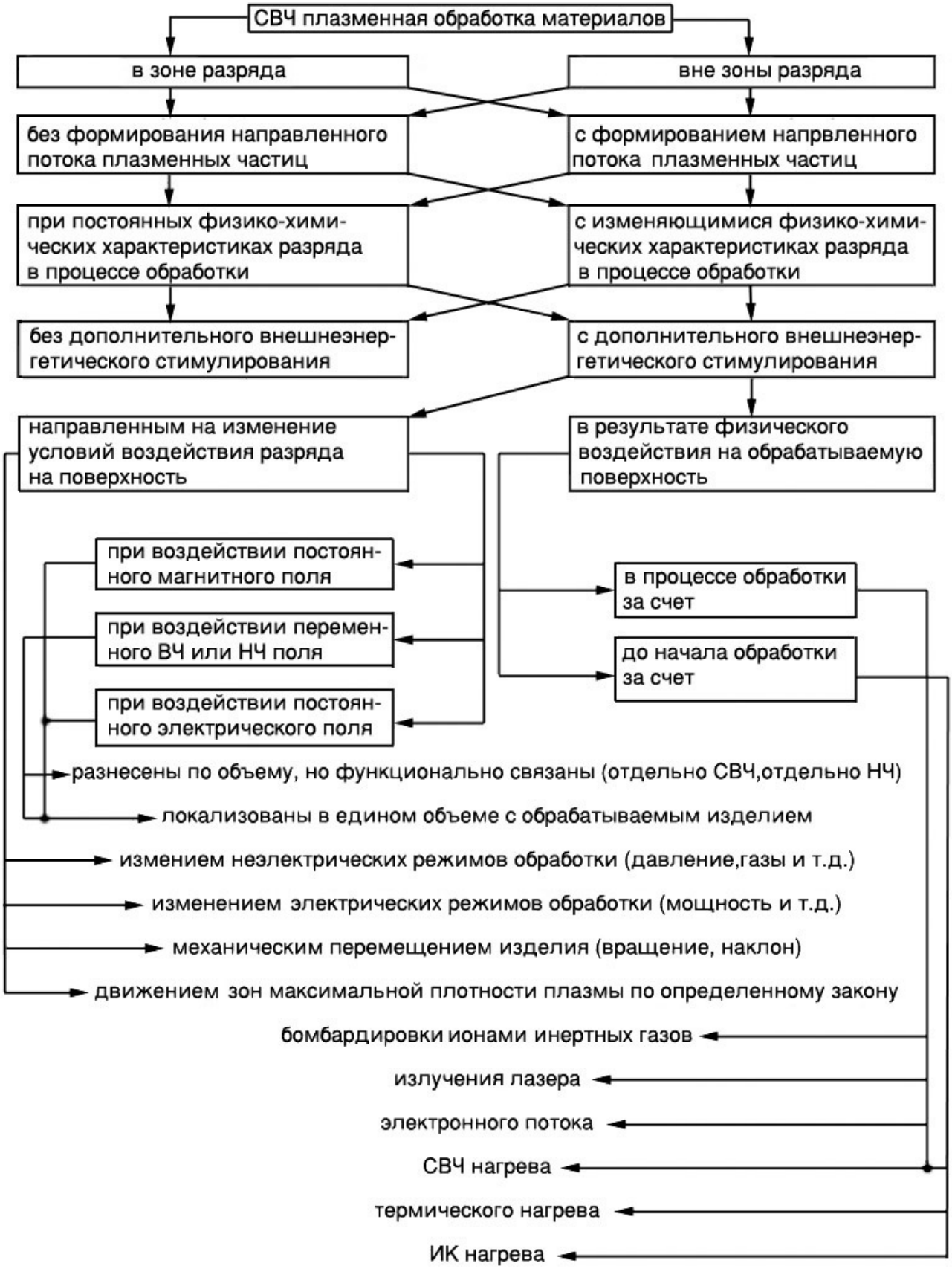


Рис. 2.2. Организация процессов обработки материалов с использованием СВЧ разряда

луч почти всегда вначале взаимодействует с электронной оболочкой атомов поверхности. Как правило, возбуждение поверхности вызывает нагрев подложки, в результате чего резко возрастает скорость травления. Нагрев подложки оказывает определяющее влияние на процесс травления в том случае, когда продукты травления нелетучи (так, большинство галоидов металлов имеют низкое давление паров при комнатной температуре, чем объясняется низкая скорость их плазменного травления). Например, MnZn-феррит практически не травится в плазме, однако при фокусировке луча Ar лазера на поверхности феррита в атмосфере CCl_4 скорость травления достигает 10 мкм/с [59]. Такое значительное различие в скоростях травления (более чем на три порядка) объясняется тем, что плазмохимическое травление – в основном низкотемпературный процесс, в то время как лазерно-стимулированные реакции часто протекают при высоких температурах. Процесс ***лазерно-стимулированного плазменного травления (ЛСПТ)*** заключается в том, что традиционное плазменное травление дополняется лазерным облучением подвергаемого травлению образца. При этом значительно увеличивается скорость травления и существенно уменьшаются радиационные дефекты в результате снижения вводимой в разряд СВЧ мощности. Химически активные частицы при ЛСПТ можно получать в двух процессах: возбуждения и диссоциации молекул химически активного газа под действием фотонного облучения лазера и электронно-ударной диссоциации в тлеющем разряде.

Возникающие при этом химически активные частицы адсорбируются на активных атомов и радикалов или же направленного потока заряженных частиц и вступают в химическую реакцию с атомами поверхностного слоя. При ЛСПТ луч лазера всегда направлен перпендикулярно поверхности обрабатываемого образца. Возникающие при этом термические и фотоэффекты способствуют протеканию химических процессов и десорбции образующихся продуктов реакции. Не менее сложные процессы имеют место и при других видах энергетического стимулирующего воздействия на гетерогенные и гомогенные плазменные процессы и реакции.

Таким образом, для удовлетворения потребности промышленности в обработке подложек большого диаметра и крупногабаритных изделий необходима разработка разрядных камер большого объема, а дальнейшее совершенствование технологических процессов плазменной обработки целесообразно проводить в направлении интенсификации за счет дополнительного внешнего энергетического стимулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

1. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники / Под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.

2. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / А.П. Достанко [и др.]; под ред. А.П. Достанко, Н.К. Толочко. – Минск: Бестпринт, 2005. – 682 с.

3. Технологическое применение низкотемпературной плазмы / Р. Оулет [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.

4. Cleaning of silicon surfaces by NF_3 – added hydrogen and water – vapor plasma down stream treatment / J. Kikuchi [et al.] // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 1. – 1996. – Vol. 35, N2B. – P. 1022–1026.

5. Low - temperature in situ cleaning of silicon (100) surface by electron cyclotron resonance hydrogen plasma / Tae Heung-Sik [et al.] // J. Vac. Sci. and Technol. B. – 1995. – Vol. 13, № 3. – P. 908–913.

6. Surface roughness and defect morphology in electron cyclotron resonance hydrogen plasma cleaned (100) silicon at low temperatures / Hwang Ki-Hyun [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 67, № 24. – P. 3590–3592.

7. Low damage in situ contact cleaning method by a highly dense and directional ECR plasma / Park In Seon [et al.] // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 1. – 1996. – Vol. 35, N2B. – P. 1097–1101.

8. Etching of InP surface oxide with atomic hydrogen produced by electron cyclotron resonance / P.G. Hobstra [et al.] // J.Vac. Sci. Technol. A. – 1995. – Vol. 13, № 4. – P. 2146–2150.

9. Method for improved cleaning of substrate processing systems: пат. 99/03312 WO. МКИ^6 H 05 H 1/00 / Kao Chien – Teh, Littau Karl, Vasudev Anand, Koo Dong Won; Applied Materials, Inc. – №PCT/ US98/ 13980; заявл.10.07.1998; опубл. 21.01.1999.

10. Remote microwave plasma source for cleaning chemical vapor deposition chambers: Technology for reducing global warming gas emissions / S. Raoux [et al.] // J.Vac. Sci. Technol. B. – 1999. – Vol. 17, № 2. – P. 477–485.

11. Гуляев, Ю.В. Микроволновое ЭЦР вакуумно – плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) / Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров // Зарубеж. электрон. техника. – 1997. – № 1. – С. 77–120.

12. Microwave plasma etching apparatus: пат. 4559100 США, МКИ H 01 L 21/306, C 23 F 1/03 / Ninomiya Ken, Nishimatsu Shigeru, Suzuki Keizo, Okudaira Sadayuki; Hitachi, Ltd. – №684299; заявл. 20.12.1984; опубл. 17.12.1985; НКИ 156/345.

13. 10-th International Colloquium: Palais des Congr., Antibes – Juan – les – Pins, France, 11 – 15 Juin , 1995 // Vide: Sci., Techn. et appl. 1995. Suppl. № 275 «CIP'95 Proc.». C. I - XII. – 559 p.

14. Словецкий, Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной фторсодержащей плазме / Д.И. Словецкий // Химия плазмы. – 1983. – № 10. – С. 108–146.

15. Damage reduction in dry resist stripping systems / J. Shi [et al.] // Solid State Technology. – 1995. – Vol. 38, № 10. – P. 75–82.

16. Бордусов, С.В. Высокоскоростное удаление фоторезистивных пленок в послесвечении СВЧ разряда в кислороде / С.В. Бордусов // Электронная обработка материалов. – 2001. – № 6 (212). – С. 80–83.

17. Неустроев, С.А. Плазмохимические процессы микроэлектроники / С.А. Неустроев // Электронная пр-сть. – 1995. – № 4–5. – С. 89–91.

18. Singar, P. New frontiers in plasma etching / P. Singar // Semicond. Int. – 1996. – Vol. 19, № 8. – P. 152–154, 156, 158, 164.

19. Bowles, J.H. A large volume microwave plasma source / J.H. Bowles, D. Duncan, D.N. Walker // Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67, № 2. – P. 455–461.

20. Haiyme, S. The control of the high – density microwave plasma for large – area electronics / Shirai Haiyme, Sakuma Yoshikazu, Uegama Hiroyaki // Thin Solid Films. – 1999. – Vol. 37, № 1–2. – P. 12–17.

21. Мадвейко, С.И. Процесс плазмохимического удаления фоторезистивных пленок в СВЧ плазмохимической установке с резонатором прямоугольного типа / Мадвейко С.В. // Нанотехнологии-2010: материалы Международной научно-технической конференции, Геленджик, Россия, 9 – 24 сентября 2010 / редкол: Б.Г. Коноплев [и др.]. – Таганрог, 2010. – Ч. 1 – С. 227-229

22. Мадвейко, С.И. Исследование условий плазмообразования в разрядной камере СВЧ плазмотрона с аппликатором резонаторного типа / С.И. Мадвейко, С.В. Бордусов, А.П. Достанко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы IV Международной научно–технической конференции, Минск, 19- 21 октября 2009 г. /ФТИ НАН Белоруси; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2009. – Т.2. - С. 56-57

23. Плазменные процессы в производстве электронной техники: в 3 т. / А.П. Достанко [и др.]; под. общ. ред. А.П. Достанко. – Минск: ФУАинформ, 2001. – Т. 2 – 244 с.

24. Способ реактивно – лучевого травления: заявка 60 – 165721 Япония, МКИ H 01 L 21/502. / Сугато Сумио, Асикава Кицу; Когё гидзюцу интё. – № 59–20076; заявл. 08.02.84; опубл. 28.08.85.

25. Wartski, L. Radio frequency, microwave, and electron resonance ion sources for industrial applications: A review (invited) / L. Wartski, C. Schwebel, J. Aubert //Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67, № 3. – P. 895–900.

26. СВЧ - плазменное осаждение диэлектрических пленок на металлические поверхности: пат. 2117070 РФ, МКИ[6] С 23 С 14/06, 14/44. / С.В. Редькин, В.В. Аристов; – №97112303/02; заявл.17.07.97; опубл.10.08.98 // Бюл. № 22.

27. Физика и технология источников ионов / Я. Браун [и др.]; под ред. Я. Брауна. – М.: Мир, 1998. – 496 с.

28. Данилин, Б.С. Устройства со скрещенными полями и перспектива их использования в технологии микроэлектроники / Б.С. Данилин, В.К. Сырчин // Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. Вып. 2 (1619). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1991. – 91 с.

29. Junsi, G Growth of epitaxial silicon film at low temperature using sputtering – type electron – cyclotron resonance plasma / G. Junsi, N. Hiroshi, S. Naofami // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 2. – 1999. – Vol. 38, № 30. – P. L220–L222.

30. Kinetic modeling of microscopic processes during electron cyclotron resonance microwave plasma – assisted molecular beam epitaxial growth of GaN/GaAs – based heterostructures / Z.Z. Bandic [et al.]// Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 68, № 11. – P. 1510–1512.

31. Development of a 2.45 GHz electron cyclotron resonance ion source for ion implanter application / M. Sekiguchi [et al.] // Rev. Sci. Instrum. – 1998. – Vol. 69, № 2. – Pt. 2. – P. 873–839.

32. Characteristics of electron cyclotron resonance plasmas for large area ion source application / Y. Torri [et al.] // Rev. Sci. Inctrum. – 1990. – Vol. 61, № 1. – Pt. 1. – P. 253–259.

33. Surface treatment of pure and alloyed aluminum using a new plasma – based ion implanter apparatus / D. Popovici [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. B. – 1999. – Vol. 17, № 2. – P. 859–862.

34. Low energy heavy ion there – dimensional radiation method: пат. 11195397 Япония, МКИ H 01 J 37/317 / N. Masanobu. – №10031931; заявл. 05.01.1998; опубл. 21.07.1999.

35. Martiret, C. Low – temperature oxidation of Si in a microwave electron cyclotron resonance excited O_2 plasma / C. Martiret, R.A.B. Devine // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 67, № 23. – P. 3500–3502.

36. Takashi, K. Negative ion assisted silicon oxidation in downstream of microwave plasma / K. Takashi, Y. Akihito // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. – 1998. – Vol.35, № 9A. – P. 5028–5032.

37. Electrical properties of thin polyoxides grown at a low temperature using microwave oxygen plasma / C. Saha [et al.] // Semicond. Sci. and Technol. – 1998 – Vol. 13, № 6. – P. 599–602.

38. Bera, L.K. Microwave plasma nitridation of silicon dioxide on strained Si / L.K. Bera, H.D. Baneryec, S.K. Ray // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73, № 11. – P. 1559–1561.

39. Microwave plasma nitriding of pure ion / E. Camps [et al.] // J.Vac. Sci. and Technol. A. – 1999. – Vol. 17, № 4. – Pt. 2. – P. 2007–2014.

40. Гонтарев, Г.Г. Микроволновое технологическое оборудование и приборы / Г.Г. Гонтарев, Б.Н. Глазырин, Г.В. Лысов // Обзоры по электрон. технике. Сер. 1. Вып. 10 (1681). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1992. – 74 с.

41. Method and apparatus for the heat treatment of a plate – like member: пат. 4593168 США. МКИ H 05 B 6/78 / Amada Haruo; Hitachi, Ltd. – № 581268; заявл. 17.02.84; опубл. 03.06.86; НКИ 219/10.58m.

42. Способ изготовления фотошаблонов: пат. 1501756, РФ, МКИ^{6} 6 G 03 F 1/00 / Г.Г. Бунин, В.А. Курмачев, В.И. Мякиненков, В.Т. Николенков. – №430520/21; заявл. 10.09.1987; опубл. 20.02.1996 // Бюл. № 5.

43. Аболтинь, Э. Полупроводник в СВЧ электромагнитном и постоянном магнитном полях / Э. Аболтинь // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1972. – № 5. – С. 76–81.

44. Билько, М.И. Измерение мощности на СВЧ / М.И. Билько, А.К. Томашевский. – М.: Радио и связь, 1986. – 168 с.

45. Ozawa, K. UV resist – stripping for high – speed and damage – free process / K. Ozawa, T. Sto, H. Tahikawa // Extended Abstr. 15 Conf. Solid State Devices and Mater., Tokyo, 30 Aug. - 1 Sept. 1983. – Tokyo, 1983. – P. 125–128.

46. Microlithography techniques using a microwave powered deep UV source / J. Mattehews [et al.] // Proc. Soc. Photo – Opt. Instrum. Eng. – 1983. – P. 172–183.

47. Levine, L.S. Microwave – powered lamp technology for photoimaging / L.S. Levine, M.G. Ury // SME Techn. Pap.1985. N437.

48. Dudnikov, V.G. Review of high brightness ion sources for microlitography / V. G. Dudnikov // Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67, № 3. – Pt. 2. – P. 915–920.

49. Исследование и контроль плазмохимических процессов / Н.К. Юдина [и др.] // Зарубежная электронная техника. – 1980. – Вып. 3 (223). – С. 3–54.

50. Plasma etching device, plasma etching method and plasma cleaning method for plasma etching device: пат. 10294306 Япония, МКИ H 01 L 21/306 /

Hiramatsu Kenji, Komori Hideki, Onishi Hiroshi, Matsumura Tamio ; Mitsubishi Electric Corp. – №09101697; заявл. 18.04.97; опубл. 04.11.98.

51. Plasma processing device: пат. 11026190 Япония, МКИ H 05 H 01/46 / Ishiguro Koji, Setoyama Hidetsugu, Seki Hirobumi, Murakami Hajime; Hitachi Ltd. – №09179637; заявл. 04.07.97; опубл. 29.01.99.

52. Plasma processing device: пат. 10308298 Япония, МКИ H 05 H 01/46 / O. Akinori, I. Masashi, I.Masahide – №09132798; заявл. 07.05.97; опубл. 17.11.98.

53. Microwave electron cyclotron resonance (ECR) ion source with a large, uniformly distributed, axially symmetric, ECR plasma volume: пат. 5506475 США, МКИ^{6} H 05 H 1/10 / D. Alton Geralol. – №216230; заявл. 22.03.94; опубл. 09.04.96; НКИ 315/ 111.41.

54. Effect of interface on the characteristics of functional films deposited on polycarbonate in dual – frequency plasma / J.E. Klembarg – Sapieha [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1997. – Vol. 15, № 3. – P. 985–991.

55. Zarrabian, M. Mass spectrometric investigations on CH_4 plasmas obtained from a dual electron cyclotron resonance – radio frequency discharge / M. Zarrabian, C. Leteinturier, G. Turban // Plasma Sources Sci. Technol. – 1998. – Vol. 7, № 4. – P. 607–616.

56. Lee, Y.H. Plasma enhanced chemical vapor deposition of TiO_2 in microwave – radio frequency hybrid plasma reactor / Y.H. Lee, K.K. Chan, M.J. Brady // J. Vac. Sci. Tecnol. A. – 1995. – Vol. 13, № 3. – P. 596–601.

57. Insulating film, film – forming method and semiconductor device: пат. 11026445 Япония, МКИ H 01 L 21/314 / Kobayashi Kinya, Katou Kiyotaka. – №09175519; заявл. 01.07.97; опубл. 29.01.99.

58. Fluorine – containing silicon oxide film and its manufacture: пат. 11074257 Япония, МКИ H 01 L 21/31 / D.R. Denison, A. Saproo, D.T. Hodul. – №10185052; заявл. 30.06.98; опубл. 16.03.99.

59. Данилин, Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б.С. Данилин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.

ГЛАВА 3
СВЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Использование энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона для электрофизической обработки материалов - актуальное и развивающееся направление. Использование энергии СВЧ-поля позволяет снизить энергозатраты процесса обработки, в ряде случаев улучшить качество готового продукта при термообработке органических и полимерных материалов, использующихся в промышленности и сельском хозяйстве. Интерес к использованию СВЧ-энергии для термообработки материалов обусловлен следующими факторами:

- проникающее действие СВ-излучения в объем материала принципиально отличается от традиционного «конвективно-контактного», что позволяет получить меньшие температурные градиенты и значительно повысить скорость нагрева;
- высокий КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую, выделяемую в объеме нагреваемых тел;
- экологическая чистота технологического процесса, за счет отсутствия вредных выбросов в атмосферу;
- возможность осуществления и практического применения специфически видов нагрева, например избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося;
- простота генерирования и подвода СВЧ-энергии высокого уровня мощности;
- возможность простой механизации и автоматизации технологического процесса обработки;
- возможность безинерционного прогрева всего объема материала.

При разработке установки и системы, помимо обеспечения заданного распределения СВЧ-поля в объеме материла, ставится задача снизить стоимость технологической системы и упростить ее конструкцию, сделать сборку, монтаж и эксплуатацию наиболее удобной и безопасной. Данная задача может решаться применением блочно-модульной конструкции установки, использованием специальных антенн-облучателей, компоновкой магнетронов и источников питания в модули, уходом от применения одного дорогостоящего магнетрона, запитывающего облучающую систему антенн, к использованию многомагнетронной системы из недорогих, широко применяемых в бытовой

микроволновой аппаратуре, источников СВЧ-излучения, снабжением установок системой защиты обслуживающего персонала. Процесс СВЧ-обработки может быть легко автоматизирован путем применения компьютерной или микропроцессорной системы управления, в которую может быть заложена программа технологического процесса с учетом свойств обрабатываемого материала.

Разработка новых устройств, установок и технологических систем, обеспечивающих качественную обработку материалов энергией СВЧ-поля и приемлемое распределение СВЧ-поля в зоне обработки, на поверхности и в объеме обрабатываемых материалов – сложная задача, лежащая на стыке нескольких наук - электродинамики и тепломассобмена. Решение указанной задачи на современном этапе возможно с привлечением методов компьютерного моделирования при разработке данных установок, при расчете технологических камер и СВЧ-устройств. Современные программные средства позволяют получать распределение напряженности электромагнитных полей в моделируемой структуре с достаточной степенью точности, учитывать диэлектрические свойства материалов, эффекты полного или частичного отражения волны, поглощение на стенках камеры и пр.

3.1. Возбуждение и распространение СВЧ-поля в электродинамической системе «камера-материал»

С точки зрения классической электродинамики распределение электромагнитного СВЧ поля в электродинамической системе «источник СВЧ – камера – материал» при возбуждении монохроматической гармонической электромагнитной волны в общем случае описывается векторным волновым уравнением:

$$\nabla\times\left(\nabla\frac{1}{\mu}\times E\right)-(\varepsilon'-j\varepsilon'')\varepsilon_0\mu_0(2\pi f)^2E=0, \qquad (3.1)$$

где $\varepsilon=\varepsilon'-j\varepsilon''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость материала, μ – комплексная магнитная проницаемость материала.

Уравнение Гельмгольца (3.1) является основным типом уравнения, решение которого в трехмерной области для векторов электрического и магнитных полей производится с применением численных методов МКР и МКЭ [1] с соответствующими граничными условиями на поверхности материала, границе раздела сред и условиями возбуждения электромагнитного поля согласно известных подходов классической *СВЧ* электродинамики.

Согласно теории классической электродинамики в отсутствии зарядов и токов на поверхностях материалов с разными параметрами тангенциальная компонента **E** на границе раздела сред непрерывна:

$$n_2 \times \left(E_1 - E_2 \right) = 0 . \qquad (3.2)$$

На металлических стенках резонатора имеет место соотношение:

$$n \times E = 0 . \qquad (3.3)$$

Граничное условия для согласованного источника *СВЧ* излучения напряженностью $\mathbf{E}_0$ запишется в виде [2]:

$$n \times \left(\nabla \times E \right) - j\beta \left(E - \left(n \cdot E \right) n \right) = -2\, j\beta \left(E_0 - \left(n \cdot E_0 \right) n \right) . \qquad (3.4)$$

При возбуждении резонаторных камер прямоугольного сечения посредством волновода в ее стенке на границе источника распределение и величина напряженности $\mathbf{E}_0$ будет иметь вид [3] распределения волны H_{10} СВЧ поля в сечении прямоугольного волновода:

$$E_0 = E_y \Big|_{z=0} = E_y^{max} \cos\left(\pi x / a \right) . \qquad (3.5)$$

По паспортной или измеренной мощности P генератора можно определить величину напряженности E_y^{max} в центре волновода [4], что потребуется далее для приведения в соответствие условий проведения численного и натурного экспериментов:

$$E_y^{max} = \sqrt{4PZ / (ab)} , \qquad (3.6)$$

$$Z = 376.7 \Big/ \sqrt{1 - \left(\lambda_0 / \lambda_{кр} \right)^2} , \qquad (3.7)$$

$$\lambda_{кр} = 2a , \ \lambda_0 = c / f_0 , \qquad (3.8)$$

где a и b – размеры широкой и узкой стенок волновода, c – скорость света в вакууме, f_0 – рабочая частота источника СВЧ.

Для анализа СВЧ процессов, оценки степени согласования электродинамической системы с источником СВЧ, определения полезной и отраженной СВЧ мощности используем выражение для комплексного коэффициента отражения поля, определяемого интегрированием расчетной и генерируемой напряженностей поля на границе источника:

$$S_{11} = \frac{\int_A \left(E - E_0 \right) E_0 dA}{\int_A E_0^2 dA} . \qquad (3.9)$$

где E – расчетная напряженность поля на границе источника, E_0 – генерируемая напряженность поля на границе источника, A – область интегрирования.

3.2. Моделирование распределения СВЧ-поля в ближней зоне облучателей

3.2.1. Электродинамическая модель

Электродинамическая модель представляет собой систему, состоящую из прямоугольного волноводно-щелевого облучателя с идеально отражающими металлическими стенками и образца модельного влажного полярного диэлектрического материала (рис. 3.1).

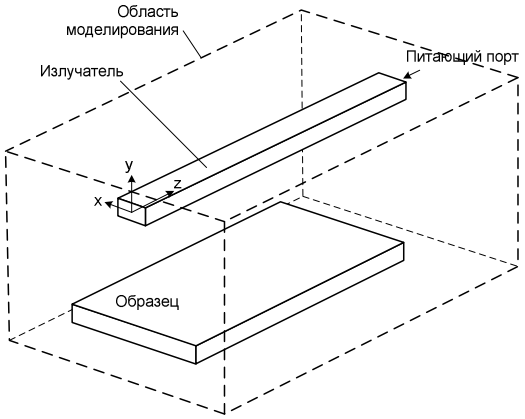


Рис. 3.1. Область моделирования волноводно-щелевого излучателя

Внешняя область моделирования – открытое пространство. Рабочая частота СВЧ-поля – 2,45ГГц. Влажность модельного материала косвенно определялась по значению его диэлектрической проницаемости ε. Начальной влажности материала соответствовало значение ε=20, конечной – ε=5, при этом тангенсе угла диэлектрических потерь 0,25. В качестве антенны с параметрами: длина L=850мм, длина щели l=57,5мм, ширина щели b=4мм, обучателей рассматривались:

- резонансная волноводно-щелевая смещение центра щелей от центра волновода x=10мм, расстояние между щелями d=83,42мм, расстояние от края волновода до центра первой щели d_1=41,71мм.

- антенные решетки на базе резонансных волноводно-щелевых антенн.

Конструктивный расчет и оптимизация параметров облучателей проводилась по методикам [4-10] и компьютерным трехмерным моделированием.

3.2.2 Распределение СВЧ-поля в ближней зоне резонансного облучателя

После расчета конструктивных параметров по полученным данным проводилось трехмерное компьютерное моделирование. Возбуждение антенны осуществлялось волной H_{10}. Процесс моделирования включал в себя несколько этапов: прорисовку трехмерной конечно-элементной структуры антенны, задание ее электрофизических свойств, определение граничных условия для области моделирования, запуск модели на исполнение. Результаты, полученные для излучения в свободное пространство, приведены на рис. 3.2 и 3.3.

Согласно рис. 3.2,а, коэффициент отражения облучателя на частоте 2,45ГГц равен 0,2. Потери по мощности при этом составляют порядка 4%. Вектор напряженности излучаемого СВЧ-поля лежит в плоскости излучения и направлен поперечно облучателю [5].

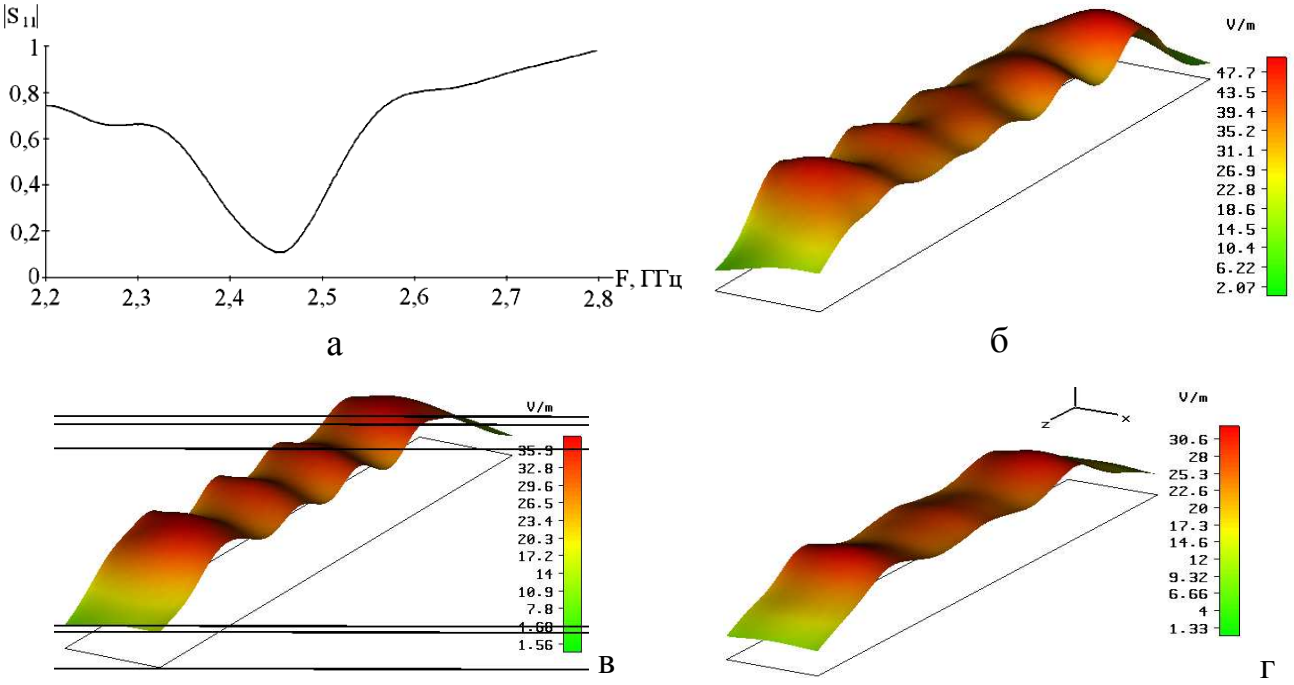


Рис. 3.2. Частотная зависимость $|S_{11}|$ (а); распределение напряженности поля в свободном пространстве для резонансного облучателя при расстояниях до исследуемой зоны 100 мм (б), 200 мм (в) и 300 мм (г)

Как видно из рис. 3.2 (б-г) поле локализовано на участке под щелями антенны, и амплитуда *E* понижается на крайних участках. При удалении образца материала от облучателя на расстояние 300 мм и более амплитуда напряженности поля вдоль участка под облучателем выравнивается, поле рассеивается. Таким образом, целесообразно располагать облучаемый материал в ближней зоне облучателя на расстоянии не более 300 мм.

Резонансные волноводно-щелевые облучатели являются узкополосными и настраиваются на одну рабочую частоту. С целью выявления влияния девиации частоты магнетрона на характеристики облучателя проводилось

дополнительное моделирование на частотах близких к рабочей: 2,4 и 2,5ГГц. Из рис. 3.3. видно, что облучатель по-разному реагирует на изменение частоты: при понижении частоты до 2,4 ГГц коэффициент отражения возрастает до 0,3 и потери мощности до порядка 9%, при повышении частоты до 2,5 ГГц – коэффициент отражения составляет 0,4, а потери по мощности – 16%.

При изменении частоты амплитуда напряженности *E* СВЧ-поля возрастает, особенно на частоте 2,5ГГц, и поле рассеивается интенсивнее, наблюдается участок с сильным перегревом вблизи дальнего конца волновода.

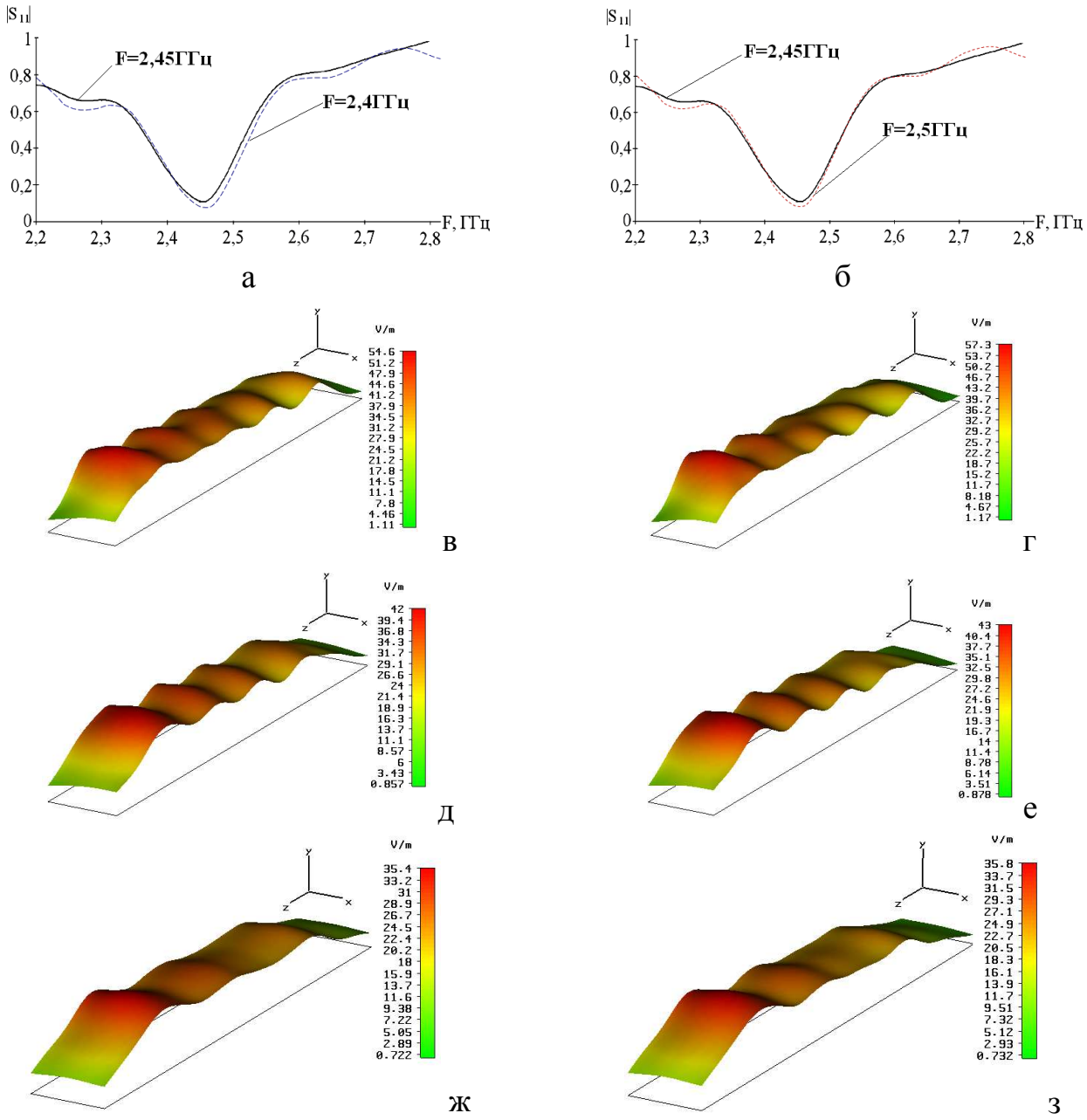


Рис. 3.3. Коэффициент отражения $|S_{11}|$ (а, б) и распределения напряженности поля (в-з) на частоте 2,4 ГГц (а, в, д, ж) и 2,5 ГГц (б, г, е, з) в свободном пространстве; для резонансной антенны и расстоянии

до исследуемой зоны 100 мм (в, г), 200 мм (д, е), 300 мм (ж, з)

3.2.3. Распределение СВЧ-поля в ближней зоне антенной решетки

При моделировании распределения СВЧ-поля в ближней зоне антенной решетки варьировалось расстояние от закороченного торца первой антенны до края ближней щели второй антенны h для продольной решетки от 285 до 605 мм, и расстояние между центрами антенн h_1 для поперечной решетки от 180 до 740 мм. Результаты моделирования для излучения в свободное пространство показаны на рис. 3.4-3.7. Расстояние от антенн до исследуемой зоны составляло 200 мм.

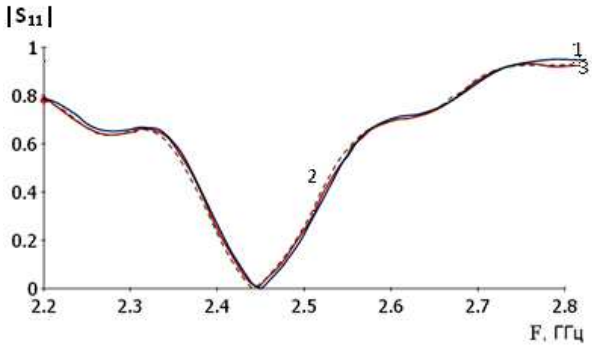
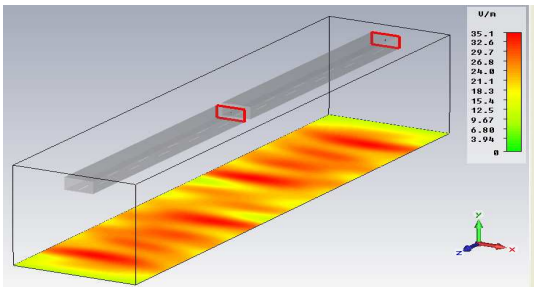
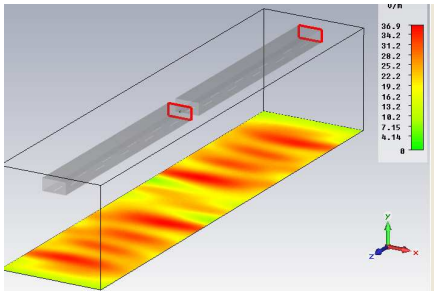
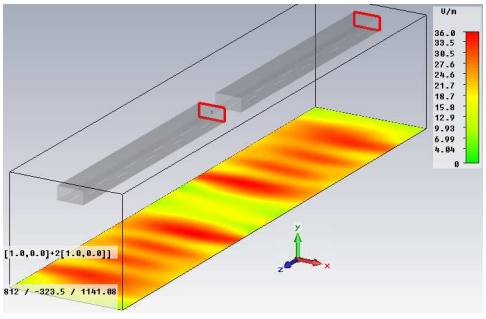


Рис. 3.4. Зависимости коэффициентов отражения $|S_{11}|$ продольной антенной решетки для различных h: 305 мм (1), 355 мм (2), 285 мм (3)

Изменение расстояния h от 285до 355 мм практически не влияет на изменение коэффициента отражения $|S_{11}|$ продольной антенной решетки, незначительно смещая минимум графика в сторону более низких частот.


а


б


в

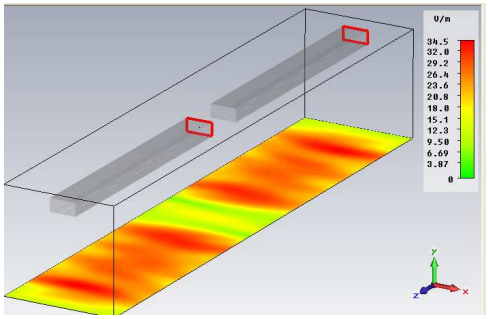

г

Рис. 3.5. Профили полей от облучателей для продольной антенной решетки для различных h: 285 мм (а), 305 мм (б), 355мм (в), 405 мм (г)

Из рис. 3.5 очевидно, что для продольной антенной решетки наиболее оптимальным является расстояние h=285мм. Зона минимальной напряженности поля достаточно узкая и не оказывает серьезного влияния на нагрев модельного пространства. При большем удалении антенн друг от друга указанная зона увеличивается в направлении к торцам материала, амплитуда напряженности поля в ней значительно снижается. Суммарный коэффициент отражения решетки является минимальным, практически равным нулю, и не изменяется с увеличением расстояния между антеннами. Однако, практическая реализация такой антенной решетки затруднительна из-за конструктивных соображений.

На рис. 3.6-3.7 приведены результаты моделирования излучения в свободное пространство для поперечной антенной решетки. Удаление антенн в решетке друг от друга приводит к периодическому сдвигу резонансной частоты решетки как в сторону более низких, так и в сторону более высоких частот, и только для трех расстояний резонансная частота решетки остается равной 2,45 ГГц – h_1=180 мм, h_1=390 мм и h_1=490 мм (кривые 1, 3 и 5).

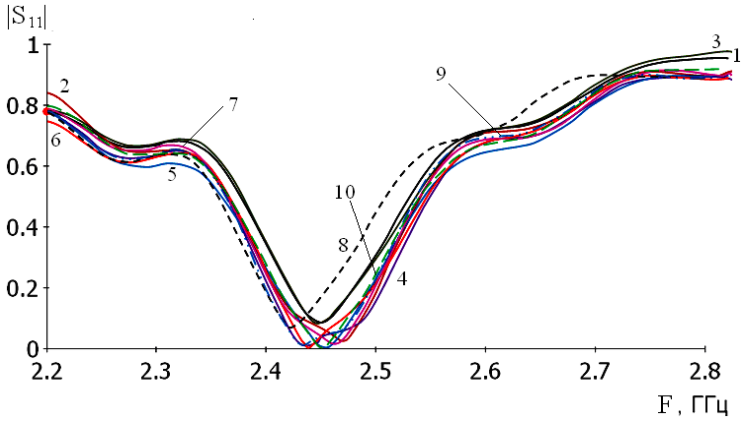


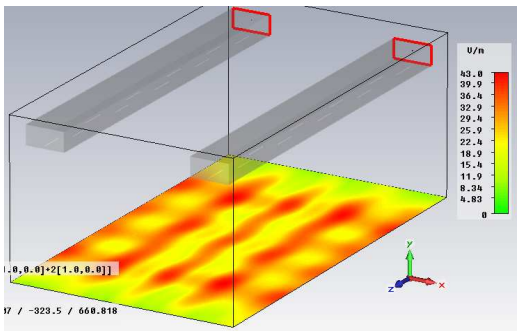
Рис. 3.6. Коэффициент отражения $|S_{11}|$ поперечной решетки для различных h_1: 180мм (1), 340мм (2), 390мм (3), 440мм (4), 490мм (5), 540мм (6), 590мм (7), 640мм (8), 690мм (9), 740мм (10)

Исследования равномерности распределения СВЧ-поля антенной решетки для излучения в свободном пространстве показали, что приемлемые результаты наблюдаются при расстоянии между центрами антенн h_1=180мм для узких материалов и в диапазоне расстояний от h_1=390 до 690 мм для более широких материалов. Суммарный коэффициент отражения решетки при этом не превышает 0,1, а потери падающей мощности – 1%. С учетом данных графика на рис. 6, практический интерес представляют собой расстояния,

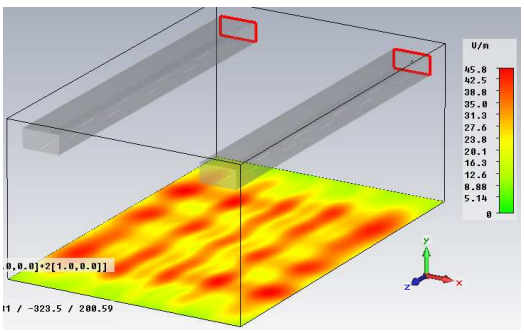
равные: h_1=390мм , h_1=440мм и h_1=490мм. Картины распределения поля решетки для этих расстояний показаны на рис. 3.7. Расстояние до исследуемой зоны 200 мм.

Комплексный анализ графиков на рис. 3.6 и профилей поля на рис. 3.7 показывает, что наиболее приемлемый результат достигается при расстоянии между центрами антенн h_1=440мм и h_1=490мм. В первом случае, резонансная частота решетки остается равной 2,45ГГц, а во втором наблюдается более однородное распределение поля на поверхности исследуемой зоны для излучения в свободное пространство. Для материалов шириной более 490 мм возможно применение решетки из трех и более антенн.

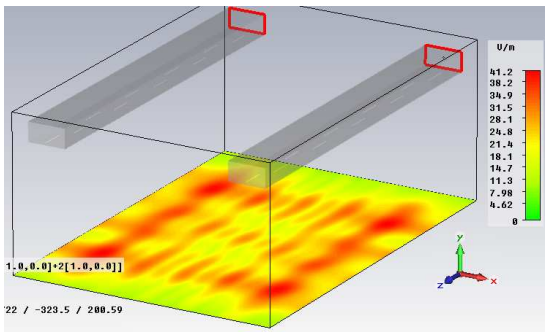
График коэффициента отражения $S_{|11|}$ и профиль поля антенной решетки для излучения на материал представлен на рис. 3.8. Расстояние до материала 200 мм. При добавлении в модель облучаемого материала резонансная частота решетки сдвигается до приблизительно 2,435ГГц. При сравнении рис. 3.7,б и 3.8,б видно, что при переходе к излучению на материал характер распределения поля меняется незначительно, коэффициент отражения решетки возрастает до 0,3. Потери падающей мощности при этом составляют 9%. Наблюдается высокая степень корреляции результатов моделирования для излучения в свободное пространство и на материал.



а

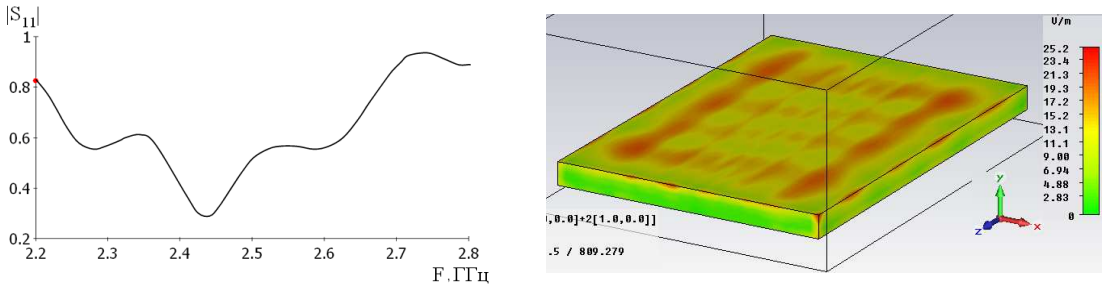


б



в

Рис. 3.7. Профили полей от облучателей для поперечной антенной решетки для различных h_1: 390 мм (а), 440 мм (б), 490 мм (в)



а б

Рис. 3.8. Зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ (а) и профиль поля на поверхности модельного материала (б) для поперечной решетки с расстоянием между центрами антенн h_1=440 мм

Таким образом, при обработке длинномерных материалов рационально применять проектирование конструкций облучателей, позволяющих получить однородное распределение СВЧ-поля в ближней зоне. Рассмотренные в работе облучатели обеспечивают удовлетворительную однородность распределения СВЧ-поля в ближней зоне. Для обработки материалов длиной до 2000 мм и шириной не более 250 мм рациональнее выбрать секционную резонансную волноводно-щелевую антенну с волноводным Т-тройником Е-типа. Для обработки материалов, ширина которых не превышает 490 мм перспективно использовать поперечную антенную решетку с расстоянием между центрами антенн в пределах от 390 до 490 мм включительно. Длина обрабатываемых материалов при этом определяется длиной единичной антенны. Исследовалась поперечная антенная решетка, пригодная для обработки материалов длиной не более 1000 мм и шириной не более 490 мм. Более оптимальные результаты достигаются при расстоянии между центрами антенн 440 и 490 мм Для обработки более широких материалов возможно использование поперечной решетки, состоящей из трех и более антенн.

3.3. Конструкции облучателей СВЧ установок

В УО «ПГУ» разработан и изготовлен опытный образец модульной СВЧ-установки, конструкция которой защищена патентом Республики Беларусь [6]. Установка состоит из технологической камеры с электрически герметичной

дверью, облучающей антенны, СВЧ-модуля и волноводного Е-изгиба, соединяющего антенну с питающим волноводом СВЧ-модуля (рис. 3.9).

Резонансная щелевая антенна-облучатель с параметрами, указанными в табл. 3.1, была изготовлена из листовой стали 0,5 мм, соединения осуществлялись при помощи пайки оловянно-свинцовым припоем. Излучающие щели в широкой стенке выполнялись с точностью 0,1 мм.

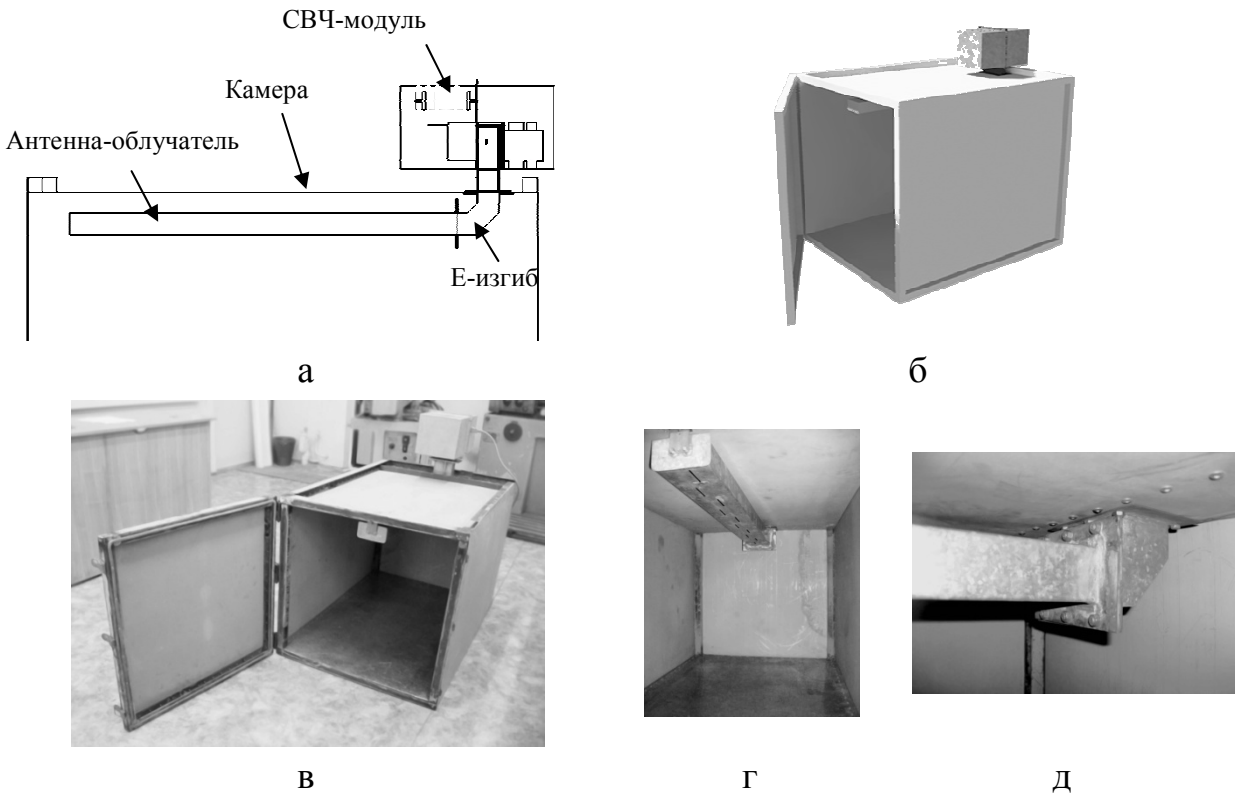


Рис. 3.9. СВЧ-установка: схема (а), 3D модель (б), внешний вид (в), вид антенны-облучателя (г), Е-изгиб (д)

Двухуголковый волноводный Е-изгиб на 90° изготавливался из листового металла. Его размеры предварительно оптимизировались на компьютере для получения наименьшего КСВН. Измеренное КСВН Е-изгиба составило 1,02.

Камера состоит из несущего металлического каркаса из металлических труб прямоугольного сечения соединенных сваркой. К каркасу при помощи заклепок крепились листы оцинкованной стали. Камера снабжена электрически герметичной дверью со специальным уплотнением по периметру и клипсами.

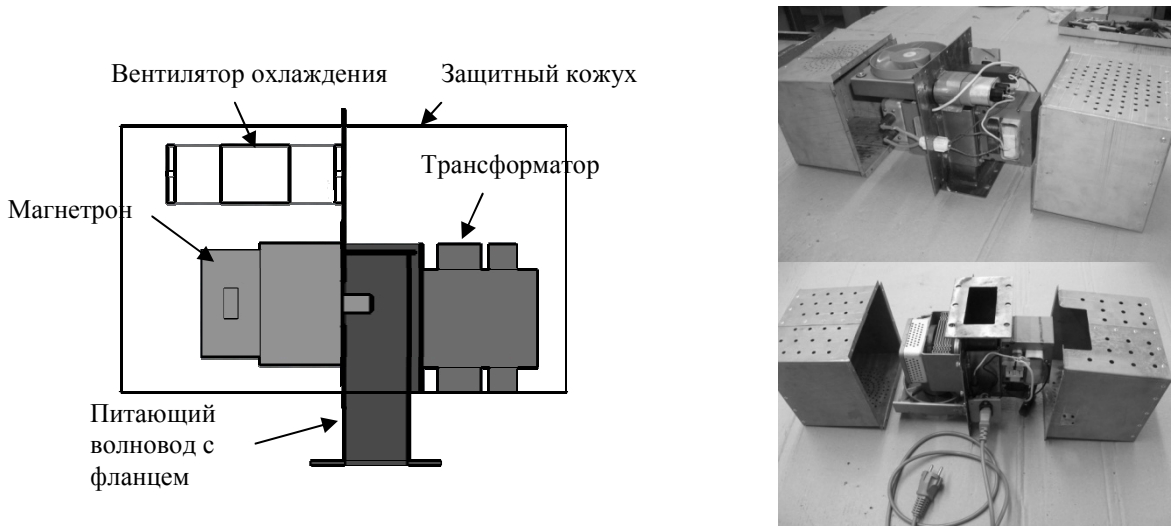
СВЧ-модуль состоит из питающего волновода, магнетрона, вентилятора охлаждения магнетрона, трансформатора питания магнетрона, электронной обвязки и защитного кожуха (рис. 3.10). В СВЧ-модуле использовался магнетрон М-112 (2,45 ГГц, 700 Вт), трансформатор 1 кВА, с обмотками на анодное напряжение 3,5 кВ, напряжение накала 3,5 В. Вентилятор необходим

для обеспечения охлаждения магнетрона. Питающий волновод и несущие конструктивные элементы изготовлены из листовой стали толщиной 1,8мм. Соединение осуществлялось сваркой. Рабочие и конструктивные параметры СВЧ-модуля представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.1

Параметры антенны-облучателя

Параметр	Значение
Эффективная длина, м	0,8
Размеры, м	0.7-0.8
КСВН на частоте 2,45ГГц,	1,05
Число щелей	13
Длина/ширина щели, мм	57,5/4
Смещение от центра, мм	10



а б

Рис. 3.10. СВЧ-модуль: схема (а) и внешний вид (б)

Таблица 3.2

Характеристики СВЧ-модуля

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	220
Полезная мощность, кВт	0.7
КПД, %	65-70
Рабочая частота, ГГц	2,45
Сечение питающего волновода	90×45мм

Возможна реализация многомодульной СВЧ-установки в двух вариантах: в виде одной общей камеры и массива из антенн-облучателей и в виде нескольких блоков для наращивания длины камеры (рис. 3.11).

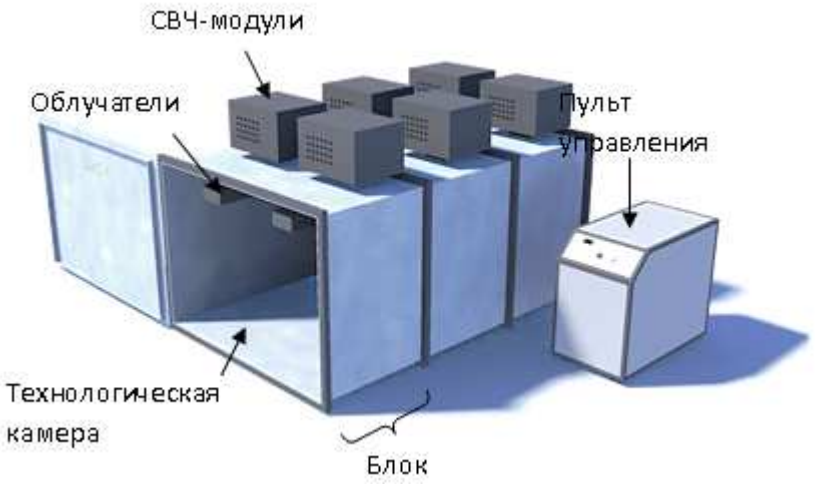


Рис. 3.11. Блочно-модульная конструкция СВЧ-установки

3.4. Экспериментальные исследования поля излучения резонансного облучателя

Исследование поля излучения резонансного облучателя производилось в закрытой камере. Облучатель запитывался от СВЧ-модуля присоединенного к задней стенке камеры и содержащего магнетрон, питание накала, циркулятор и согласованную волноводную нагрузку. Питание магнетрона осуществлялось от высоковольтного блока питания, работающего по двухполупериодной схеме выпрямления с умножением напряжения.

Фиксирование распределения поля излучения облучателя осуществлялось при помощи индикаторного раствора хлорида кобальта, нанесенного на лист плотной бумаги. Экспериментально измеренное распределение поля приведено на рис. 3.12. Области максимальной напряженности излучаемого СВЧ-поля соответствуют участкам, окрашенным в синий цвет. Расстояние от материала до облучателя составило 500, 350 и 120 мм. Как видно из термограмм резонансный облучатель обеспечивает приемлемое продольное распределение СВЧ-поля. Возникновение участков с неравномерным поперечным распределением обусловлено возникновением стоячих волн в результате образования отраженных волн и интерференции.

При расстоянии между облучателем и материалом порядка $\lambda_в$ наблюдается выравнивание центральной полосы пучностей поля с практически полным устранением боковых, что объясняется расходящимся характером распределения СВЧ-поля в вертикальной плоскости с удалением от облучателя.

а б в

Рис. 3.12. Термограммы поля резонансного облучателя при расстоянии между антенной и образцом 500 мм (а), 350 мм, (б) и 120 мм (в)

Трехмерные компьютерные модели антенн-облучателей позволяют проводить моделирование распределения напряженности СВЧ-поля в ближней зоне антенн, получать передаточные характеристики, проводить численную оптимизацию их конструктивных параметров. В результате моделирования и экспериментов установлено, что равномерность продольного распределения поля для резонансного облучателя может достигать 87%.

Исходя из анализа расчетных, модельных и экспериментальных данных, для включения в модульную технологическую систему СВЧ-обработки материалов рационально выбрать разработанный резонансный облучатель. Предложены конструкции облучателей в виде резонансных волноводно-щелевых антенн на основе прямоугольного волновода, повышающие равномерность распределения напряженности СВЧ-поля на поверхности материала до 80-87%.

Разработанная конструкция модульной технологической системы, состоящая из камер-модулей, антенн-облучателей, СВЧ-модулей, пульта управления позволит достичь более 30%-ой экономии электроэнергии по сравнению с традиционными установками.

Результаты работы можно использовать в процессах электрофизической термообработки органических и полимерных материалов в промышленности и сельском хозяйстве Республики Беларусь, в частности в процессах нагрева, сушки и модификации материалов. В частности, при использовании предложенной разработки для процессов сушки пиломатериалов достигаются: экономия электроэнергии по сравнению с традиционными установками составляет 1,5-2,0 раза, улучшение эксплуатационных характеристик высушиваемой древесины за счет уничтожения бактерий и грибков, отсутствие вредных выбросов, возможность сушки длинномерных пиломатериалов.

Список литературы к главе 3

1. Surducan E., Studies of the microwave distribution in microwave power applications / E. Surducan, V. Surducan // Studia universitatis physica. – 2001. – P. 433 – 439.

2. Femlab 3.0a Electromagnetic module User guide // Comsol website [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: http://. – Date of access: 20.05.2008.

3. Чернушенко, А.М. Конструирование экранов и СВЧ-устройств: учеб. для вузов / А.М. Чернушенко – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с.

4. Kashiwa, T. A new transducer for thermography to observe the electric field distribution in a microwave oven / T. Kashiwa // Microwave and Optical tecn. lett. – 1992. – Vol. 4(2). – P. 81 – 83.

5. Численное и экспериментальное исследование излучения щелевых облучателей в ближней зоне / А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг, О.А. Рымарева, С.П. Кундас // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2009. – № 5. – С. 123 – 127.

6. Пат. 7041 U BY, МПК 8 F 26B 3/00, H 05B 6/64 СВЧ-установка для термообработки материалов / Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Кизина О.А.

7. Лобкова, Л. М. Проектирование антенн и устройств СВЧ: учеб. пособие для вузов / Л. М. Лобкова. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2002. – 178 с.

8. Оптимальная волноводно-щелевая решетка [электронный ресурс]. – Томск, 2008. Режим доступа: http://www.yandex.ru/tusur.ru.

9. Изюмова, Т. И.. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии./ Т. И. Изюмова, В.Т. Свиридов. – М.: Энергия. 1975. – 112 с.

10. Кундас, С. П. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах /С. П. Кундас, Н. Н. Гринчик, И. А. Гишкелюк, А. Л. Адамович. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 2007. – 292 с

ГЛАВА 4
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

4.1 Расчет скорости нанесения микроразмерных слоев при магнетронном распылении

В настоящее время магнетронные распылительные системы находят широкое применение в технологии вакуумного ионно-плазменного нанесения тонких пленок для формирования функциональных слоев в микроэлектронике, оптике, оптоэлектронике и машиностроении [1-3]. Методы магнетронного распыления обеспечивают нанесение тонкопленочных слоев металлов и диэлектриков с высокими скоростями нанесения. Процесс магнетронного нанесения хорошо контролируется, что обеспечивает хорошую воспроизводимость свойств наносимых слоев [4]. Следует отметить, что стоимость установок магнетронного нанесения сравнительно высокая, поскольку данное оборудование не выпускается массово и, чаще всего, создается под конкретную задачу. Поэтому уже на этапе проектирования оборудования необходимо обеспечить уже максимальную однородность по толщине наносимых слоев при минимальных размерах мишени и расстоянии мишень – подложка. При этом необходимо иметь простые методики расчета профиля толщины наносимых слоев для любой формы зоны распыления и конфигурации процесса. В данном случае методы компьютерного моделирования позволяют значительно сократить время и стоимость проектирования систем и исключить ошибки.

Для систем ионного распыления количество атомов материала мишени, распыленных в единицу времени с определенного участка мишени, рассчитывается по формуле

$$\nu_t(r_1) = Y_t \frac{j_i(r_1)}{e}, \qquad (4.1)$$

где Y_t – коэффициент распыления ионами Ar атомов материала мишени, e – заряд электрона, $j_i(r_1)$ – плотность ионного тока на поверхности мишени на радиусе r_1, которая может быть рассчитана по формуле

$$j_i(r_1) = \frac{j_t(r_1)}{1+\gamma_t}, \qquad (4.2)$$

где $j_t(r_1)$ – плотность тока разряда на радиусе r_1, γ_t – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала мишени. Скорость распыления мишени по толщине

$$\upsilon_t(r_1) = \frac{\nu_t(r_1) A_t}{N_A e \rho_t}, \qquad (4.3)$$

где A_t – атомная масса распыляемого материала, ρ_t – плотность материала, N_A – число Авогадро $N_A = 6.022\times10^{23}$ моль$^{-1}$. С учетом формул (4.2) и (4.3) скорость распыления по толщине можно записать в виде

$$\upsilon_t(r_1) = Y_t \frac{j_t(r_1) A_t}{N_A e \rho_t (1+\gamma_t)}. \qquad (4.4)$$

Распределение плотности тока разряда $j_i(r_1)$ может быть рассчитано с использованием методов моделирования кинетики движения тестовых частиц Монте-Карло (PIC-MC) [5-7]. Однако это значительно усложняет модель и может быть использовано в случае необходимости проведения прецизионных расчетов. В нашем случае кривая распределения плотности тока разряда аппроксимировалась с использованием третьего центрального момента в распределении типа “сдвоенная гауссиана” с различными дисперсиями на левом и правом плечах распределения. Данное распределение использует реальные параметры зоны распыления и тока разряда магнетрона и с достаточной точностью позволяет математически описать распределение плотности ионного тока. При данном методе моделирования профиль распределения плотности ионного тока в зоне разряда задается аналитически с помощью формулы

$$j_t(r_1) = \frac{I_t}{\pi(R_{\max} + R_{\min}) + 2L} \frac{f(r_1)}{\int_0^{\infty} f(r_1)dr_1}, \qquad (4.5)$$

где I_t – ток разряда магнетрона, R_{min} и R_{max} – минимальный и максимальный радиусы зоны эрозии мишени, $f(r_1)$ – функция распределения, которая имеет вид сдвоенной полугауссианы

$$f(r_1) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(r_1 - \overline{R})^2}{2\sigma_1^2} \right] & \text{для } |r_1| \le \overline{R} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(r_1 - \overline{R})^2}{2\sigma_2^2} \right] & \text{для } |r_1| > \overline{R} \end{cases}$$

$$\sigma_1 = \frac{\overline{R} - R_{\min}}{3} \qquad \sigma_2 = \frac{R_{\max} - \overline{R}}{3} \qquad \sigma = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{6}, \qquad (4.6)$$

где $\overline{R}$ – радиус максимальной эрозии мишени. При этом функция распределения должна удовлетворять соотношению

$$\int_{-\infty}^{\infty} j_t(r_1)dr_1 = I_t . \qquad (4.7)$$

Следует отметить, что при расчетах скорости распыления желательно использовать эффективный коэффициент распыления материала мишени, который зависит от распределения энергии бомбардирующих ионов [8].

На рис. 4.1 представлены результаты моделирования распределения плотности тока разряда при использовании для аппроксимации распределение Гаусса (*а*) и сдвоенной гауссианы (*б*). Для сравнения на рис. 4.1 (кривая *в*)

представлен нормированный профиль зоны эрозии протяженного магнетрона МСПР-616.

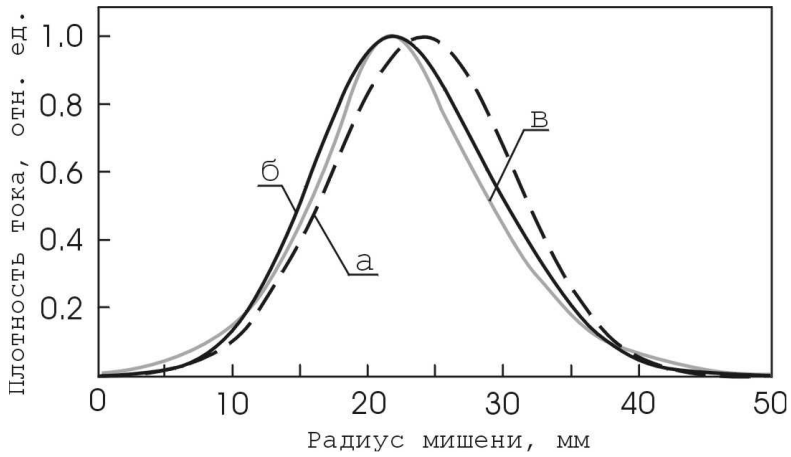


Рис. 4.1. Распределение плотности ионного тока при использовании для аппроксимации распределение Гаусса (*а*) и сдвоенной гауссианы (*б*), (*в*) – нормированный профиль зоны эрозии мишени магнетрона МСПР-616

Поскольку плотность тока разряда пропорциональна скорости распыления материала мишени [9], можно сделать вывод, что представленная выше метод аппроксимации с использованием третьего центрального момента в распределении типа “сдвоенная гауссиана” позволяет с высокой точностью математически описать распределение тока разряда в зоне распыления МРС.

Рассмотрим особенности геометрической схемы модели системы МРС с протяженной зоной распыления – подложка (рис. 4.2). В нашем случае подложка располагается параллельно плоскости мишени, поэтому модель процесса напыления будем строить для случая, когда мишень и подложка параллельны и сосны и угол распыления равен углу конденсации, т.е. $\phi = \varphi$. При построении модели сделаем следующие допущения: (I) распыленные атомы имеют направленное движение и распространяются в пространстве по закону косинуса; (II) распыленные атомы не сталкиваются друг с другом и с атомами рабочего газа (т.е. отсутствует эффект термализации распыленного потока); (III) распыленные атомы конденсируются в точке соударения с подложкой.

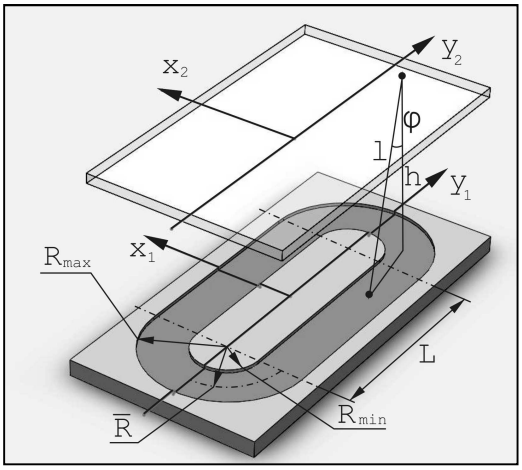


Рис. 4.2. Геометрическая схема модели системы МРС с протяженной зоной распыления – подложка

Для определения скорости нанесения тонкопленочных слоев на подложке будем использовать метод интегрирования распыленного потока с каждой точки зоны распыления. Как видно из рис. 4.2, зону распыления в протяженных МРС можно разделить четыре участка: два закругленных и два прямолинейных. При этом скорость нанесения в точке подложки с координатами (x_2, y_2), расположенной на расстоянии l от точки распыления МРС с протяженной зоной распыления, может быть рассчитана как сумма скоростей нанесения из прямолинейных и закругленных участков зоны распыления

$$V(x_2, y_2) = V_1(x_2, y_2) + V_2(x_2, y_2) + V_3(x_2, y_2) + V_4(x_2, y_2), \qquad (4.8)$$

где $V_1(x_2, y_2)$, $V_2(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени, $V_3(x_2, y_2)$, $V_4(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с прямолинейных участков зоны распыления мишени. Скорость нанесения пленки из участка закругления зоны распыления

$$V_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R\min}^{R\max} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{r_1 \upsilon_t(r_1) \cos^2 \varphi(r_1, \theta)}{l^2(r_1, \theta)} dr_1 d\theta, \qquad (4.9)$$

где R_{min}, R_{max} – минимальный и максимальный радиус зоны эрозии мишени, r_1 – текущий радиус, $\upsilon_t(r_1)$ – скорость распыления материала мишени на радиусе r_1, l – расстояние от точки распыления до точки конденсации, φ – угол распыления и конденсации, θ – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона. Для протяженных участков зоны распыления формула имеет вид

$$V_3(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R\min}^{R\max} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\upsilon_t(x_1) \cos \varphi^2(x_1, y_1)}{l^2(x_1, y_1)} dx_1 dy_1, \qquad (4.10)$$

где L – длина прямолинейного участка зоны распыления мишени.

На рис. 4.3 представлены рассчитанные с использованием формул (4.4) – (4.10) профили распределения скорости нанесения слоев на различных расстояниях от длинной оси магнетрона. Для расчета использовались следующие исходные данные: материал мишени – сталь 12Х18Н10Т (Y_t = 0.85, γ_t = 0.005, A_t = 55 а.е.м, ρ_t = 7900 кг/м^3), ток разряда I_t = 7.0 А, напряжение разряда U_t = 425 В, режим стабилизации мощности разряда P_t = 3.0 кВт. Минимальный, средний и максимальный радиусы зоны эрозии мишени принимались равными соответственно R_{min} = 4 мм, $\overline{R}$ = 22.5 мм, R_{max} = 44 мм, длина прямолинейного участка зоны распыления L = 514 мм. Расстояние мишень – подложка 95 мм.

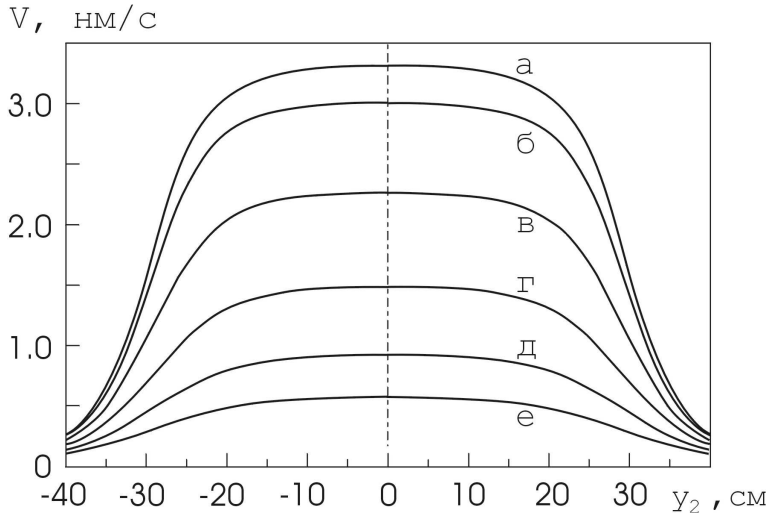


Рис. 4.3. Профили распределения скорости нанесения пленки при магнетронном распылении мишени из стали 12Х18Н10Т на различном расстоянии от длинной оси магнетрона: *а* – 0 м, *б* – 0.03 мм, *в* – 0.06 м, *г* – 0.09 мм, *д* – 0.12 м, *е* – 0.15 м

4.2. Расчет распределения толщины микроразмерных слоев на линейно перемещаемые подложки

Схема установки магнетронного нанесения тонкопленочных слоев на рулонные материалы и линейно перемещаемые подложки конвейерного типа приведена на рис. 4.4. Установка состоит из вакуумной камеры (4) магнетронной распылительной системы (1) и системы перемещения подложки

(пленки) (2). Подложка (3) располагается на расстоянии h от мишени магнетрона и линейно перемещается в зоне нанесения со скоростью V_s. Длина зоны нанесения M и время нахождения подложки в зоне нанесения t_{dep} зависит от ширины зоны распыления, расстояния мишень подложка и скорости перемещения подложки. Во многих установках зона нанесения ограничена анодом магнетрона или конструктивными элементами (5), которые отделяют зону нанесения от зоны перемотки и очистки подложек (пленки), и обеспечивают перепад давления в зоне нанесения.

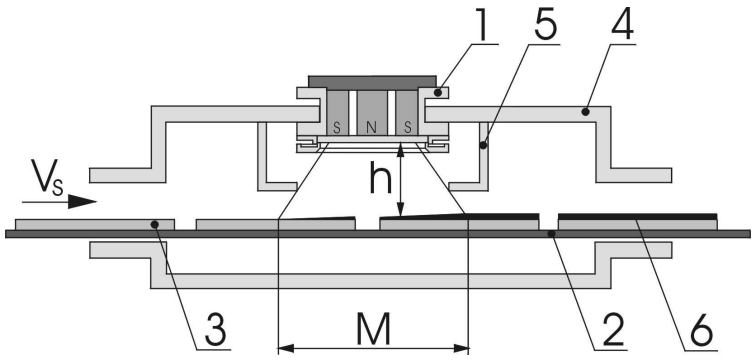


Рис. 4.4. Схема установки магнетронного нанесения конвейерного типа:
1 – магнетронная система, 2 – системы перемещения подложки (пленки),
3 – подложка, 4 – камера, 5 – конструктивные элементы, ограничивающие зону нанесения, 6 – нанесенная пленка

Рассчитаем толщину нанесенного слоя при линейном перемещении подложек в зоне нанесения. Если известна скорость перемещения подложки V_s и протяженность зоны нанесения M, то время нахождения подложки в зоне нанесения будет

$$t_{dep} = \frac{M}{V_s}. \qquad (4.11)$$

Общая толщина нанесенной слоя за время прохода зоны нанесения на расстоянии r_2 от короткой оси магнетрона

$$W(x_2) = \int_{-\frac{t_{dep}}{2}}^{\frac{t_{dep}}{2}} V(x_2, t \times V_{sub})dt, \qquad (4.12)$$

где $V(r_2, t \times V_{sub})$ – скорость нанесения в точке $t \times V_{sub}$ на расстоянии x_2 от короткой оси магнетрона.

На рис. 4.5 (кривая *а*) представлены результаты моделирования распределения толщины нанесенной пленки, полученной при распылении

мишени из стали 12Х18Н10Т при линейном перемещении подложки. Для расчета использовались следующие исходные данные: скорость перемещения подложки V_s = 3.25 мм/с, протяженность зоны нанесения M = 300 мм. Остальные параметры приведены выше.

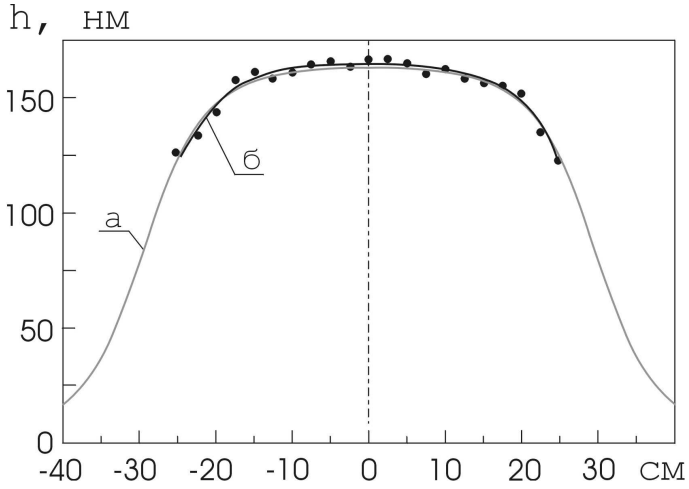


Рис. 4.5. Профили распределения толщины пленки при моделировании (*а*) и реальный профиль (*б*) для линейного перемещения подложки

Для верификации предложенной модели проведены экспериментальные исследования по нанесению тонких пленок методом магнетронного распыления мишени из стали 12Х18Н10Т на ПЭТ пленку шириной 500 мм при линейном перемещении пленки. На рис. 4.6 представлена схема экспериментальной установки. Камера вакуумной установки оборудована системой перемотки пленки, протяженным ионным источником (ИИ) на основе ускорителя с анодным слоем и протяженной магнетронной распылительной системой. ПЭТ пленка шириной 500 мм перемещалась со скоростью 3,25 мм/с на расстоянии 95 мм от поверхности мишени магнетрона и 110 мм от разрядной зоны ионного источника.

Первоначально пленка подвергалась ионной очистке с режимами: напряжение разряда 3.0 кВ, ток разряда 200 мА, рабочий газ – Ar. Распыление мишени размером 616×100×10 мм из стали 12Х18Н10Т осуществлялось протяженной магнетронной распылительной системой МСПР-616 при следующих параметрах: поток Ar в камеру Q_{Ar} = 40 мл/мин, рабочее давление p = 5.2×10^{-2} Па, мощность разряда МРС поддерживалась P_t = 3.0 кВт.

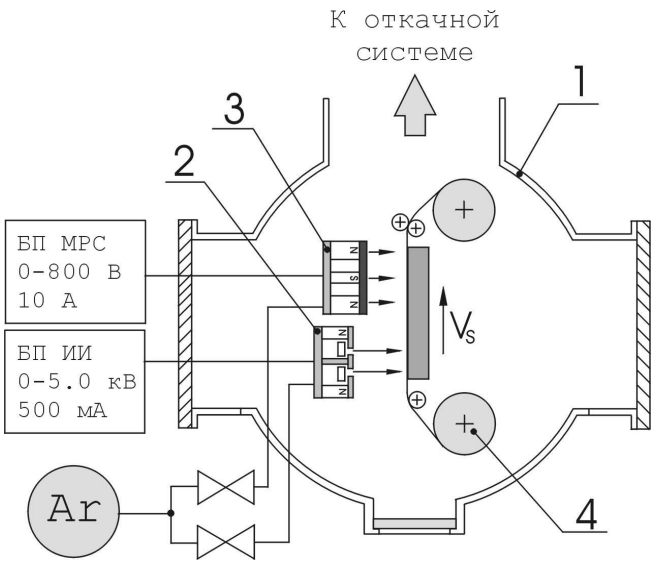
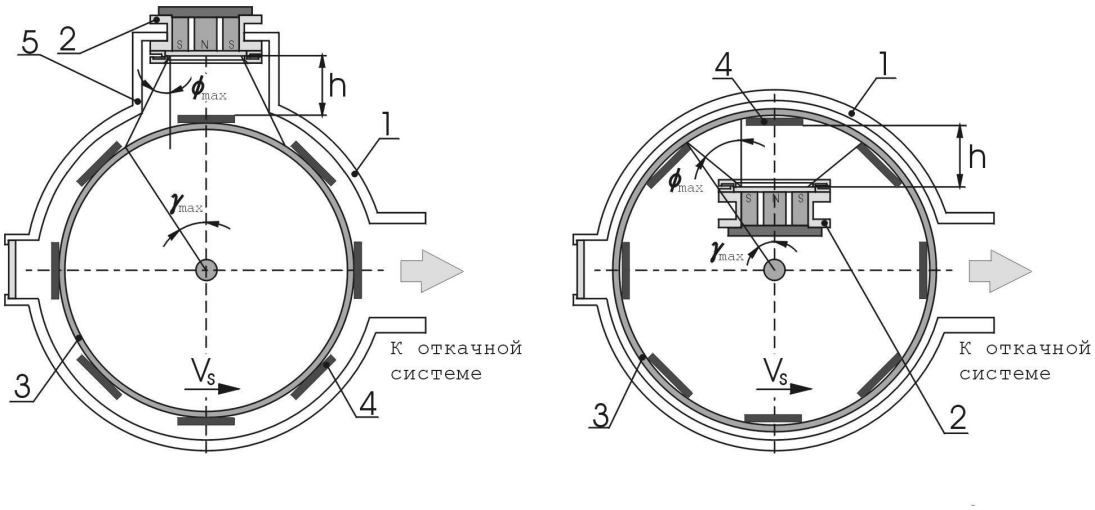


Рис. 4.6. Схема экспериментальной установки для нанесения тонких пленок на полимерные пленки: 1 – камера, 2 – ИИ, 3 – МРС, 4 – система перемотки ПЭТ пленки

При этом напряжение и ток разряда составляли U_t = 425 В, I_t = 7.0 А, соответственно. На полученных образцах с помощью прибора ИУС-3 измерялось поверхностное сопротивление пленки, и с использованием ранее полученной зависимости поверхностного сопротивления от толщины слоя металлизации, определялся профиль распределения толщины нанесенной пленки. На рис. 4.5 (кривая *б*) представлен измеренный профиль толщины слоя металлизации нанесенного при линейном перемещении ПЭТ пленки. Как видно смоделированный профиль распределения толщины нанесенного слоя практически совпадает с полученным экспериментальным профилем. Как видно разработанная модель позволяет с погрешностью не более 5 % предсказывать профиль толщины наносимых слоев методом магнетронного распыления при линейном перемещении подложки. Однако поскольку в модели не учитываются эффекты термализации распыленного потока, данная модель может использоваться только для моделирования процессов магнетронного нанесения слоев при рабочем давлении в зоне нанесения не более 0,5 – 1,0 Па.

4.3. Расчет распределения толщины микроразмерных слоев на барабанные подложкодержатели

Схема установки магнетронного нанесения тонкопленочных слоев на барабанный подложкодержатель приведена на рис. 4.7. Возможны два варианта конфигурации процесса: магнетрон располагается снаружи подложкодержателя (рис. 4.7 *а*), нанесение производится на подложки, расположенные на внешней поверхности барабана (конфигурация I), и магнетрон располагается внутри барабанного подложкодержателя (рис. 4.7 *б*), нанесение производится на подложки, расположенные на внутренней поверхности барабана (конфигурация II).



а *б*

Рис. 4.7. Конфигурации процесса магнетронного нанесения тонкопленочных слоев на барабанный подложкодержатель: *а* – внешнее расположение магнетрона относительно подложкодержателя (конфигурация I), *б* – магнетрон расположен внутри подложкодержателя (конфигурация II)

Установка состоит из вакуумной камеры (1) магнетронной распылительной системы (2) и барабанного подложкодержателя (3) на который устанавливаются подложки (4). Время нахождения подложки в зоне нанесения t_{dep} зависит от диаметра барабана d, расстояния мишень – подложка h, и скорости вращения барабана V_s. В некоторых установках зона нанесения ограничена анодом магнетрона или конструктивными элементами (5).

Рассмотрим особенности геометрической схемы модели системы МРС с протяженной зоной распыления – барабанный подложкодержатель (рис. 4.8). В нашем случае подложка перемещается перед магнетроном по круговой траектории. В зависимости от положения барабана изменяется расстояние от

точки распыления до точки конденсации распыленного потока и угол наклона подложки к нормали магнетрона. Поэтому в модели при расчете скорости нанесения необходимо в каждый момент времени определять угол распыления ϕ, угол конденсации φ и расстояние от точки распыления до точки конденсации l. Все эти характеристики могут быть определены из геометрических построений. Если максимальный угол распыления ϕ_{max} не ограничен анодом магнетрона или конструктивными элементами, то размер зоны нанесения зависит от соотношения размеров зоны распыления, расстояния мишень – подложка и диаметра барабана.

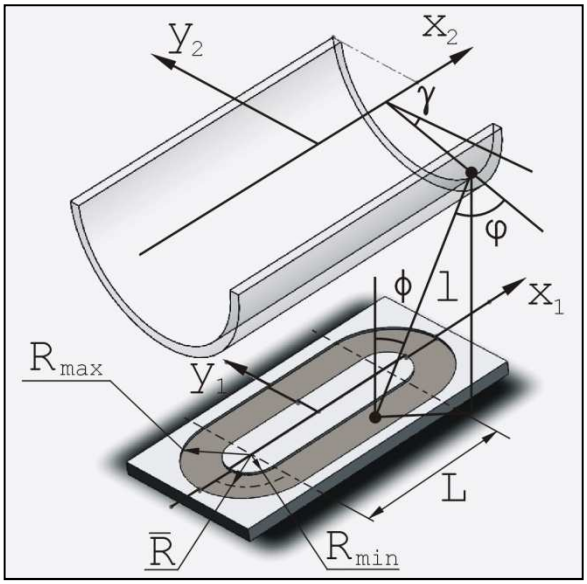


Рис. 4.8. Геометрическая схема модели системы МРС с протяженной зоной распыления – барабанный подложкодержатель

Скорость нанесения пленки из участка закругления зоны распыления с учетом угла наклона подложки будет формула (4.9) будет иметь вид

$$V_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R\min}^{R\max} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{r_1 \upsilon_t(r_1) \cos\varphi(r_1,\theta) \cos^n \phi(r_1,\theta)}{l^2(r_1,\theta)} dr_1 d\theta, \qquad (4.13)$$

где R_{min}, R_{max} – минимальный и максимальный радиус зоны эрозии мишени, r_1 – текущий радиус зоны распыления, $\upsilon_t(r_1)$ – скорость распыления материала мишени на радиусе r_1, ϕ – угол распыления, φ – угол конденсации, θ – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона, n – показатель степени косинуса угла распыления. Для протяженных участков зоны распыления с учетом угла наклона подложки формула (4.10) имеет вид

$$V_3(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R\min}^{R\max} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\upsilon_t(x_1) \cos\varphi(x_1, y_1) \cos^n \phi(x_1, y_1)}{l^2(x_1, y_1)} dx_1 dy_1, \qquad (4.14)$$

где L – длина прямолинейного участка зоны распыления мишени, (x_1, y_1) – координаты текущей точки распыления.

На рис. 4.9 представлены рассчитанные с использованием представленных выше формул профили распределения скорости нанесения слоев при различном угле поворота барабанного подложкодержателя относительно длинной оси протяженного магнетрона МСПР-616 при внутреннем расположении магнетрона (конфигурация I). Для расчета использовались следующие исходные данные: материал мишени – Al 99.996 % (Y_{Al} = 0.35, γ_{Al} = 0.01, A_{Al} = 27 а.е.м, ρ_{Al} = 2700 кг/м^3).

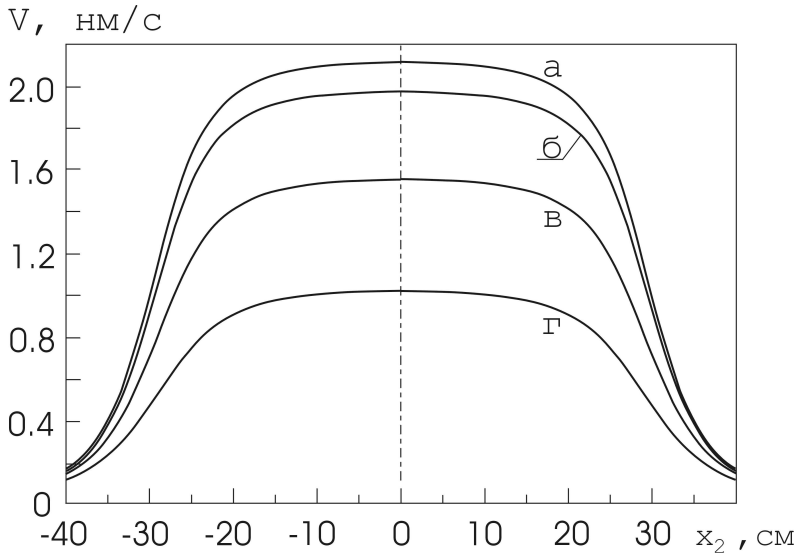


Рис. 4.9. Распределение скорости нанесения пленки при различном угле поворота барабанного подложкодержателя относительно длинной оси протяженного магнетрона МСПР-616 для I-ой конфигурации процесса : *а* – 0 рад, *б* – 0.2 рад, *в* – 0.4 рад, *г* – 0.6 рад

Минимальный, средний и максимальный радиусы зоны эрозии мишени принимались равными соответственно R_{min} = 4 мм, $\overline{R}$ = 22.5 мм, R_{max} = 44 мм, длина прямолинейного участка зоны распыления L = 514 мм. Диаметр барабана 360 мм, расстояние мишень – подложка 80 мм. Скорость вращения барабана 1.5 об/мин. Ток разряда I_t = 5.7 А. На рис. 4.10 представлены результаты расчета зависимости скорости нанесения слоев Al на короткой оси протяженного магнетрона от угла поворота подоложкодержателя для I-ой (кривая *а*) и II-ой (кривая *б*) конфигураций процесса.

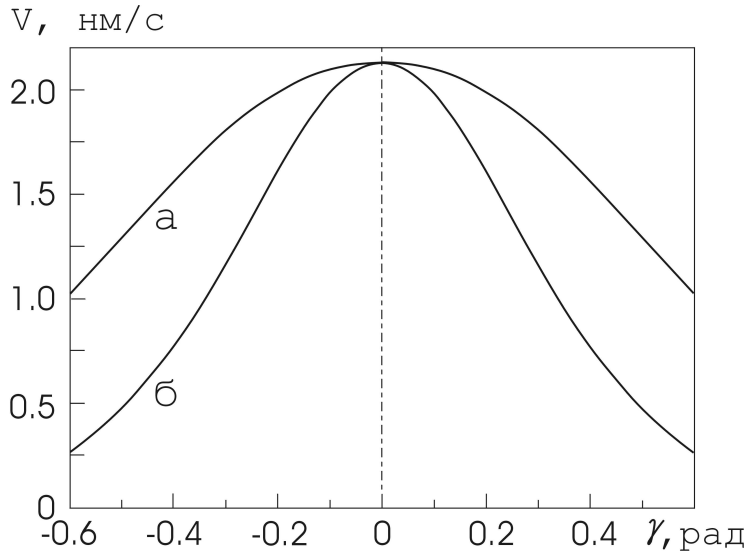


Рис. 4.10. Расчетные зависимости скорости нанесения пленки на короткой оси магнетрона от угла поворота подложкодержателя для двух конфигураций процесса: *а* – при внутреннем расположении магнетрона, *б* – при внешнем расположении магнетрона

Используемые при расчетах параметры процесса одинаковы для двух конфигураций и приведены выше. Как видно при внутреннем расположении магнетрона скорость нанесения на краях зоны нанесения снижается значительно медленней, чем при внешнем расположении магнетрона, что позволяет более эффективно наносить пленки.

Рассчитаем толщину нанесенной пленки при перемещении подложки на барабанном подложкодержателе (см. рис. 4.7 *а*). Если известна угловая скорость вращения барабана V_s и протяженность зоны нанесения, то время нахождения подложки в зоне нанесения

$$t_{dep} = \frac{2\gamma_{\max}}{V_s}, \qquad (4.15)$$

где γ_{max} – максимальный угол отклонения барабана от оси магнетрона, при котором распыленный поток конденсируется на подложке (отсутствует эффект затенения). Если зона нанесения не ограничена конструктивными элементами, то максимальный угол поворота барабана, при котором распыленный поток будет конденсироваться на подложке, можно определить из геометрических построений как касательная к окружности барабана, проведенная из точки распыления (рис. 4.7 *а*). В случае если наличия конструктивных элементов протяженность зоны нанесения $2\gamma_{max}$ определяется исходя из максимального угла распыления ϕ_{max}.

Толщина нанесенной пленки на расстоянии x_2 от короткой оси магнетрона при однократном проходе подложки через зону нанесения будет

$$w(x_2) = \int_{-\frac{t_{dep}}{2}}^{\frac{t_{dep}}{2}} V(x_2, t \times V_s) dt, \qquad (4.16)$$

где $V(r_2, t \times V_s)$ – скорость нанесения в точке $t \times V_s$ на расстоянии x_2 от короткой оси магнетрона. За время процесса общая толщина нанесенной пленки составит

$$W(x_2) = w(x_2) z_k \qquad (4.17)$$

где z_k – количество оборотов подложкодержателя за время процесса магнетронного нанесения.

Представленные выше рассуждения могут быть использованы для расчета профилей толщины слоев при расположении магнетрона внутри барабанного подложкодержателя (конфигурация II) (см. рис. 4.7 *б*). В данном случае размер зоны нанесения зависит только от расположения анода или конструктивных элементов, ограничивающих распыленный поток. Поэтому при внутреннем расположении магнетрона необходимо задаваться максимальным углом распыления ϕ_{max}.

Для верификации предложенной модели проведены экспериментальные исследования по нанесению тонкопленочных слоев методом магнетронного распыления. Использовались две конфигурации процесса магнетронного распыления: I–магнетрон располагается снаружи барабанного подложкодержателя (см. рис. 4.7 *а*), и II – магнетрон располагается внутри барабанного подложкодержателя (см. рис. 4.7 *б*). Для нанесения слоев на внешнюю поверхность барабанного подложкодержателя использовалась магнетронная распылительная система МАС-80. Распыление мишеней из Al (чистота 99.996 %) и W (чистота 99.9 %) ∅ 80 мм осуществлялось в атмосфере Ar. При нанесении слоев камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 1.5×10^{-3} Па. Предварительно производилась очистка подложек с помощью ионного источника на основе ускорителя с анодным слоем. Для этого в ионный источник подавался Ar до рабочего давления 2.0×10^{-2} Па. Время очистки, энергия ионов и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли соответственно 3 мин, 700 эВ, 40 мА. После этого производилась очистка поверхности мишени путем ее распыления на заслонку. Для этого в газораспределительную систему магнетрона подавался Ar. В процессе очистки мишени параметры процесса были постоянными и составляли: расход рабочего газа Q_{Ar} = 65 мл/мин, ток разряда I_t = 2.0 А,

напряжение разряда U_t = 455 В при распылении Al мишени и U_t = 410 В при распылении W мишени, время очистки мишени 5 мин.

Тонкопленочные слои наносились на стеклянные подложки, которые располагались на внешней поверхности подложкодержателя ∅ 215 мм. При этом расстояние мишень – подложка на оси магнетона составляло 85 мм. Скорость вращения подложкодержателя 7.5 об/мин. Пленки наносились при следующих условиях: поток Ar в камеру Q_{Ar} = 65 мл/мин, рабочее давление p = 0.06 Па, ток разряда МРС поддерживался постоянным и составлял I_t = 2.0 А. При этом напряжение разряда составляло U_t = 455 В при распылении Al мишени и U_t = 410 В при распылении W мишени. Время нанесения 15 мин.

В случае нанесения слоев на внутреннюю поверхность барабанного подложкодержателя применена магнетронная распылительная система протяженного типа МСПР-616 [10, 11]. Для распыления использовалась мишень из Al (чистота 99.996 %) размером 616×100×10 мм. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 2.0×10^{-3} Па. Предварительно производилась очистка подложек с помощью протяженного ионного источника на основе ускорителя с анодным слоем. Для этого в ионный источник подавался Ar до рабочего давления 2.0×10^{-2} Па. Время очистки, энергия ионов и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли соответственно 3 мин, 700 эВ, 150 мА. После этого производилась очистка поверхности мишени путем ее распыления на заслонку. Рабочий газ Ar подавался в область разряда магнетрона. Расход рабочего газа составлял 65 мл/мин. В процессе очистки мишени параметры процесса были постоянными и составляли: ток разряда I_t = 5.7 А, напряжение разряда U_t = 380 В, время распыления мишени 5 мин.

Тонкопленочные слои наносились на стеклянные подложки размером 700×50 мм, которые располагались на внутренней поверхности барабанного подложкодержателя ∅ 360 мм. Подоложкодержатель перемещался со скоростью 1.5 об/мин на минимальном расстоянии 80 мм от поверхности мишени магнетрона. Поток Ar в камеру Q_{Ar} = 40 мл/мин, при этом давление в камере составляло p = 5.2×10^{-2} Па. Нанесение слоев осуществлялось при двух различных режимах: 1. мощность разряда МРС поддерживалась постоянной и составляла P_t = 2.0 кВт, время нанесения 10 мин. При этом напряжение и ток разряда составляли U_t = 380 В, I_t = 5.7 А, соответственно; 2. мощность разряда МРС поддерживалась постоянной и составляла P_t = 1.0 кВт. При этом напряжение и ток разряда составляли U_t = 320 В, I_t = 3.1 А, соответственно.

Время нанесения 12 мин. Толщина нанесенных слоев определялось с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08.

Проведены исследования профилей распределения толщины слоев Al, нанесенных методом магнетронного распыления на внешнюю поверхность барабанного подложкодержателя (конфигурация I). На рис. 4.11 кривая *а* представляет результаты измерения распределения толщины слоя Al. На том же рисунке (кривая *в*) представляет результаты моделирования распределения скорости нанесения. При расчетах использовались следующие исходные данные: ток разряда магнетрона I_t = 2.0 А, минимальный, средний и максимальный радиусы зоны распыления магнетрона соответственно R_{min} = 6.5 мм, $\overline{R}$ = 20.5 мм, R_{max} = 32.5 мм, расстояние мишень – подложка 85 мм, подложка вращается на барабане ∅ 215 мм со скоростью 7.5 об/мин, коэффициент ионно-электронной эмиссии материала мишени γ_{Al} = 0.01, плотность ρ_{Al} = 2700 кг/м^3, коэффициент распыления Y_{Al} = 0.35 (табличное значение Y_{Al} = 0.35 при 200 эВ, Y_{Al} = 1.0 при 500 эВ).

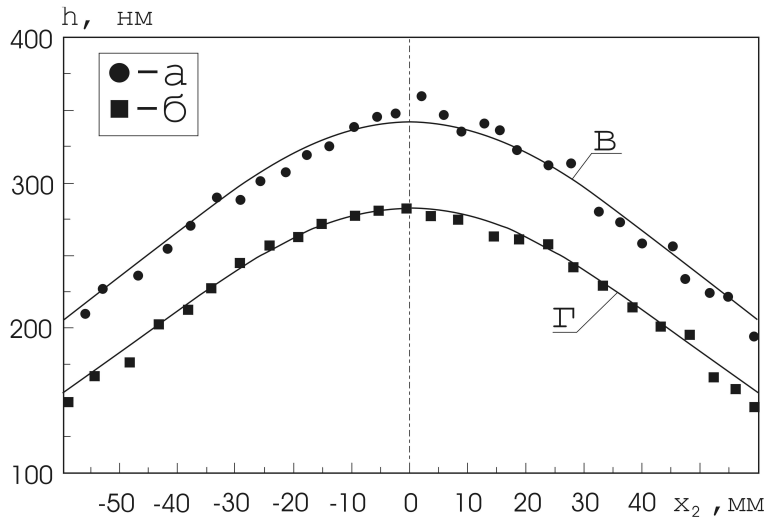


Рис. 4.11. Профили распределения толщины тонкопленочных слоев, нанесенных методом магнетронного распыления на внешнюю поверхность барабанного подложкодержателя: *а* – измеренное распределение толщины пленки Al, *б* – измеренное распределение толщины пленки W, *в* – результаты моделирования распределения толщины пленки Al, *г* – результаты моделирования распределения толщины пленки W

Для более точной верификации модели также проведены изменения профилей распределения толщины пленок вольфрама, нанесенных при аналогичной конфигурации процесса. На рис. 4.11, *б* представлен измеренный

профиль распределения толщины пленки, полученной при распылении W мишени. Также на рис. 4.11 (кривая *г*) представлены результаты моделирования распределения толщины нанесенных слоев при распылении W мишени. Для расчетов принято: коэффициент ионно-электронной эмиссии γ_W = 0.01, плотность ρ_W = 19300 кг/м^3, A_W = 183.84 а.е.м, коэффициент распыления Y_W = 0.305 (табличное значение коэффициента распыления вольфрама Y_W = 0.3 при 200 эВ, Y_W = 0.55 при 500 эВ). Как видно расчетные профили распределения толщины нанесенного слоя практически совпадает с экспериментальными данными. Погрешность моделирования не превышает 10 %.

Для верификации модели при II-ой конфигурации процесса проведены эксперименты по нанесению слоев Al протяженной магнетронной распылительной системой МСПР-616 на внутреннюю поверхность барабанного подложкодержателя. На рис. 4.12 представлены результаты измерения распределения толщины пленок Al полученных при двух различных режимах нанесения: ток разряда I_t = 5.7 А, время нанесения t = 10 мин (точки *а* и *б*) и I_t = 3.1 А, t = 12 мин (точки *в*).

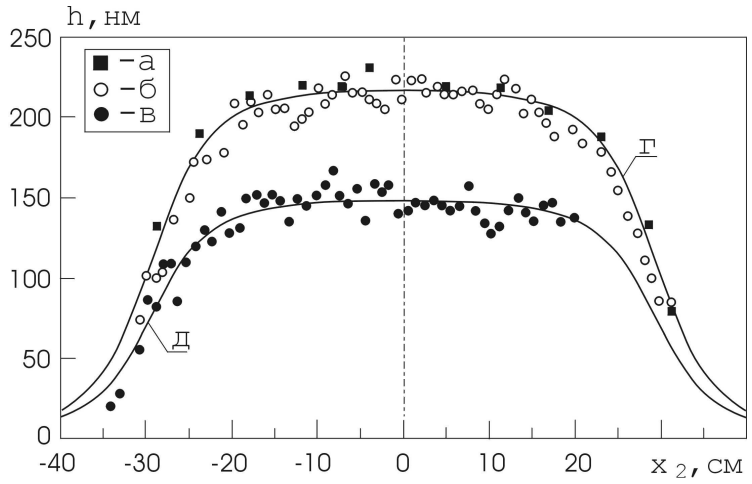


Рис. 4.12. Профили распределения толщины тонкопленочных слоев, нанесенных методом магнетронного распыления на внутреннюю поверхность барабанного подложкодержателя: (*а*, *б*) – измеренные распределения толщины пленки Al (I_t = 5.7 А, t = 10 мин), (*в*) – измеренные распределения толщины пленки Al (I_t = 3.1 А, t = 12 мин), (*г*, *д*) – результаты моделирования распределения толщины пленки Al для соответствующих режимов нанесения

Для сравнения на том же рисунке представлены результаты моделирования распределения толщины слоя Al, нанесенного методом магнетронного распыления на внутреннюю поверхность барабанного

подложкодержателя (кривые *г, д*). Для расчета использовались следующие исходные данные: материал мишени – Al (Y_{Al} = 0.35, γ_{Al} = 0.01, A_{Al} = 27 а.е.м, ρ_{Al} = 2700 кг/м^3). Минимальный, средний и максимальный радиусы зоны эрозии мишени принимались равными соответственно R_{min} = 4 мм, $\overline{R}$ = 22.5 мм, R_{max} = 44 мм, длина прямолинейного участка зоны распыления L = 514 мм. Расстояние мишень – подложка 80 мм. Как видно и для II-ой конфигурации процесса результаты моделирования практически совпадают с экспериментальными профилями. Погрешность модели для данной конфигурации процесса не превышала 10 %. На практике наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов и для других параметров процесса нанесения.

4.4. Расчет элементного состава микроразмерных слоев при магнетронном распылении мозаичных мишеней

Одной из тенденций развития метода магнетронного распыления является использование для нанесения многокомпонентных тонких пленок так называемых составных или “мозаичных мишеней”, т.е. мишеней состоящих из матрицы одного металла со вставками других металлов [12]. Метод позволяет получать многокомпонентные пленки с произвольным количеством и содержанием элементов при использовании одного магнетрона. Преимущество магнетронного распыления мозаичных мишеней особенно проявляется в случаях, когда необходимо получить пленки, в состав которых входят элементы с низкой взаимной растворимостью или большой разницей в температурах плавления. Мозаичная мишень представляет собой основу (основная матрица), выполненную из материала *A* и мозаичных вставок из материала *B*, расположенных на этой основе (рис. 4.13). Вставки располагаются равномерно по радиусу максимальной эрозии мишени. Размер вставок, а также их количество зависит от требуемого содержания материала *B* в нанесенной пленке. Чаще всего мишень изготавливается с таким расчетом, чтобы вся площадь вставок попадала в зону распыления.

Материал *A* имеет относительную атомную массу A_A, плотность ρ_A, коэффициент распыления Y_A, и коэффициент ионно-электронной эмиссии γ_A, а материал *B* имеет относительную атомную массу A_B, плотность ρ_B, коэффициент распыления Y_B, и коэффициент ионно-электронной эмиссии γ_B. Модель будем строить для случая аксиальных магнетронных распылительных систем с планарной мишенью.

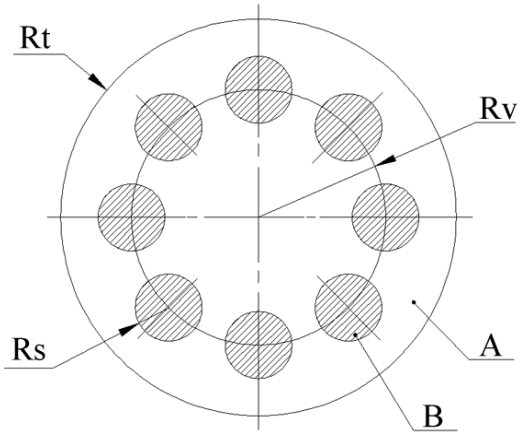


Рис. 4.13. Геометрическая модель мишени: *A* – основа мишени; *B* – вставки, R_t – радиус мишени, R_s – радиус вставок, R_v – радиус размещения вставок

В нашем случае подложка размещается параллельно плоскости мишени, и угол распыления равен углу конденсации, т.е. $\phi = \varphi$. Для определения вклада в скорость нанесения от основы и вставок возможно использовать два метода расчета: 1. на каждом радиусе зоны распыления определяется часть окружности занятая вставками и считается, что скорость распыления вставок пропорциональна соотношению между длиной окружности и суммарной длиной вставок; 2. положение вставок задается аналитически с помощью уравнения. Первый метод является более простым для расчета. При данном методе зона распыления разделяется на три участка (рис. 4.14): участок I – от R_{min} до R_{min1}, и участок III – от R_{max1} до R_{max}, где присутствует только материал основы, и участок II от R_{min1} до R_{max1}, где окружность текущего радиуса пересекает вставки. На каждом радиусе участка II-ой зоны распыления определяется часть длины окружности занятая вставками материала *B*

$$M(r_1) = n\frac{\sqrt{R_v^2 - (R_s - r_1)^2}}{\pi r_1}, \qquad (4.18)$$

где n – количество вставок, R_v – радиус вставки, R_s – радиус расположения центров вставок.

Скорость нанесения материала основы с I-го и III-го участков $F_1(x_2)$ и $F_1(x_2)$ рассчитывается по формуле (4.9) с учетом пределов интегрирования от R_{min} до R_{min1} для I-го участка и от R_{max1} до R_{max} для III-го участка.

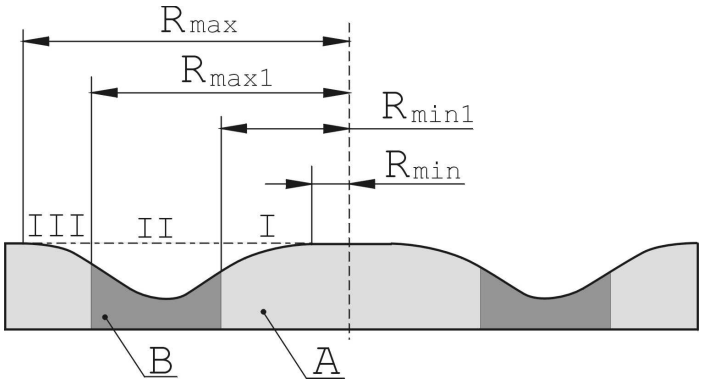


Рис. 4.14. Зона распыления мозаичной мишени магнетрона

На участке II, где располагаются вставки часть окружности $M(r_1)$ занята вставками. Скорость нанесения материала основы будет

$$F_2(x_2)=\frac{1}{\pi}\int_{R_{\min 1}}^{R_{\max 1}}\int_0^{2\pi}\frac{v_o(r_1)r_1(1-M(r_1))\cos^2\varphi(x_2,r_1,\alpha)}{L^2(x_2,r_1,\alpha)}dr_1d\alpha, \qquad (4.19)$$

где v_o – скорость распыления основы. Общая скорость нанесения материала основы рассчитывается как сумма скоростей нанесения из всех трех участков мишени

$$F_o(x_2)=F_1(x_2)+F_2(x_2)+F_3(x_2). \qquad (4.20)$$

Скорость нанесения материала вставок рассчитывается по формуле

$$F_v(x_2)=\frac{1}{\pi}\int_{R_{\min 1}}^{R_{\max 1}}\int_0^{2\pi}\frac{v_v(r_1)r_1M(r_1)\cos^2\varphi(x_2,r_1,\alpha)}{L^2(x_2,r_1,\alpha)}dr_1d\alpha \qquad (4.21)$$

где v_v – скорость распыления вставок.

Процентный состав материала вставок в нанесенной пленке рассчитывается как

$$T(x_2)\%=\frac{F_v(x_2)\times 100}{F_o(x_2)+F_v(x_2)}. \qquad (4.22)$$

Скорость нанесения компонентной пленки по толщине определялся как сумма скоростей нанесения материала основы и вставок

$$V(x_2)=F_o(x_2)\frac{A_o}{N_A\rho_o}+F_v(x_2)\frac{A_v}{N_A\rho_v}, \qquad (4.23)$$

где A_o, ρ_o, A_v, ρ_v, – атомная масса и плотность материалов основы и вставок соответственно.

Метод позволяет рассчитать элементный состав и скорость нанесения пленки при распылении мишени, состоящей из произвольного количества вставок различных элементов. Однако он не позволяет определить неравномерность распределения концентраций элементов при малом расстоянии мишень – подложка, когда начинают играть роль эффекты

преимущественного нанесения материала вставки на участке подложки, расположенном напротив вставки. В данном случае более предпочтительным является метод, при котором размещение вставок задается аналитически с помощью уравнения

$$(x_1 - x_k)^2 + (y_1 - y_k)^2 < R_v^2, \qquad (4.24)$$

где (x_k, y_k) – координаты k-ой вставки, (x_1, y_1) – текущие координаты. В процессе интегрирования определяется относится ли текущая координата к основе или вставкам и в зависимости от распыляемого материала суммируется вклад в скорость нанесения основы или вставок.

Для верификации предложенной модели проведены исследования по распылению Ti-Zr и Ti-Zr-Pb мозаичных мишеней. Ti-Zr мозаичная мишень представляла собой Ti основу (99.95 % чистоты) ∅ 80 мм и толщиной 5 мм в которую впрессованы восемь цилиндрических Zr вставок ∅ 13 мм. Вставки равномерно распределены по диаметру 42.5 мм. Ti-Zr-Pb мозаичная мишень состояла из Ti основы (99.95 % чистоты) ∅ 80 мм и толщиной 5 мм в которую впрессованы четыре циркониевые ∅ 12 мм и четыре свинцовые вставки ∅ 10.5 мм. Вставки равномерно распределены по диаметру 42.5 мм.

Камера вакуумной установки ВУ-2МП была оборудована магнетронной распылительной системой МАС-80 и ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем. Ионный источник использовался для предварительной ионной очистки поверхности подложек. В качестве подложек использовался Si (100). Подложки устанавливались на вращаемый барабанный подложкодержатель ∅ 215 мм и последовательно подводились в зону очистки и зону нанесения. При этом расстояние мишень магнетрона – подложка на оси магнетрона составляло 85 мм. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 2×10^{-3} Па и производилась ионная очистка подложек. Для этого в ассистирующую ступень ионного источника подавался Ar до рабочего давления 2.0×10^{-2} Па (Q_{Ar} = 25 мл/мин). Очистка производилась в режиме вращения барабанного подложкодерожателя. Время очистки, энергия ионов и ток разряда во всех экспериментах было постоянным и составляло 3 мин, 500 эВ, 70 мА соответственно. Затем производилась предварительная очистка поверхности мишени. Для этого подложки отводились от зоны распыления. В газораспределительную систему магнетрона подавался Ar. Поток аргона в камеру составлял Q_{Ar} = 65 мл/мин и контролировался автоматическим регулятором расхода газа РРГ-1. Очистка мишени производилась в режиме стабилизации мощности разряда P_t = 500 Вт. При этом напряжение разряда

составляло U_t = 400 – 450 В при токе разряда I_t = 1.1 – 1.25 А, время очистки мишени 4 мин. Распыление мозаичных мишеней осуществлялось методом магнетронного распыления в режиме стабилизации тока разряда. Поток Ar в камеру при распылении Ti-Zr и Ti-Zr-Pb мишеней составлял соответственно 50 мл/мин и 65 мл/мин. Время нанесения слоев 10 мин. Распыление Ti-Zr мишени осуществлялось при следующих условиях: ток разряда I_t = 3.0 А, напряжение разряда U_t = 445 В. При распылении Ti-Zr-Pb мишени напряжение и ток разряда были соответственно I_t = 1.0 А, U_t = 402 В. Распределение толщины нанесенных слоев определялось с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Элементный состав нанесенных пленок анализировался методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) при помощи рентгеновского флуоресцентного спектрометра Oxford ED-2000.

Проведены исследования распределения скорости нанесения и элементного состава нанесенных слоев при магнетронном распылении Ti-Zr мозаичной мишени. Отмечено, что вследствие различия скоростей распыления различных материалов мишени в процессе выработки мишени в зависимости от скорости распыления материалов происходит заглубление вставок или основы Эти процессы могут влиять на изменение соотношения элементов в нанесенной пленке в процессе эксплуатации мишени. На рис. 4.15 (кривая *а*) представлены результаты измерения распределения толщины нанесенной пленки при магнетронном распылении Ti-Zr мозаичной мишени. Скорость нанесения на оси магнетрона составила 0.46 нм/с. Полученный профиль практически не отличается от профилей скорости нанесения однокомпонентных мишеней. Для сравнения на рис. 4.15 (кривая *б*) представлен результаты моделирования профиля распределения толщины Ti-Zr пленки. При расчетах использовались следующие параметры мишени: основа Ti ∅ 80 мм, коэффициент распыления Y_{Ti} = 0.26 (0.5 при 500 эВ), плотность ρ_{Ti} = 4.54 г/см^3, вставки Zr ∅ 13 мм, количество 8 штук (коэффициент распыления Y_{Zr} = 0.3 (0.63 при 500 эВ), плотность ρ_{Ti} = 6.50 г/см^3). Вставки расположены по диаметру 42.5 мм. Параметры зоны распыления: R_{min} = 4.5 мм, $\overline{R}$ = 19.5 мм, R_{max} = 32.6 мм. Ток разряда I_t = 3.0 А, время нанесения 10 мин. Расстояние мишень – подложка 85 мм. Как видно рассчитанный профиль практически совпадает с экспериментальными данными.

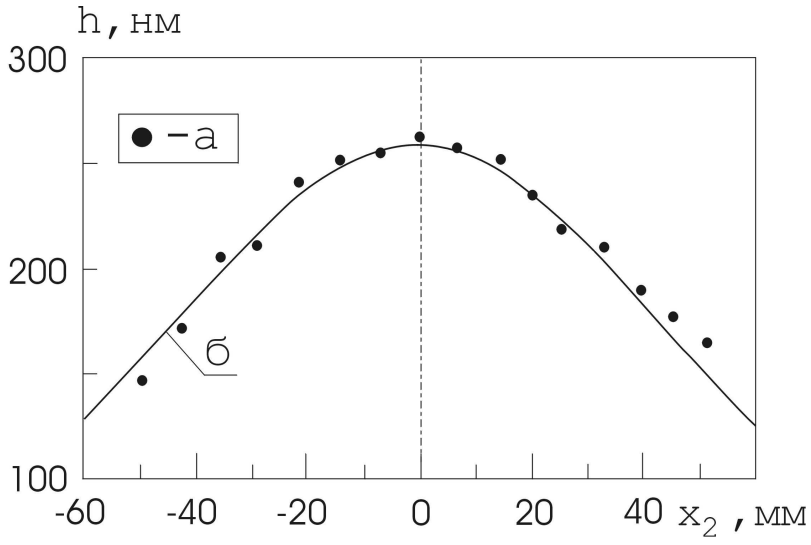


Рис. 4.15. Профиль распределения толщины нанесенной пленки при магнетронном распылении Ti-Zr мозаичной мишени:
а – результаты измерения, *б* – результаты моделирования

На рис. 4.16 представлены результаты моделирования распределения скорости нанесения Ti и Zr. В результате моделирования получены следующие концентрации элементов в нанесенной пленке Ti – 39.04 ат. %, Zr – 60.96 ат. %, что в пересчете на весовые проценты дает содержание Ti 25.5 вес. %, и Zr 74.85 вес. % соответственно. Измерения элементного состава нанесенных пленок методом рентгенофлуоресцентного анализа показали, что в нанесенной пленке содержание Ti составляло 73.42 ат. % и содержание Zr 26.3 ат. %. Результаты моделирования показывают, что на расстоянии 85 мм от поверхности мишени распределение элементов имеет высокую равномерность по площади подложки. Анализ результатов верификации модели показывает, что погрешность метода при расчете двухкопонентной мишени не превышает 10 %.

Проведены исследования распределения скорости нанесения и элементного состава нанесенных слоев при магнетронном распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени. На рис. 4.17 (*а*) представлены результаты измерения толщины нанесенных слоев при магнетронном распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени. Скорость нанесения на оси магнетрона составляла 1.55 нм/с. На рис. 4.17 (кривая *б*) представлены результаты моделирования профиля распределения толщины нанесенной пленки при распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени.

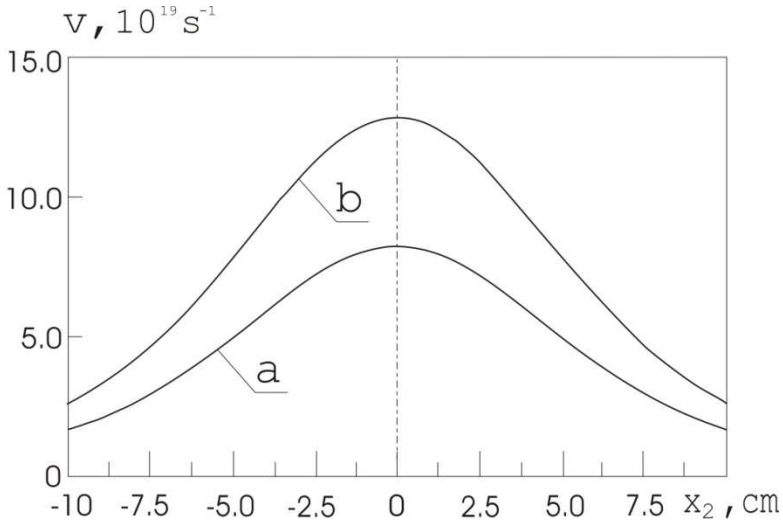


Рис. 4.16. Рассчитанные распределения скорости нанесения элементов при распылении Ti-Zr мозаичной мишени: *а* – скорость нанесения Ti, *б* – скорость нанесения Zr

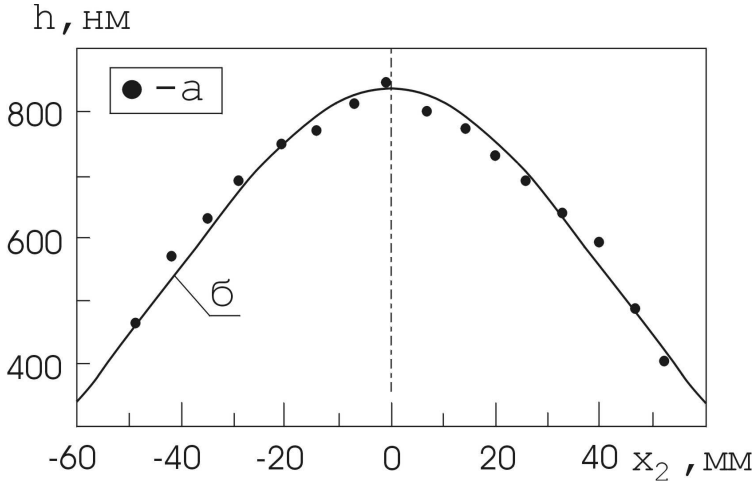


Рис. 4.17. Профили распределения толщины нанесенной пленки при магнетронном распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени: *а* – результаты измерений, *б* – результаты моделирования

При расчетах использовались следующие параметры мишени: основа Ti ∅ 80 мм, вставки Zr ∅ 12 мм, количество 4 штуки, вставки Pb ∅ 10.5 мм, количество 4 штуки. Вставки расположены по диаметру 42.5 мм. Для Pb вставок при расчетах использовались следующие исходные данные: атомная масса A_{Pb} = 207.2 а.е.м., плотность ρ_{Pb} = 11.34 г/см^3, коэффициент распыления Y_{Pb} = 0.32 (2.3 при 500 эВ). Ток разряда I_t = 1.0 А, время нанесения 10 мин. Остальные характеристики материалов и параметры зоны распыления

представлены выше. Рассчитанный профиль распределения скорости нанесения достаточно точно совпадает с экспериментальными данными.

На рис. 4.18 представлены результаты моделирования распределения скорости нанесения элементов при распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени. Рассчитанная концентрация элементов в пленке составляет Ti – 50.7 ат. %, Zr – 26.71 ат. %, Pb – 22.58 ат. %, что в пересчете на весовые проценты дает содержание Ti 25.43 вес. %, и Zr 25.53 вес. %, Pb 49.035 вес. % соответственно. Анализ нанесенных слоев методом РФА показал, что в состав нанесенной пленки, полученной методом магнетронного распыления Ti-Zr-Pb мозаичной мишени, входят следующие элементы: Ti 25.25 вес. %, Zr 26.30 вес. %, Pb 48.45 вес. %. Как видно для трехкомпонентной мишени погрешность моделирования тоже составила менее 10 %, что позволяет использовать предложенные модели для предсказания концентрации элементов в нанесенной пленке при распылении мозаичных мишеней.

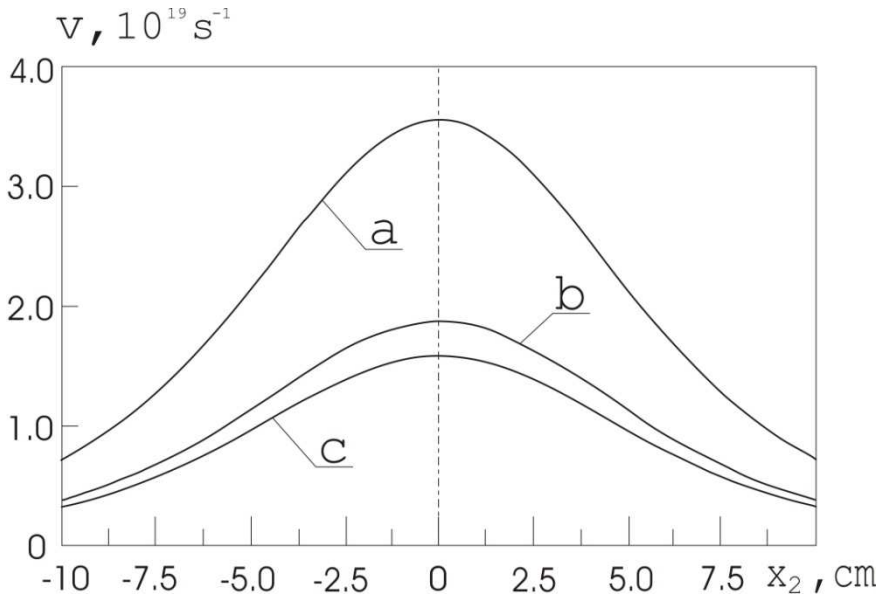


Рис. 4.18. Результаты моделирования распределения скорости нанесения элементов при распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени: *а* – скорость нанесения Ti, *б* – скорость нанесения Zr, *в* – скорость нанесения Pb

Список литературы к главе 4

1. Materials surface processing by directed energy techniques / Edited by Y. Pauleau, Elsevier.– 2006.– 722 p.

2. Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology.– 2000.– Vol. 125.–Pp. 322–330.

3. Arnell R.D., Kelly P.J. Recent advances in magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology.- 1999.- Vol. 112.- P. 170–176.

4. Кузмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления.- Киев: Аверс, 2008.- 244 с.

5. Kusumoto Y., Iwata K. Numerical study of the characteristics of erosion in magnetron sputtering // Vacuum.- 2004.- Vol. 74.- p. 359-365.

6. Nanbu K., Kondo S. Analysis of Three-dimensional DC magnetron discharge by the particle-in-cell/Monte Carlo method // Jpn. J. Appl. Phys.- 1997.- Vol. 36, Part 1.- P. 4808-4814.

7. Nanbu K., Segawa S., Kondo S. Self-consistent particle simulation of three-dimensional dc magnetron discharge // Vacuum.- 1996.- Vol. 47.- P. 1013-1016.

8. Czekaj D., Goranchev B., Hollmann E.K. Incident ion energy spectrum and target sputtering rate in dc planar magnetron // Vacuum.- 1991.- Vol. 42, № 1-2.- P. 43-45.

9. Прогнозирование эрозии мишени магнетронных распылительных систем / Д.А. Голосов [и др.] // Проблемы физики, математики и техники.- 2010.- Т. 2, № 3 - С. 62-67.

10. Ионно-плазменная система для нанесения многослойных структур методом реактивного ионно-лучевого и магнетронного распыления / Д.А. Голосов [и др.] // Вакуумная техника и технология.- 2010.- Т. 20, № 4.- С. 227-234.

11. Установка для нанесения многослойных тонкопленочных покрытий на внутреннюю поверхность крупноформатных цилиндрических объектов ионно-плазменными методами: пат. 2737 Респ. Беларусь, МПК7 С 23С 14/00 А.П. Достанко, И.В. Свадковский, Д.А. Голосов, С.М. Завадский; № u 20050503; заявл. 17.08.05; опубл. 15.02.06.- 6 с.

12. Thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia thin films prepared by magnetron sputtering / J. Nakano [et al.] //J. Ceram. Soc. of Jap.- 2004. Vol. 112.- P. 908-S911.

ГЛАВА 5
ФОРМИРОВАНИЕ МЕМБРАН МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ МИКРОННОЙ И СУБМИКРОННОЙ ТОЛЩИНЫ

5.1. Микромеханические системы

Многообразие конструкций датчиков обусловлено как большим числом измеряемых физических величин, так и физических явлений, лежащих в основе их работы [1]. Наиболее перспективными являются микромеханические датчики, в которых механические элементы могут преобразовывать сигнал какого-либо воздействия в механическое перемещение или, наоборот, механическое воздействие в информационный сигнал [2]. Преимуществами микромеханических датчиков являются малые габариты, малое энергопотребление, практически неограниченный ресурс работы, малая стоимость при массовом исполнении, устойчивость к большим перегрузкам, а также возможность интеграции с электронной частью прибора в одном кристалле полупроводника. Эти преимущества обусловили широкое применение микромеханических систем и приборов в различных областях техники для решения многих задач.

Типовая структура микросистемного датчика (рис. 5.1) содержит такие элементы конструкции как опорную рамку из кремниевой подложки и мембрану. Мембрана представляет собой гетеросистемную многослойную структуру, содержащую монокристаллический и поликристаллический кремний, диэлектрические и металлические слои.

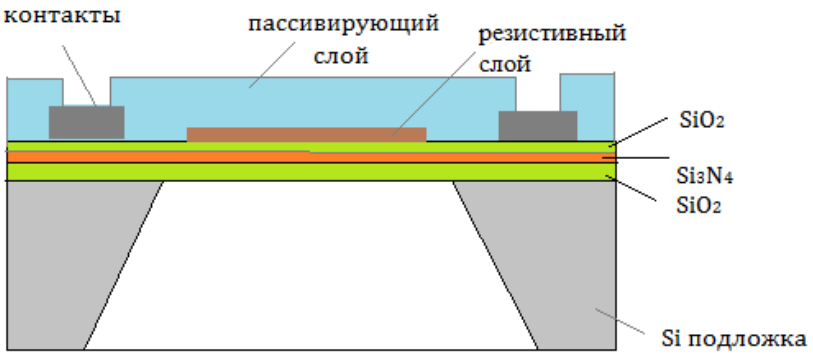


Рис. 5.1. Структура датчика расхода газа

Микросистемные датчики характеризуются следующими общими особенностями: способами преобразования внешних воздействий в механическое перемещение; способами преобразования механических перемещений в электрический сигнал и конструктивно-технологическими особенностями формирования элементов. Все микромеханические системы

изготавливают на кремниевой подложке с помощью базовых технологических процессов изделий интегральной электроники [3]. Поскольку основным элементом микромеханических датчиков является многослойная сбалансированная гетеросистемная мембрана, то для ее формирования применяют следующие базовые технологии:

1. Глубокое химическое и плазмохимическое травление кремния;

2. Химическое осаждение из газовой фазы слоев поликристаллического кремния, диоксида и нитрида кремния;

3. Нанесение в вакууме металлических слоев с заданными электрофизическими и механическими свойствами.

Кроме того, для формирования структур микросистемных датчиков широко используются технологии формирования структур кремний на изоляторе (КНИ).

5.2. Технология формирования элементов конструкций микромеханических систем

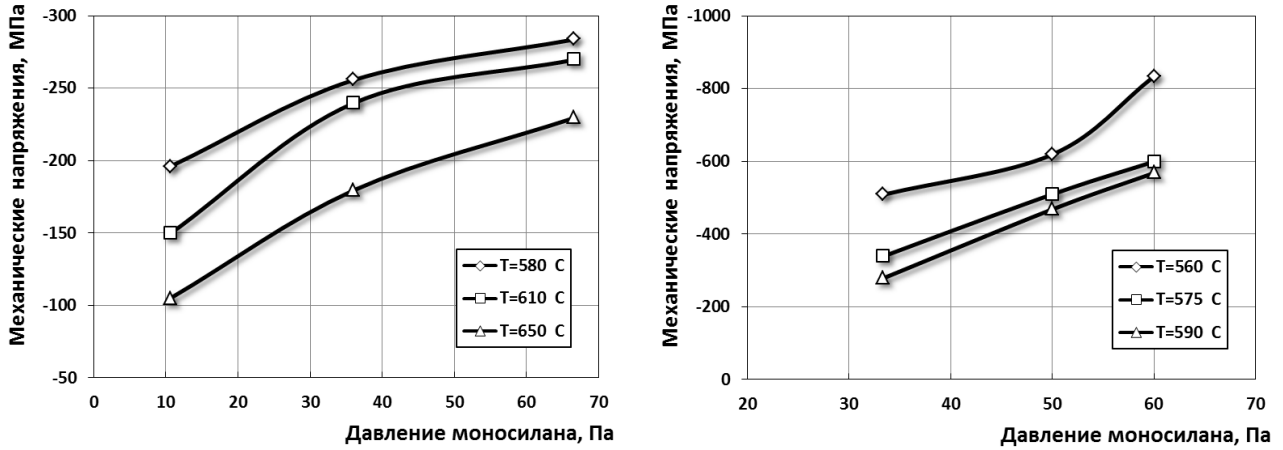
5.2.1. Осаждение слоев поликристаллического кремния

Пленки поликристаллического кремния (ПКК) нашли широкое применение в качестве материала мембран нагревателей мембран и контактных элементов микромеханических датчиков. Пленки ПКК, как правило, получают химическим осаждением из газовой фазы (ХОГФ) путем пиролиза моносилана при температуре 600 - 650 ºС в реакторах пониженного давления [4]. В качестве конструктивных элементов микромеханических систем наибольший интерес представляют пленки ПКК с минимальной величиной механических напряжений [5]. Известно, что свойства ПКК зависят от структуры пленки, а также от степени ее легирования. Для нелегированных пленок ПКК важнейшими факторами, влияющими на их структурно-механические свойства, являются температура процесса и давление моносилана (рис. 5.2, а). Наименьшая величина механических напряжений в пленках нелегированного ПКК достигается при увеличении температуры и уменьшении давлении моносилана [6].

Особый интерес представляют легированные пленки ПКК, используемые в качестве мембран микромеханических датчиков, и влияние условий их формирования на величину остаточных механических напряжений. Легирование пленок ПКК может осуществляться путем диффузии, ионной имплантации или введения легирующих добавок в газовую смесь в ходе их осаждения. В последнем случае в качестве источников легирующей примеси

используют фосфин или диборан [4]. Зависимость величины остаточных механических напряжений в пленках ПКК, легированных фосфором во время роста, от давления моносилана представлена на рис. 5.2, б [6].

Как и в случае с нелегированным ПКК остаточные механические напряжения растут с увеличением давления моносилана и снижаются с ростом температуры осаждения. Кроме того, механические напряжения растут с увеличением отношения расхода фосфина к моносилану и снижаются после активационного отжига осажденных пленок. Высокотемпературные обработки пленок ПКК могут вызвать перекристаллизацию поликремниевых зерен и приводить к переориентации пленки и существенному увеличению среднего размера зерна.



а б

Рис. 5.2 . Зависимость величины остаточных механических напряжений в пленках ПКК, осажденных при различной температуре, от давления моносилана: а – нелегированные пленки ПКК, б – пленки ПКК, легированные фосфором, полученные при отношении расходов моносилана и фосфина 0,001, после отжига при температуре 950 °С

Основное неудобство легирования пленок ПКК во время роста − сложность процесса. Поэтому во многих случаях используют процессы диффузионного легирования после осаждения (например, до удельного сопротивления 10^{-4} Ом/см) толщиной более 2 мкм. Однако, диффузия как высокотемпературный процесс (от 1170 до 1270 К) должна проводиться таким образом, чтобы гарантировать распределение примеси однородно по всей толщине пленки, так, чтобы были минимизированы связанные с примесью изменения в механических свойствах по толщине пленки.

Бор, который обычно используется в качестве легирующей примеси распространяется значительно быстрее в пленках ПКК, чем в монокремнии,

прежде всего благодаря коэффициенту диффузии вдоль границ зерна [7]. Эксплуатационные характеристики (поверхностное сопротивление пленки ПКК), которые определяют время нагрева можно обеспечить путем подбора толщины пленки поликристаллического кремния (рис. 5.3).

Механические напряжения в пленке ПКК зависят от температуры осаждения, легирования и температуры последующего отжига (рис. 5.4) [8]. Таким образом, пленки ПКК с заданными электрофизическими и механическими свойствами могут быть получены при соответствующих условиях осаждения, а также последующем легировании примесями.

5.2.2. Осаждение слоев нитрида кремния

Пленки нитрида кремния, характеризующиеся чрезвычайной химической стойкостью, используют как в качестве материала диэлектрических элементов конструкции микромеханических датчиков с удельным сопротивлением 10^{16} Ом×см в том числе, как для формирования мембран, так и для пассивации других элементов, в первую очередь металлических и поликремниевых, а также в качестве материала масок для формирования объемных структур путем химического травления.

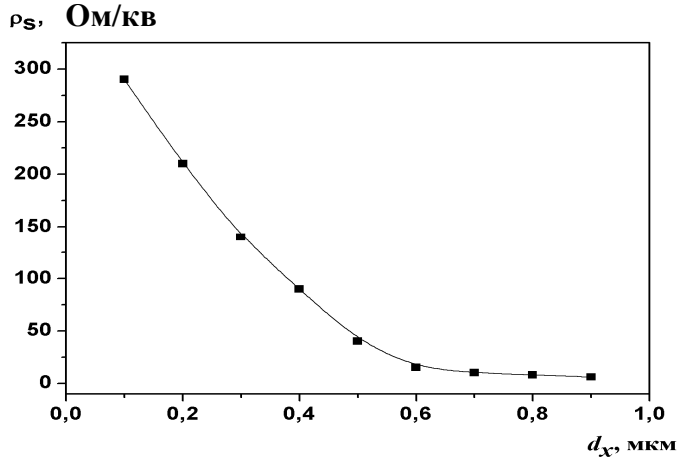


Рис. 5.3. Зависимость поверхностного сопротивления пленки ПКК от толщины

Пленки нитрида кремния, получают одним из двух способов. В первом из них производят ХОГФ пленок за счет реакции дихлорсилана с аммиаком при пониженном давлении и температуре в интервале 973 – 1073 К [9]:

$$3SiCl_2H_2 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 6HCl + 6H_2. \qquad (5.1)$$

Другим методом получения является плазмохимическое осаждение (ПХО) при температуре в интервале от 523 до 623 К путем реакции моносилана с аммиаком в аргоновой плазме или путем введения моносилана в азотный разряд:

$$SiH_4 + NH_3 \rightarrow SiNH + 3H_2, \quad (5.2)$$

$$2SiH_4 + N_2 \rightarrow 2SiNH + 3H_2. \quad (5.3)$$

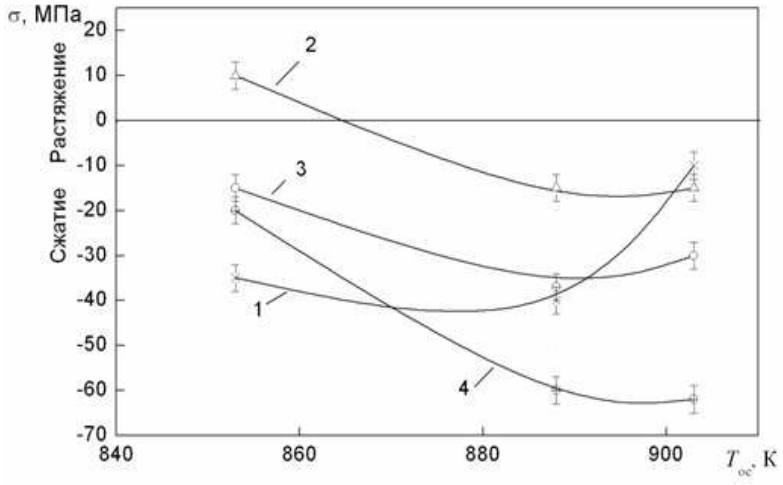


Рис. 5.4. Зависимость величины механических напряжений в пленках ПКК от температуры осаждения: 1 – нелегированные пленки после отжига при температуре 1000 °С; 2 – пленки, легированные бором; 3 – пленки, легированные бором, после отжига при температуре 1000 °С; 4 – пленки нелегированного без отжига

Пленки нитрида кремния, сформированные ПХО, насыщены водородом и обладают худшей химической стойкостью. Однако благодаря низкой температуре осаждения их используют для пассивации структур.

Пленки нитрида кремния, формируемые ХОГФ при пониженном давлении, характеризуются механическими напряжениями растяжения различной величины в зависимости от режимов нанесения, в первую очередь от температуры осаждения, рабочего давления и состава газовой среды. При типовых режимах нанесения остаточные напряжения пленок нитрида кремния, полученных при температуре осаждения 1073 К, давлении в реакторе 40 Па и соотношении расходов дихлорсилана и аммиака равном 1:4 отличаются существенными механическими напряжения растяжения величиной порядка 1300 МПа, что при толщине пленки свыше 0,2 мкм приводит к ее растрескиванию [9]. Поэтому, как правило, толщина пленок нитрида кремния не должна превышать 0,2 мкм.

Задача получения прочных мембранных структур площадью в несколько мм^2 толщиной от 1 до 2 мкм может быть решена использованием многослойной

мембраны, состоящей из последовательных слоев оксида и нитрида кремния. Различие в величине коэффициентов температурного расширения данных материалов позволяет скомпенсировать механические напряжения, возникающие в мембране при термоциклировании. Однако слой окисла кремния ухудшает тепловые характеристики мембраны, поэтому для повышения надежности и стабильности работы мембранных датчиков необходимо получить мембрану из нитрида кремния толщиной 0,8–1,5 мкм с малой величиной остаточных напряжений во всем рабочем диапазоне температур микромеханического датчика.

Данная проблема решается оптимизацией отношения расходов дихлорсилана к аммиаку. Как видно из рис. 5.5, при варьировании отношения расходов дихлорсилана и аммиака от 1 до 7 величина напряжений растяжения в пленках толщиной 0,8 мкм уменьшается от 950 МПа до 12 МПа. При этом также наблюдается уменьшение эффекта гидрогенизации, т.е. наличия в плёнке связанного водорода и образования химических связей Si–H и N–H в процессе роста [10]. Изменения в механических напряжениях пленки нитрида кремния объясняются изменением стехиометрии нитрида кремния.

Величина механических напряжений уменьшается с увеличением стехиометрического соотношения атомных концентраций Si/N от 0,9 до 1,3 и происходит резкий рост величины напряжений при значении стехиометрического коэффициента в диапазоне 0,6 – 0,8, т.е. при формировании пленки Si_3N_4. При значении стехиометрических соотношений атомных концентраций Si/N равном 0,6 наблюдается максимальная величина механических напряжений, а при избытке кремния можно получить пленку с величиной механических напряжений порядка 20 – 50 МПа при толщине 1,0 мкм (рис. 5.6).

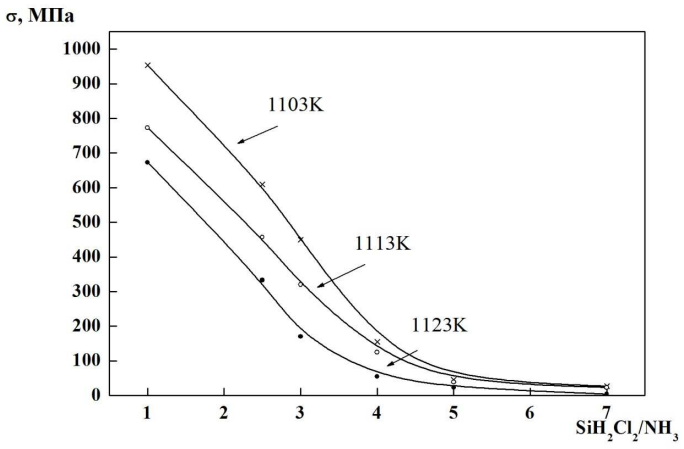


Рис. 5.5. Зависимость величины механических напряжений в пленках нитрида кремния от соотношения расходов дихлорсилана и аммиака

Установлено, что в сравнении с пленками стехиометрического нитрида кремния скорость травления пленок нитрида кремния с избытком кремния в растворах плавиковой кислоты уменьшается почти на порядок с 20 до 2 нм/мин, что дает возможность их использования в микромеханических датчиках, работающих в агрессивных средах.

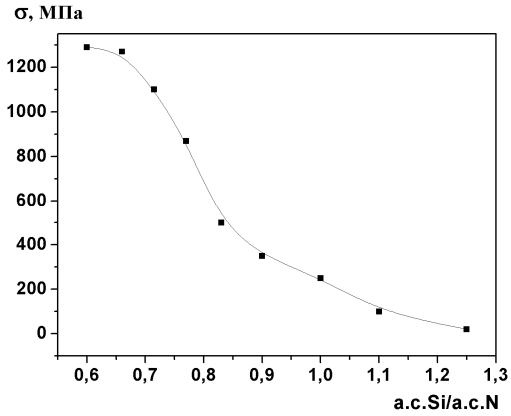
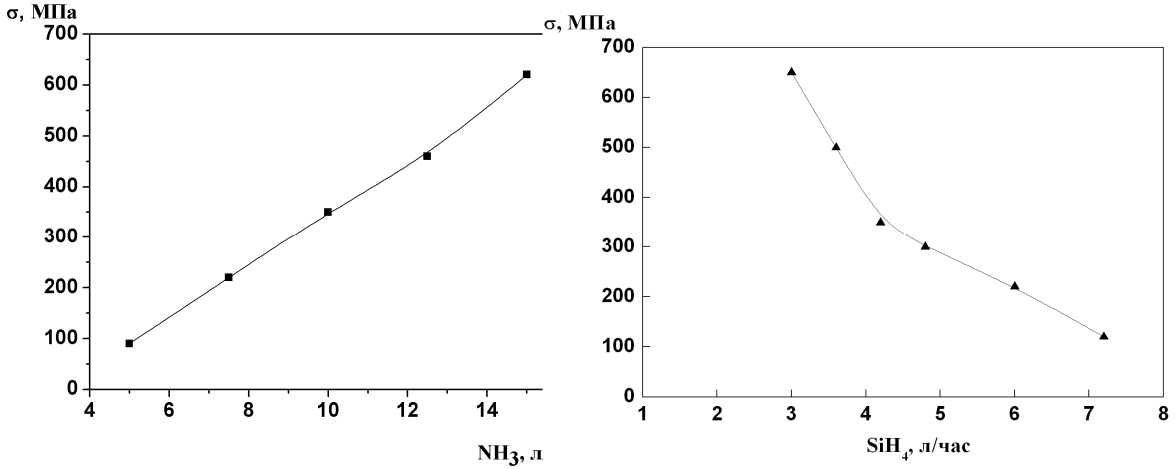


Рис. 5.6. Зависимость величины механических напряжений в пленках Si_xN_y от соотношений атомных концентраций

Важными преимуществами формирования пленок нитрида, осажденных ПХО, в сравнении с процессами с термической активацией являются значительно меньшая температура процесса, а также более высокая скорость осаждения [11]. Величина внутренних напряжений в пленках нитрида кремния, осажденных ПХО, также определяется условиями их формирования: состава газовой смеси, давления в реакторе, мощности плазмы, температуры подложки (рис. 5.7). Увеличение расхода аммиака приводит к росту механических напряжений в пленке, что обусловлено увеличением содержания в ней азота. Поскольку осажденный слой имеет более сильное отличие состава от материала подложки, то наблюдается снижение количества точек нуклеации, ответственных за рост пленки нитрида.

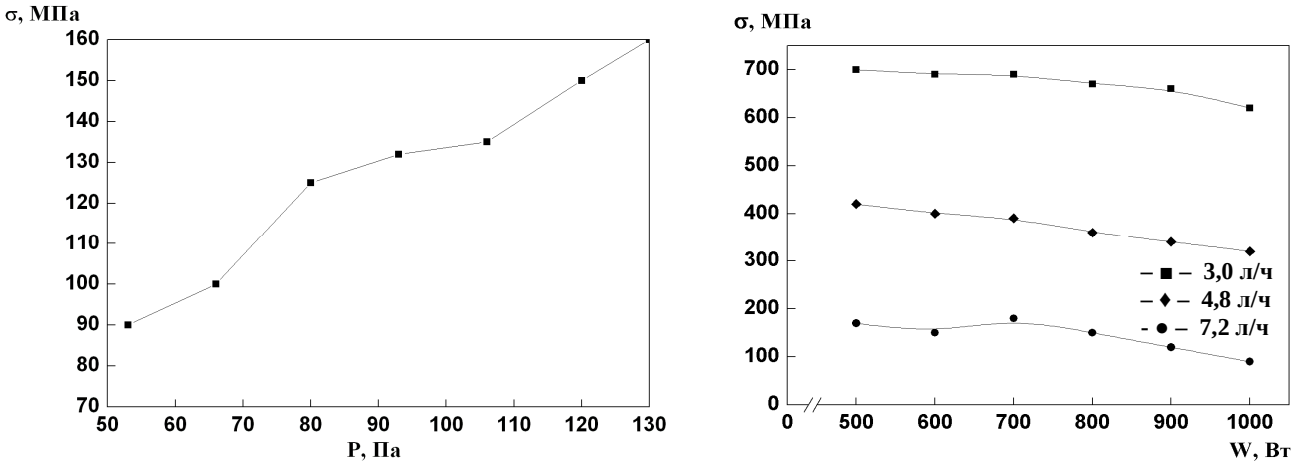
Это, в свою очередь, приводит к увеличению напряженности в материале [7]. При увеличении расхода моносилана величина остаточных напряжений слоя снижается, что обусловлено обогащением пленки кремнием, а, значит, состав осажденного слоя имеет большее сходство с материалом подложки. Величина остаточных напряжений монотонно возрастает с увеличением давления в реакторе, что связано с увеличением содержания в пленке азота (рис. 5.8,а). С увеличением мощности разряда наблюдается незначительное снижение величины остаточных напряжений, что обусловлено дополнительной бомбардировкой пленки ионами плазмы (рис. 5.8,б) [8].

Таким образом, ПХО нитрида кремния позволяет в широких пределах управлять величиной остаточных напряжений в формируемых пленках путем варьирования расходов моносилана, аммиака, давления в реакторе, а также мощности разряда.



а б

Рис. 5.7. Зависимости величины остаточных механических напряжений от расходов реагентов в пленках нитрата кремния, осажденных ПХО, при давлении в реакторе 75 Па и температуре подложек 350 °С:
а – от расхода аммиака (расход азота 100 л/ч, расход моносилана 3 л/ч),
б – от расхода моносилана (расход аммиака 15 л/ч, расход азота 100 л/ч)



а б

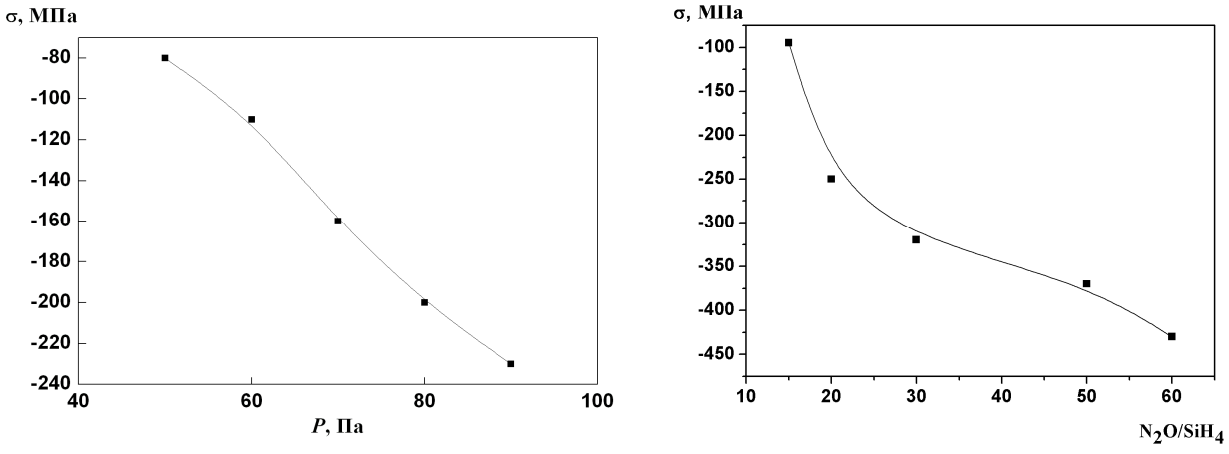
Рис. 5.8. Зависимости величины остаточных напряжений в пленках нитрида кремния, сформированных ПХО, от условий проведения процесса:
а – от давления в реакторе (мощность разряда 800 Вт,
расход SiH_4 - 3 л/ч, расход NH_3 - 15 л/ч) , б - от мощности разряда при различных расходах моносилана

5.2.3. Осаждение слоев диоксида кремния

Слои SiO_2 нашли широкое распространение в качестве диэлектрического и пассивирующего материала микросистемных датчиков, а также в качестве конструкционного материала их мембранных элементов. Диэлектрические слои SiO_2 получают, как правило, термическим окислением кремния в кислородсодержащей среде, а также в парах воды [4], либо химическим осаждением из газовой фазы путем окисления кремнийсодержащего соединения (моносилана) кислородом или закисью азота при пониженном давлении [9]. Для мембран важно получать пленки SiO_2 с заданной величиной остаточных напряжений. Для этих целей наилучшим образом подходят пленки SiO_2, сформированные ПХО. Данный процесс реализуется окислением моносилана закисью азота в тлеющем разряде при пониженном давлении (давление в реакторе 90 Па) в диапазоне температур от 100 до 400 °С [4, 12]:

$$SiH_4 + 2N_2O \rightarrow SiO_2 + 2N_2 + 2H_2. \qquad (5.4)$$

Величина остаточных напряжений сжатия в пленке SiO_2 растет с увеличением давления в реакторе, что обусловлено ростом содержания в пленке азота, захваченного из газовой смеси (рис. 5.9,а) и снижаются с увеличением отношения N_2O/SiH_4 (рис. 5.9,б). Таким образом, механическими свойствами пленок, полученных ПХО, можно управлять путем изменения условий проведения процесса: давления в реакторе, отношения расходов закиси азота и моносилана, мощности разряда.



а б

Рис. 5.9. Зависимости величины остаточных механических напряжений в пленках SiO_2 : а – от давления в реакторе (отношение расходов закиси азота к моносилану 15:1), б – от отношения расходов закиси азота к моносилану

5.2.4. Нанесение слоев платины и никеля

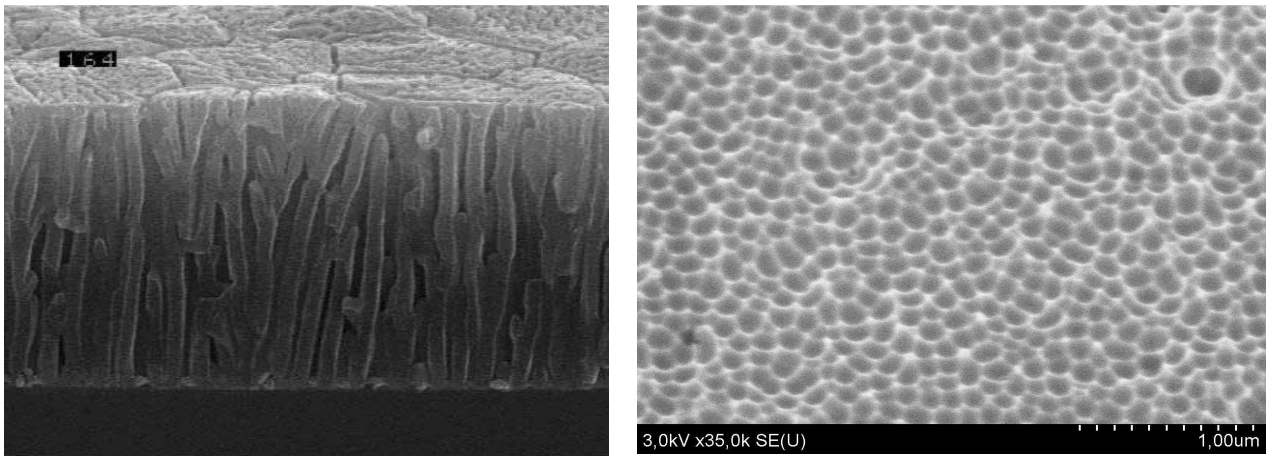
Платина нашла широкое применение в качестве токопроводящего и резистивного материала микросистемных датчиков благодаря ее химической инертности и высокой температуре плавления. При формировании тонкопленочных элементов из платины необходимо обеспечивать заданную величину поверхностного сопротивления, заданную величину температурного коэффициента сопротивления (ТКС), минимальные механические напряжения при условии хорошей адгезии к подложке. По причине химической инертности пленки платины характеризуются плохой адгезией к кремнию, оксиду и нитриду кремния. Поэтому при ее нанесении используют промежуточные адгезионные слои [13, 14]. Однако использование в качестве таких слоев чистых металлов затруднено из-за их диффузии в пленку платины, дополнительно возникающих остаточных напряжений на границах разделов, электромиграции и др. [13, 15, 16].

Тонкие пленки платины, как правило, получают магнетронным распылением платиновой мишени в среде рабочего газа аргона. Для формирования адгезионного подслоя процесс поводят в два этапа. Вначале наносят тонкий слой путем распыления при комнатной температуре в среде кислорода и аргона для формирования слоя Pt_xO_{1-x} [13, 15]. Затем наносят слой платины требуемой толщины распылением в среде аргона. Далее полученная структура отжигается для стабилизации свойств и удаления избыточного кислорода, присутствующего в Pt_xO_{1-x} [17]. Однако наличие кислорода в пленках платины замедляет травление платины в хлорсодержащих растворах, что, в свою очередь, затрудняет формирование топологического рисунка [17].

Для улучшения адгезии также можно использовать адгезионный слой из наноструктурированного оксида алюминия, который обладает высокой структурной и химической стойкостью даже при высоких температурах [18]. Улучшение адгезии при использовании наноструктурированного оксида алюминия обеспечивается за счет увеличения эффективной площади контакта нанесенной пленки с поверхностью подложки, так как наносимая пленка проникает вглубь пор, и в зависимости от их диаметра площадь соприкосновения увеличивается в 5 − 6 раз. При этом в случае использования пленок платины толщиной 0,2 – 0,3 мкм диаметр пор наноструктурированного оксида алюминия не должен превышать 200 Å

Наноструктурированный оксид алюминия получают из пленок чистого алюминия толщиной порядка 0,2 мкм, нанесенных термовакуумным испарением или магнетронным распылением, путем их анодирования в

растворе 0,3 мол. щавелевой кислоты при 283 К в потенциостатическом режиме при напряжении 60 В (рис. 5.10, а). Затем для увеличения эффективной площади контакта проводят травление вершин пор в концентрированной ортофосфорной кислоте (рис. 5.10, б).



а б

Рис. 5.10. РЭМ фото пленок наноструктурированного оксида алюминия: а – после анодирования, б – после травления в ортофосфорной кислоте

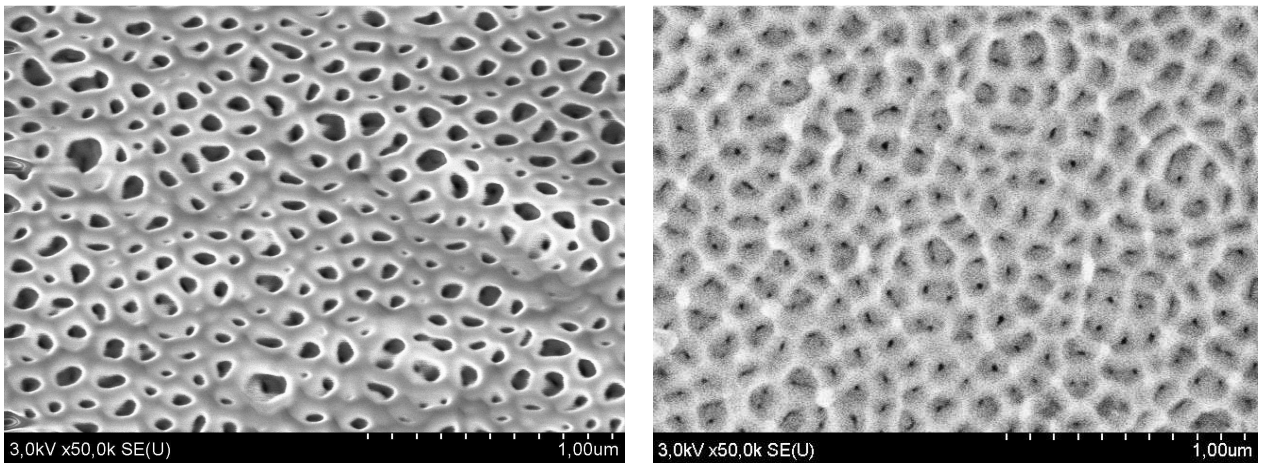
После анодирования пленки наноструктурированного оксида алюминия подвергали бомбардировке ионами аргона с ускоряющим напряжением 3 кВ, при постоянном токе равном 30 мА в течение времени от 10 до 20 минут. В результате получается однородная наноструктурированная поверхность, обеспечивающая адгезию пленки платины вплоть до температуры образца 850°С (рис. 5.11).

На рис. 5.12,а представлены зависимости поверхностного сопротивления пленок платины, отожженных при температуре 1120 К и без отжига, а на рис. 5.12, б – зависимости ТКС от толщины пленок платины, отожженных при различных температурах. Анализ зависимостей показывает, что требуемые параметры резистивных элементов достигаются соответствующими режимами термообработки.

Величина механических напряжений пленок платины линейно возрастает с увеличением толщины пленки (рис. 5.13). Таким образом, целесообразно использовать пленки платины толщиной до 0,3 мкм, поскольку в противном случае увеличивается риск отслоения пленок от подложки из-за механических напряжений.

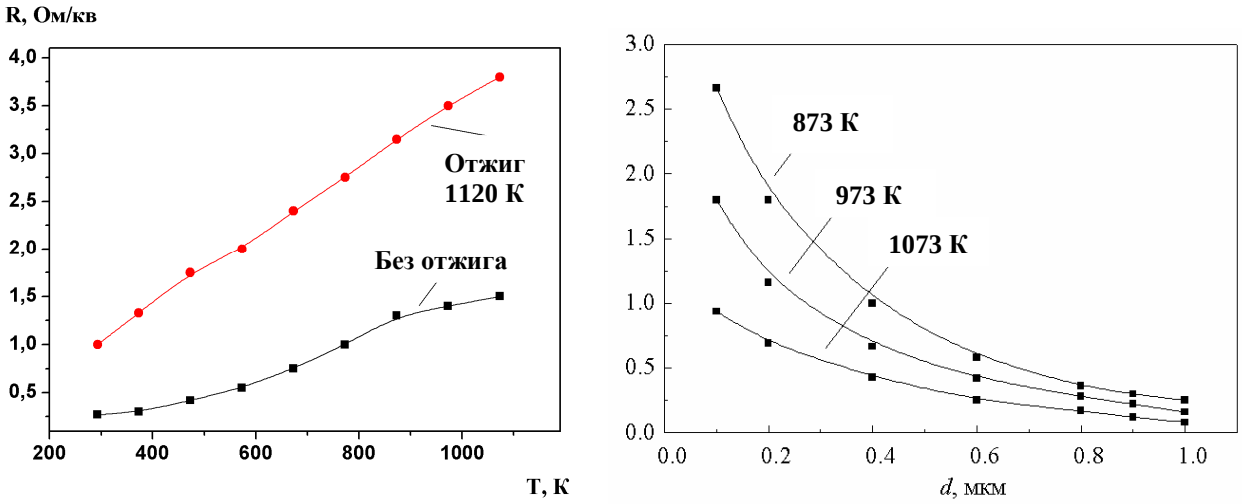
Пленки никеля, используемые в качестве резистивных элементов, как правило, формируют электронно-лучевым испарением, что связано с

магнитными свойствами никеля. Данный метод позволяет получать пленки с величиной ТКС порядка 10^{-3} $К^{-1}$.



а б

Рис. 5.11. РЭМ фото поверхности пленок наноструктурированного оксида алюминия после ионно-лучевого травления: а – в течение 10 минут, б – в течение 20 минут



а б

Рис. 5.12. Температурные зависимости поверхностного сопротивления пленок платины: а – толщиной 0,6 мкм от температуры окружающей среды, б – пленок, отожженных при различной температуре, от их толщины

Одним из методов изменения ТКС пленок Ni является высокотемпературный отжиг в восстановительной атмосфере формир-газа [15]. На рис. 5.14,а представлена зависимость поверхностного сопротивления пленок никеля от их толщины до и после термообработки. После отжига пленок

величина поверхностного сопротивления пленки снижается на 20 − 30 %., а величина остаточных напряжений растет с увеличением толщины пленки (рис. 5. 14, б).

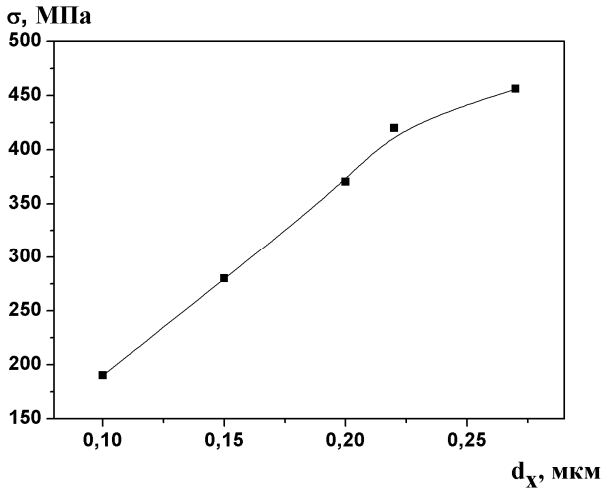
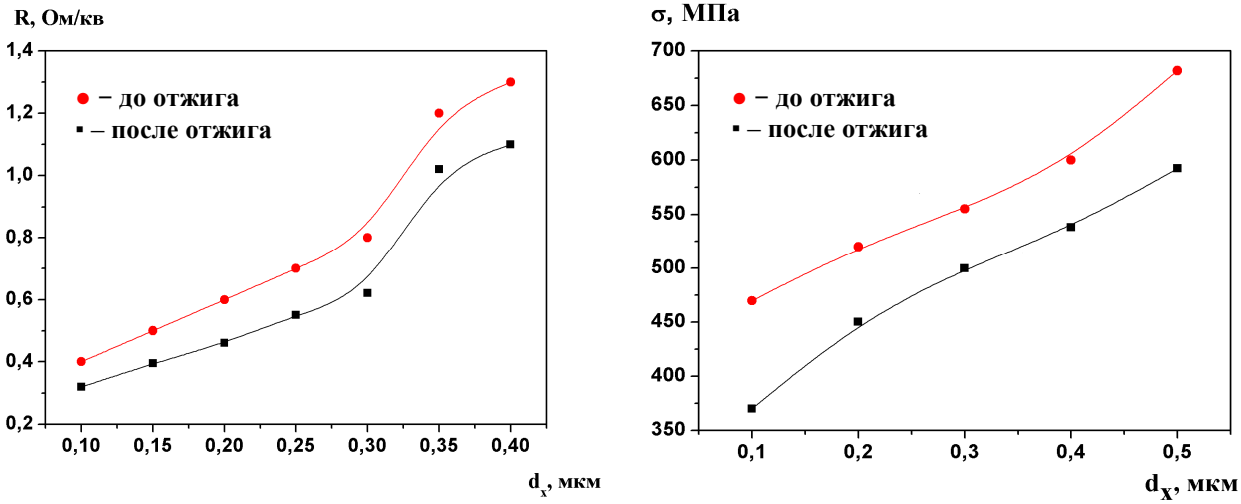


Рис. 5.13. Зависимость величины механических напряжений от толщины пленок платины



а б

Рис. 5.14. Зависимости поверхностного сопротивления пленок никеля и величины остаточных напряжений от толщины пленки до и после термообработки в формир-газе при температуре 670 К, а – поверхностное сопротивление, б – механические напряжения

На рис. 5.15 представлена зависимость ТКС пленок никеля от температуры подложки при ее нанесении для разных температур отжига. ТКС пленок никеля не подвергаемых дальнейшему отжигу стабилизируется при температуре 580 К. Для пленок никеля, отжигаемых при температуре 670 К стабилизация ТКС наблюдается при температуре подложки выше 600 К.

Таким образом, для получения заданных свойств пленок никеля необходимо выбирать оптимальную толщину, а также контролировать как температуру подложки при электронно-лучевого испарении никеля, так и условия проведения последущей термообработки.

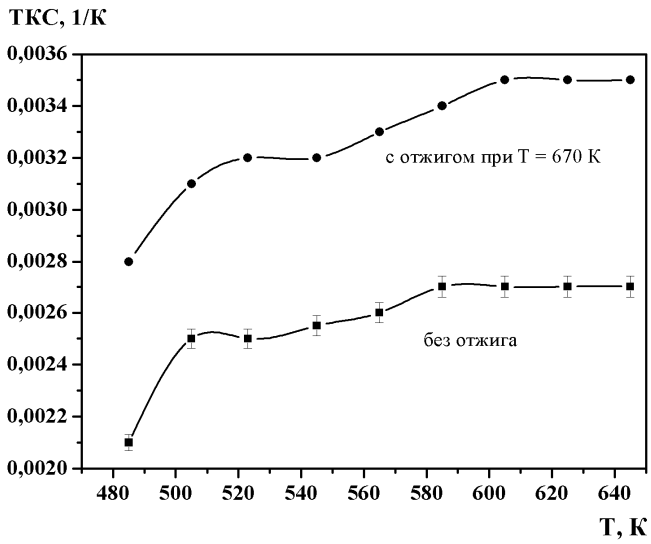


Рис. 5.15. Зависимость ТКС пленок никеля толщиной 0,3 мкм от температуры подложки для различных температур отжига в формир-газе

5.2.5. Глубокое травление кремния

Формирование мембран микромеханических датчиков осуществляют путем прецизионного анизотропного травления кремниевой подложки. Для подложек из монокристаллического кремния ориентацией (100), как правило, используют щелочные растворы на основе водных (10 − 20%) растворов КОН и NaOH при температуре 340 − 373 К. Для изготовления микромеханических структур формируют лунки V-образной формы (рис. 5.16).

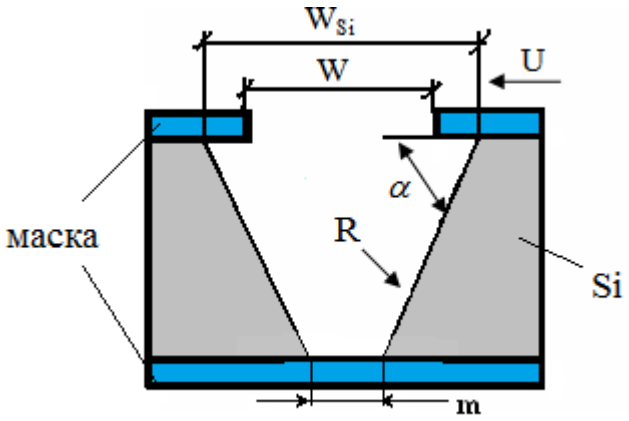


Рис. 5.16. Схема анизоторопного травления кремния: W – размер маски,

W_{Si} – латеральный размер лунки, U – величина подтрава под маску,
R – боковая стенка лунки α – угол наклона боковой стенки

Для анизотропного травления кремния подходят кристаллографические направлениях (100) и (110), так как скорость их травления на два порядка выше, чем направления (111). Ширина получаемой мембраны m зависит от размера окна в маскирующем покрытии W, величины подтрава U под SiO_2 и глубины травления h_{Si} [20]:

$$m = W_3 - \sqrt{2h_{Si}}, \quad (5.5)$$

$$U = V_{<111>}\tau / \sin\alpha, \quad (5.6)$$

$$W_{Si} = W + 2U, \quad (5.7)$$

где τ – время травления, α = 54,74°.

На размер получаемого элемента существенное влияние оказывает толщина подложки. Диоксид и нитрид кремния являются подходящим материалом для маски при анизотропном травлении кремния. Однако для формирования структур травлением в КОН в течение большого времени наиболее предпочтительным материалом маски является нитрид кремния, что обусловлено его химической стойкостью [19].

На рис. 5.17 представлены зависимости скорости травления кремния ориентации (100) от температуры водного раствора КОН при различных концентрациях. Наибольшая величина скорости травления Si (100) при концентрации КОН в водном растворе порядка 20 – 30 %.

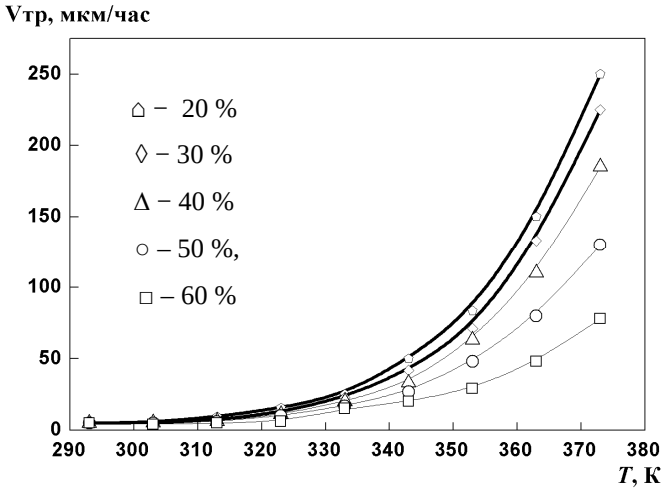


Рис. 5.17. Зависимость скорости травления кремния ориентации (100) в водном растворе КОН от температуры при различных концентрациях раствора

Для формирования мембран из монокристаллического кремния важно остановить травление при достижении заданной остаточной толщины мембраны. Для решения данной задачи используют следующие методы: контроль по времени травления, оптический контроль остаточной толщины, контрольное подтравливание. Однако наиболее эффективным методом является, использование самотормозящих видов травления (стоп-травление), например, анизотропного травления с электрохимической автоматической остановкой процесса [20]. Данный метод предполагает использование эпитаксиального слоя n-типа проводимости на подложке p-типа проводимости и основан на процессах анодной пассивации при травлении кремния с обратно смещенным p-n-переходом. Положительный потенциал подается на тонкий эпитаксиальный слой n-типа посредством омического электрического контакта, а электрический контакт к травящейся подложке кремния p-типа осуществляется через травильный раствор с никелевым электродом (рис. 5.18).

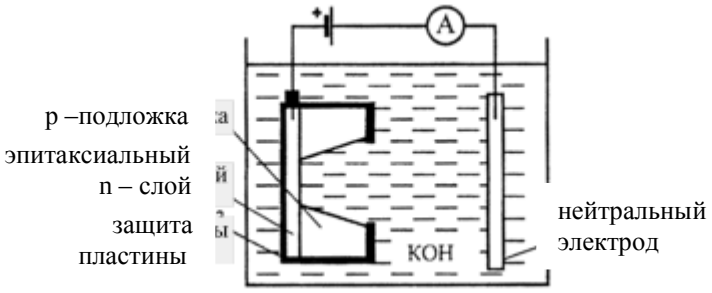


Рис. 5.18. Схема процесса обработки с электрохимической остановкой

Подаваемое смещение локализуется на обратно смещенном p-n-переходе. В это время подложка подвергается химическому растворению. В процессе травления через систему течет ток, представляющий собой обратный ток p-n - перехода. В момент протрава p -подложки и контактирования травителя с n-слоем он резко возрастает, что объясняется инжекцией дырок при разряде ионов водорода на тех участках травления, где обедненный слой выходит на поверхность электролита. Часть дырок, генерируемых сильным электрическим полем на границе раздела кремний – электролит, не расходуется на реакцию, а втягивается обратно смещенным переходом, вследствие чего увеличивается его обратный ток. При этом происходит быстрое окисление поверхности полупроводника, препятствующее дальнейшей реакции растворения [20].

Для формирования объемных структур микросистемных датчиков также широкое распространение получил метод сухого или плазмохимического травления кремния. Его сущность заключается в использовании плазмы ВЧ-разряда, в которой наряду с нейтральными частицами для удаления материала с

травящейся поверхности используются химически активные ионы и радикалы, т.е. сочетаются аспекты как физического, так и химического травления [21].

Плазмохимическое травление кремния осуществляют во фторсодержащей плазме. Атомы фтора реагируют с кремнием n и p типа проводимости, а также с SiO_2 и Si_3N_4, образуя летучие соединения. В качестве источников фтора могут служить молекулы: F_2, CF_4, C_2F_6, C_3F_8, SF_6, SiF_4, NF_3, ClF_3, которые при диссоциации в плазме могут образовывать атомарный фтор, а также различные фторсодержащие радикалы. В результате химических реакций с кремнием образуются летучие продукты такие, как SiF_2 и SiF_4. Для улучшения эффективности процесса в плазму добавляют кислород, который в атомарном состоянии окисляет углерод до CO и CO_2 [22].

Поскольку ПХТ при отсутствии каких-либо кристаллографических эффектов является изотропным, то для получения анизотропии процесса травление стимулируют бомбардировкой положительными ионами. Такой процесс называют еще реактивным ионным травлением (РИТ). В данном случае активируются два механизма стимуляции анизотропного травления ионной бомбардировкой: создание радиационных нарушений, а также формирование пассивирующего слоя на боковых стенках. В первом случае ионы, бомбардирующие кремний, создают радиационные нарушения в кристаллической решетке, которые катализируют процесс хемосорбции травителя и ускоряют химические реакции с нарушенной областью кристалла. Во втором случае при добавлении в плазму определенных газов, например, (CHF_3, $CClF_3$) или смеси газов (CF_4-H_2) после их распада образуются элементы с ненасыщенными связями и радикалы, способные к полимеризации. Эти элементы, взаимодействуя с поверхностью, формируют адсорбированный слой, а в некоторых случаях - сплошную пленку. Адсорбированный слой замедляет травление, адсорбируя элементы травителя либо препятствуя доступу частиц травителя к подложке. Ионная бомбардировка поверхности удаляет покрытие из ингибиторов, что вызывает анизотропию травления [21, 22].

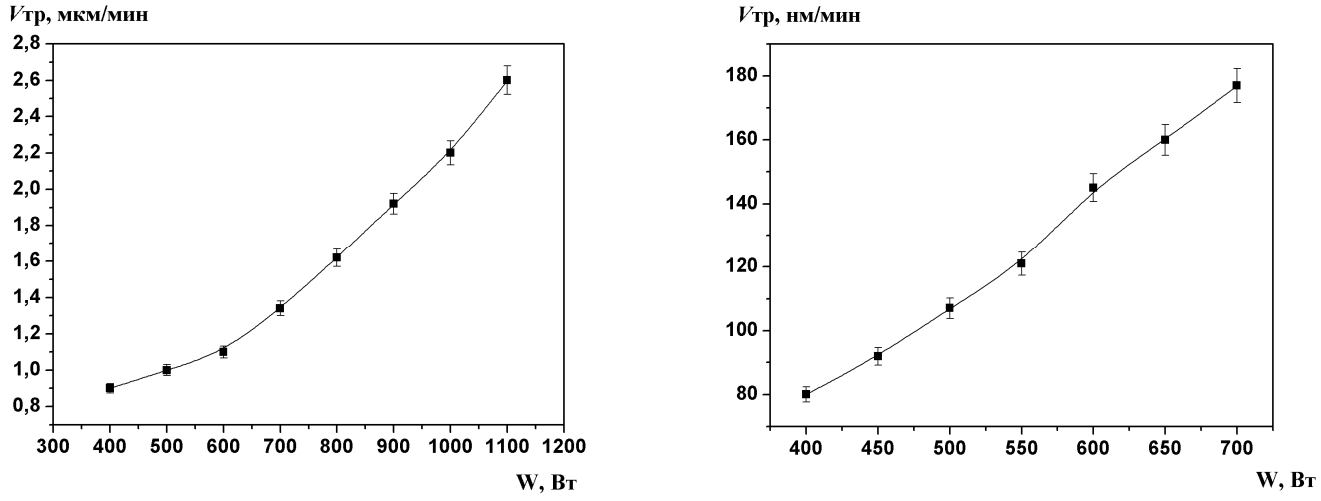
Процесс РИТ позволяет точный перенос рисунка от маскирующего материала на поверхность Si, т.е. получать мембраны заданной конфигурации. Выбор маскирующего материала зависит от состава травящей смеси, и желаемой глубины травления. В качестве маски при РИТ травлении Si можно использовать Si_3N_4 или SiO_2, в зависимости от состава травящей смеси [23]. Еще одним важным преимуществом РИТ по сравнению жидкостным травлением является то, что не требуется дополнительной защиты планарной стороны (например, наклеивание с помощью воска на другую пластину, что

может привнести дополнительную дефектность) или использования специального оборудования (ячейки).

Скорости травления для кремния и нитрида кремния практически линейно зависит от мощности ВЧ-разряда (рис. 5.19). Зависимость скорости травления кремния от расхода элегаза представлена на рис. 5.20. Скорость травления кремния имеет характерный пик в диапазоне расхода элегаза 32–34 л/ч. Таким образом, процесс РИТ контролируется изменением расхода газов, мощности ВЧ – разряда, а также давления в реакторе.

Для глубокого травления кремния традиционная технология РИТ малопригодна, из–за снижения со временем скорости травления, обусловленного затруднением откачки продуктов реакции из объема формируемых структур. Поэтому техпроцесс РИТ для формирования объемных структур микромеханических систем предпочтительно строить на основе Бош – технологии [24]. В данном процессе РИТ представляет собой циклическое повторений двух стадий. В течение первой из них производится обычное изотропное травление кремния в плазме $SF_{6,}$ а в течение второй – полимеризация дна и стенок формируемой канавки продуктами диссоциации в плазме фторуглеродного газа, например, $C_4F_{8.}$

.



а б

Рис. 5.19. Зависимость скорости плазмохимического травления кремния и нитрида кремния в плазме элегаза от ВЧ-мощности: а – кремний, б– нитрид кремния

Данные стадии повторяются нужное количество раз в зависимости от требуемой глубины травления. Процесс выполняется в реакторах с индуктивно связанной плазмой, что позволяет отдельно контролировать как плотность ионов, так и их энергию.

При этом обеспечиваются оптимальные технологические режимы для

каждой стадии (мощность, расход газа, давление, время стадии) в отличие от традиционных процессов РИТ, где процессы травления и пассивации протекают одновременно, а при выборе их оптимальных режимов необходимо идти на компромисс.

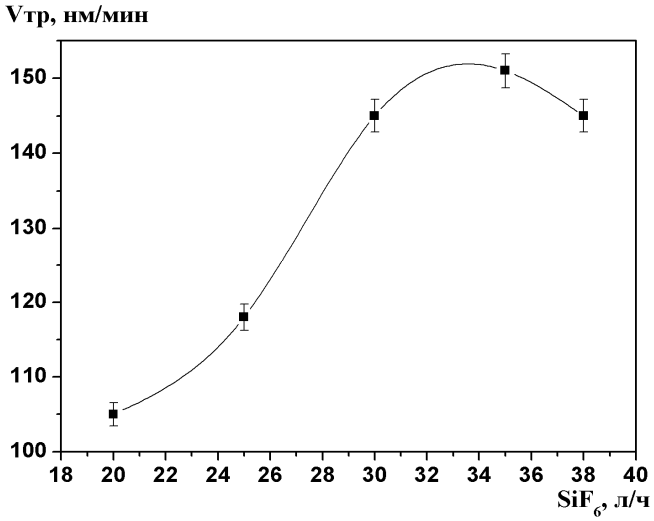


Рис. 5.20. Зависимость скорости плазмохимического травления кремния и нитрида кремния от расхода элегаза

5.2.6. Формирование КНИ-структур

В настоящее время широкое распространение получили следующие технологии получения КНИ-структур [25]: сращивание подложек с последующим утонением (BESOI – технология), формирование скрытых диэлектрических слоев ионной имплантацией (SIMOX – технология,; управляемый скол (Smart Cut – технология и перенос эпитаксиального слоя (ELTRAN – технология).

Формирование КНИ-структур по BESOI – технологии (рис. 5.21) основано на возникновении химических связей между гидратированными очищенными поверхностями диоксида кремния. После очистки окисленных подложек в перекисно – соляном, перекисно - аммиачном растворах и последующей промывки в воде поверхности покрываются OH^-- группами, которые притягивают молекулы воды (т.е. поверхности являются гидрофильными). После того как две подложки соединяются вместе при комнатной температуре между ними содержится несколько молекулярных слоев воды. Нагрев подложек до температура 573 K удаляет около 75 % воды путем диффузии ее молекул через слои SiO_2 к границе раздела с кремнием, где они реагируют с кремнием с образованием дополнительного слоя SiO_2 и

высвобождением молекул водорода. Когда соединяемые подложки далее нагреваются до температуры 1073 К от границы соединения диффундируют оставшиеся молекулы воды. Таким образом, гидроксильные группы на противоположных поверхностях могут соединиться в мостики из силоксановых связей:

$$Si\text{-}OH + HO\text{-}Si \rightarrow Si\text{-}O\text{-}Si + H_2O. \qquad (5.8)$$

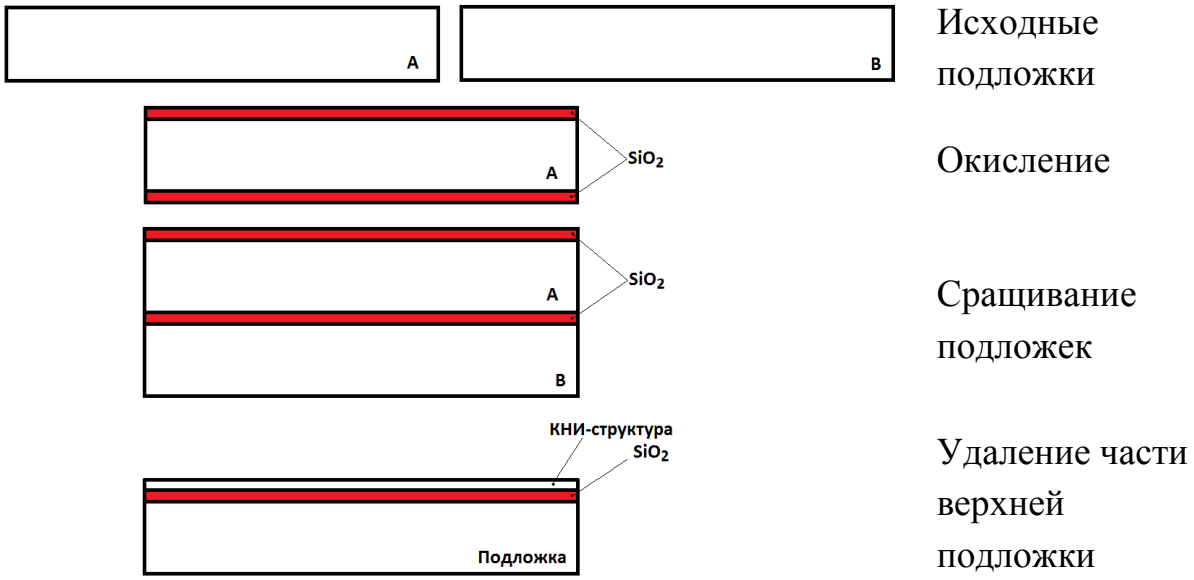


Рис. 5.21. Этапы формирования КНИ-структуры по BESOI - технологии

Вода, являющаяся продуктом реакции обусловливает дальнейшее окисление кремния, а высвобождающийся водород попадает во вновь сформированный оксид. После нагрева подложек до температуры 1374 К завершается формирование границы сращивания путем соединения оставшихся гидроксильных групп и диффузии водорода в объем кремния:

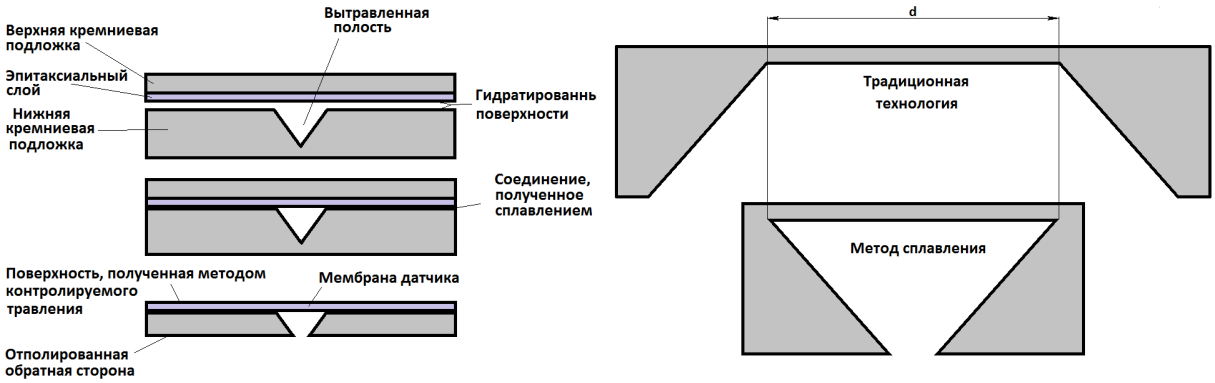
$$Si\text{-}OH + HO\text{-}Si \rightarrow [Si\text{-}O\text{-}Si] + 2H;\ H \rightarrow H(Si)_{об.} \qquad (10)$$

Основные стадии формирования КНИ-структур по BESOI – технологии приведены на рис. 5.21. После сращивания подложек одну из них подвергают утонению путем шлифовки с последующей полировкой и химическим травлением кремния до заданной толщины остаточного слоя кремния на поверхности окисла.

На рис. 5.22 представлен пример изготовления датчика давления с использованием технологии сращивания подложек. Очевидно, что технология сращивания подложек позволяет существенно уменьшить габариты и массу микромеханических устройств с сохранением идентичных параметров чувствительности.

SIMOX–технология формирования КНИ-структур основана на процессе формировании скрытых слоев оксида кремния, получаемых ионной

имплантацией кислорода с последующим термическим окислением. Для получения слоя кремния толщиной 200 нм требуется энергия ионов кислорода 200 кэВ и поверхностная концентрация $2 \cdot 10^{18}$ $см^{-2}$, что в 100 раз больше типовых доз, используемых для формирования изделий интегральной электроники. Ионная имплантация в указанных режимах при комнатной температуре приводит к полной аморфизации имплантированных слоев. Поэтому для сохранения монокристаллической природы кремния процесс осуществляют при температуре 873 К. Это позволяет реализовать динамический отжиг повреждений во время проведения процесса ионной имплантации. Кроме того, во избежание загрязнения структур из-за распыления металлов со стенок имплантационной камеры все детали камеры должны быть покрыты слоем кремния.



а б

Рис. 5.22. Изготовление мембраны датчика методом сращивания подложек: а - основные этапы технологии, б – сравнение размеров датчиков, полученных различными технологиями

После ионной имплантации кислорода структуры подвергают отжигу при температурах от 1573 до 1678 К в печах с реакторами из поликристаллического кремния или нитрида кремния. При этом осуществляется отжиг радиационных дефектов, привнесенных ионной имплантацией, и происходит реакция взаимодействия имплантированного кислорода с кремнием. В результате формируется гладкий захороненный слой диоксида кремния (рис. 5.23).

ELTRAN – технология основана на сочетании таких процессов как формирование анодированного пористого кремния, осаждение эпитаксиальных слоев кремния и сращивание подложек. Основные стадии формирования КНИ – структуры по ELTRAN – технологии представлены на рис. 5.24.

Пористый кремний формируется при анодировании кремния в растворе плавиковой кислоты. В электрохимической ячейке в кремнии вытравливается

случайная сеть нано-пор. Поверхность пористого кремния все еще является приемлемой затравкой для эпитаксиального наращивания. Для этого структуры с пористым кремнием подвергают высокотемпературному отжигу в водороде, который значительно увеличивает подвижность атомов кремния. Таким образом, поверхность пор запечатывается и улучшается качество подложки для последующего эпитаксиального наращивания. После эпитаксии поводят окисление и осуществляют сращивание подложек. Далее производят раскалывание структуры вдоль слоя пористого кремния, характеризующегося механической хрупкостью. Остатки пористого кремния удаляются струей воды. После чего поверхность КНИ-структуры подвергают очистке травлением. Следует отметить, что благодаря лучшей однородности процесса эпитаксиального наращивания по сравнению с процессами механической обработки и травления подложек, ELTRAN – технология позволяет обеспечивать более однородную толщину слоя кремния на изоляторе.

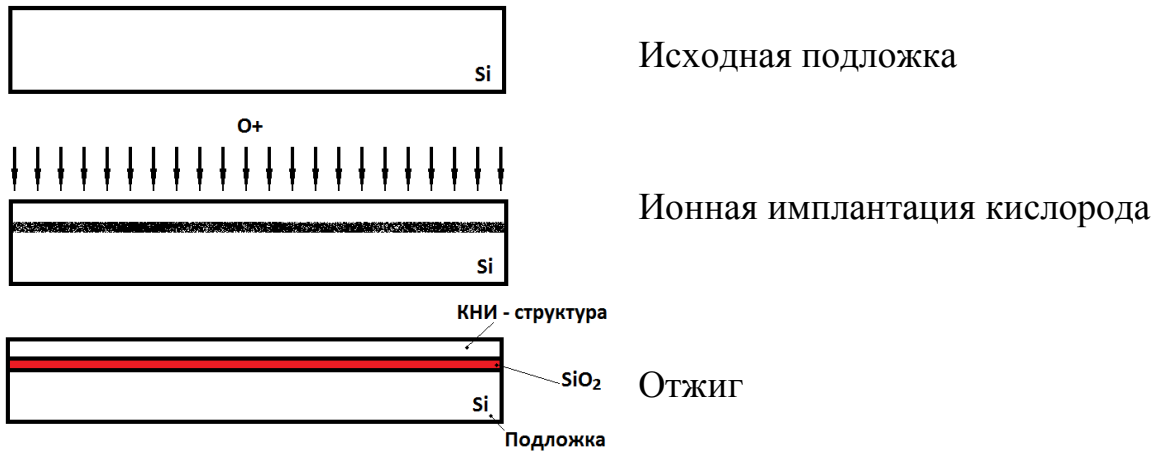


Рис. 5.23. Стадии формирования КНИ-структуры по SIMOX–технологии

Еще одним способом формирования КНИ – структур путем переноса на подложку тонких слоев является Smart Cut – технология. В ее основе лежит тот факт, что имплантированные в кремний ионы водорода с поверхностной концентрацией более $5 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ создают в кристаллической решетке микрополости. При последующем нагреве подложки до температуры 673 – 873 К образуется молекулярный водород H_2. Создаваемое при этом давление приводит к раскалыванию подложки.

Основные стадии формирования КНИ-структуры по Smart Cut технологии представлены на рис. 5.25.

Слой кремния, подлежащий переносу на несущую подложку, окисляется до требуемой толщины. Затем через слой окисла осуществляют ионную

имплантацию водорода дозой более $5 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$. Далее осуществляют химическую обработку подложек для очистки поверхностей и придания им гидрофильности. После этого осуществляют сращивание подложек с нагревом до температуры 673–873 К. В результате структура раскалывается по плоскости ионной имплантации водородом. После окончания сращивания поверхность структуры подвергают финишной полировке. Поскольку однородность глубины залегания примеси при ионной имплантации еще лучше, чем толщина эпитаксиального слоя, то Smart Cut – технология обеспечивает наилучшие результаты по воспроизводимости параметров КНИ–структур. При этом типовые значения толщины слоя кремния лежат в диапазоне от 5 нм до 1,5 мкм, слоя SiO_2 – от 5 нм до 5 мкм.

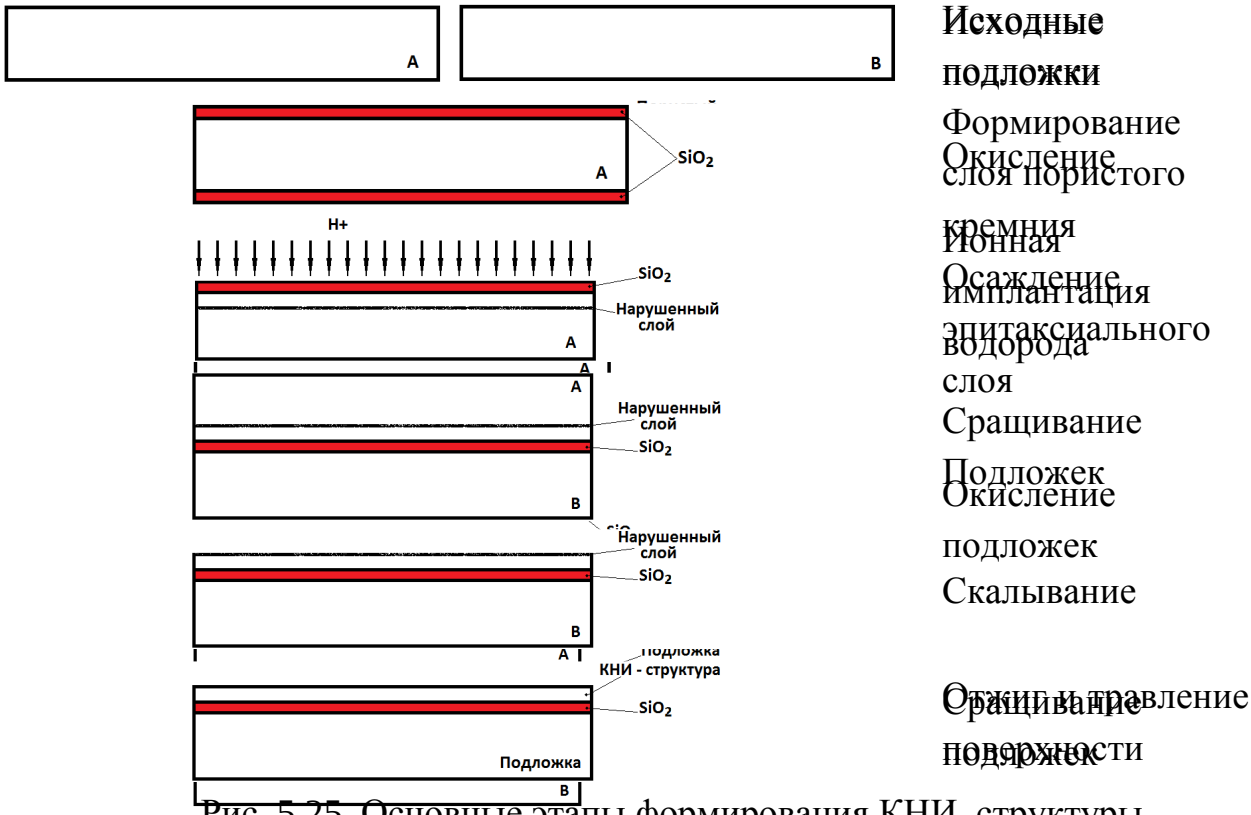


Рис. 5.25. Основные этапы формирования КНИ–структуры по Smart Cut – технологии

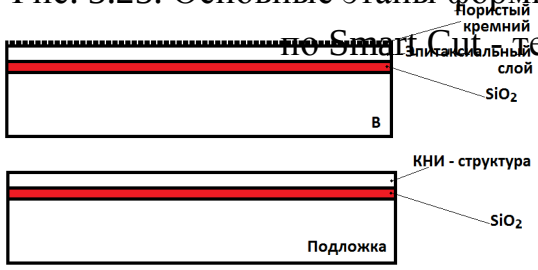


Рис. 5.24. Основные этапы формирования КНИ-структуры по ELTRAN – технологии

5.3. Остаточные напряжения в многослойных системах

Мембрана микромеханического датчика это многослойная гетеросистемная структура, каждый слой которой получают определенным технологическим способом. В результате на границе раздела пленок возникают большие остаточные напряжения обусловленные разностью температурных коэффициентов расширения и рассогласованием в периодах кристаллических решетках материалов слоев мембраны. Чрезмерные напряжения могут привести к разрушению структур мембранных датчиков. В связи с этим необходимо проводить оптимизацию конструкции мембраны с целью определения технологических режимов формирования каждого слоя для обеспечения приемлемой величины остаточных напряжений во всем температурном диапазоне работы датчика.

Для анализа остаточных напряжений полагается, что они связаны с различием в значениях температурных коэффициентов линейного расширения пленки и подложки [26]. В этом случае остаточных напряжения при температуре осаждения или кристаллизации отсутствуют, а возможные деформации, связанные с рассогласованием кристаллических решеток, релаксируют на границах зерен и потому незначительны. Моделирование поведения мембран осуществляется методом конечных элементов через уравнение термоупругости Дюамеля — Неймана в котором учитываются механические напряжения, вызванные разностью тепловых коэффициентов расширения материалов структуры (обобщенный закон Гука с учетом изменения температуры) [27, 28].

В качестве исходных данных для моделирования выступают состав слоев, температура их формирования, величина остаточных механических напряжений в слоях. Пример представления исходных данных для многослойной мембраны датчика расхода газа с никелевым нагревателем приведен в табл. 5.1. Результаты моделирования распределения механических напряжений при комнатной температуре и рабочей температуре датчика – на рис. 5.26, а, б соответственно.

Таблица 5.1

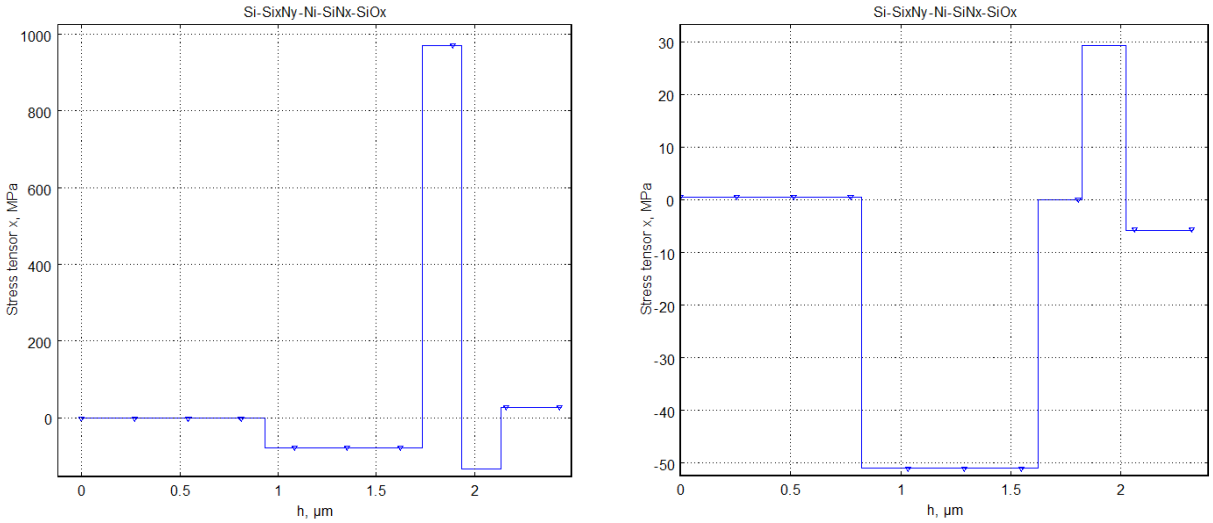
Исходные данные для моделирования распределения остаточных напряжений в многослойной структуре датчика расхода газа

Параметры слоев	Слои				
	Si	Si_xN_y	*Ni*	SiN_x	SiO_x
Толщина, мкм	280	0,8	0,2	0,2	0,3
Температура формирования, К	-	1113	573	1113	623
Механические напряжения, МПа	-	20	450	90	−350

При комнатной температуре на границах со слоем никеля возникают значительные остаточные напряжения величиной порядка 10^3 МПа. По мере достижения рабочей температуры их величина снижается до 50 МПа (рисунок 5.26,б). Величина результирующих напряжений в мембране составляет ~ 45 МПа, что приведет к ее изгибу. В результате для их снижения необходимо увеличивать ТКЛР пассивирующей пленки SiO_x. Так при увеличении ТКЛР слоя SiO_x с $4 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ величина напряжений при рабочей температуре датчика снизится до 25 МПа.

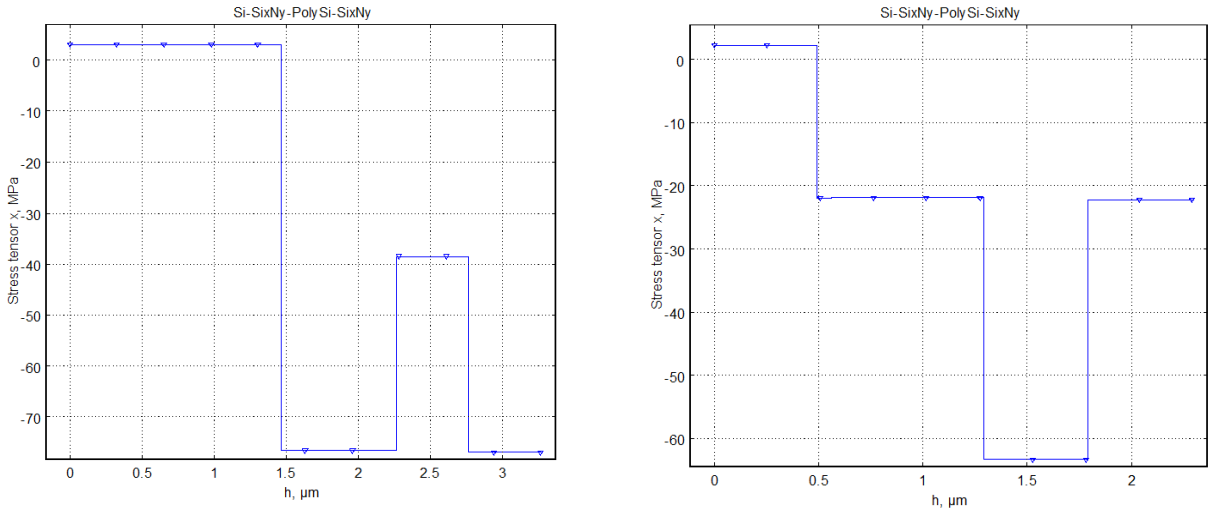
На рис. 5.27, 5.28 представлены результаты моделирования остаточных напряжений для гетеросистем кремний – нитрид кремния – ПКК – нитрид кремния и кремний – нитрид кремния – наноструктурированный оксид алюминия – платина – нитрид кремния – оксид кремния соответственно.

Как видно из рис. 5.27, при комнатной температуре мембрана имеет скомпенсированные напряжения, на границе с кремнием и величина механических напряжений сжатия составляет порядка 80 МПа. При увеличении температуры до 770 К наблюдается снижение данной величины до 22 МПа. Одновременно, повышение температуры приводит к снижению максимальных остаточных напряжений в мембране. Это означает, что мембрана не будет иметь начального изгиба, обеспечит хорошую чувствительность, и будет отличаться длительным сроком службы.



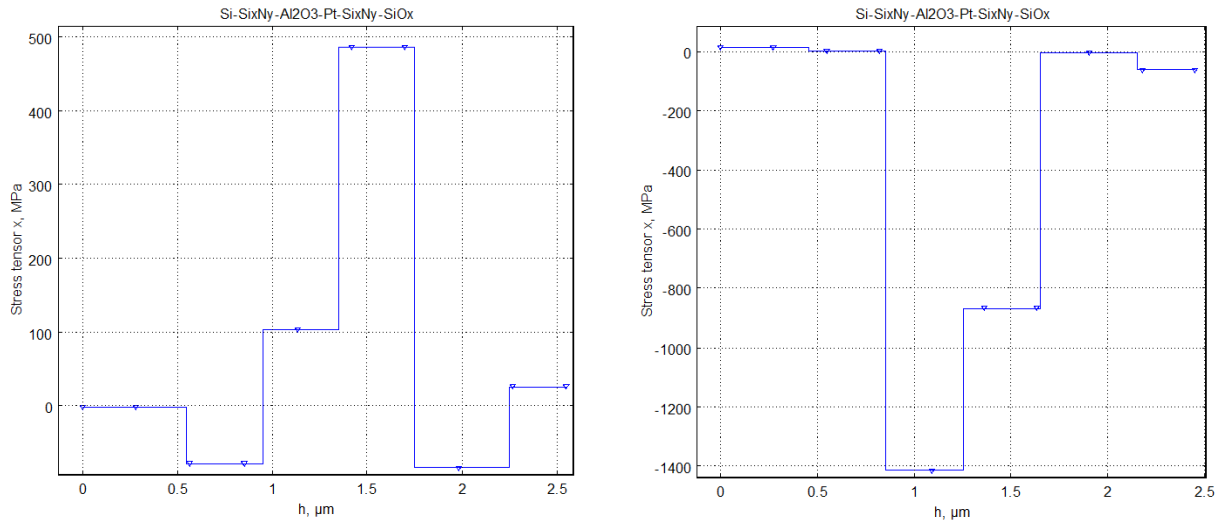
а б

Рис. 5.26. Распределение механических напряжений в многослойной структуре мембранного датчика для структуры Si-Si_xN_y-Ni-SiN_x-SiO_x:
а –при температуре 293 К, б – при температуре 530 К



а б

Рис. 5.27. Распределение механических напряжений в многослойной структуре мембранного датчика для структуры Si-Si_xN_y-PolySi-Si_xN_y:
а –при температуре 293 К, б – при температуре 770 К



а б

Рис. 5.28. Распределение механических напряжений в многослойной структуре мембранного датчика для структуры $Si\text{-}Si_xN_y\text{-}Al_2O_3\text{-}Pt\text{-}Si_xN_y\text{-}SiO_x$: а –при температуре 293 К, б – при температуре 1070 К

Из рис. 5.28 видно, что при комнатной температуре возникают значительные механические напряжения на границах слоя платины величиной порядка 500 МПа в то время как в целом механические напряжения в мембране скомпенсированы и их суммарная величина составляет 25 МПа. При рабочей температуре напряжения на границе Si_xN_y–Al_2O_3 возрастают до величины $1{,}5\cdot10^3$ МПа. При этом величина напряжений между границами структуры остается достаточно на уровне 25 МПа.

Моделирование распределения остаточных напряжений по толщине мембраны позволяет не только предсказывать ее поведение при различных температурах, но также оптимизировать параметры технологического процесса формирования каждого из формируемых слоев с целью их минимизации путем взаимной компенсации механических напряжений в мембране, вносимых каждым слоем.

Для формирования сбалансированных гетеросистемных мембран микромеханических устройств необходимо:

- выбрать метод формирования функциональных слоев гетеросистемной мембраны;
- установить влияние режимов технологических процессов на механические свойства слоев;
- моделировать распределение величины механических напряжений по толщине гетеросистемной мембраны в диапазоне рабочих температур датчика;

- выполнить конструктивно – технологическую оптимизацию толщины функциональных слоев и режимов их формирования, обеспечивающую сбалансированность остаточных напряжений в гетеросистемной мембране во всем диапазоне рабочих температур.

Список литературы к главе 5

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2006. -592 с.

2. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.

3. Технология изделий интегральной электроники/ под общ. ред. А.П. Достанко, Л.И. Гурского. – Минск: Амалфея, 2010. – 356 с.

4. Зи С. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ./ Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.

5. French, P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems / P.J. French // Sensors and actuators A 99. – 2002. – P. 3–12.

6. Турцевич, А.С. Пленки поликристаллического кремния в технологии производства интегральных схем и полупроводниковых прборов / А.С. Турцевич, Л.П. Ануфриев. – Минск: Бел. наука, 2006. – 232 с.

7. Neda T. A polysilicon flow sensor for gas flow meters // T. Neda, K. Nakamura, T. Takumi // Sensors and actuators A. – 2002. – Vol.99. – P. 3−12.

8. Формирование пленок поликристаллического кремния для микроэлектромеханических систем /Л.П. Ануфриев, В.Б. Высоцкий, Н.С. Ковальчук, Э.В. Лобко // Вестник АН РБ. – 2010.– №1. – С. 91 − 97.

9. Турцевич, А.С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А.С. Турцевич, А.С. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2007. – 224 с.

10. Gardeniers, J.G.E. LPCVD silicon-rich silicon nitride films for applications in micromechanics, studied with statistical experimental design / J.G.E. Gardeniers, H.A.C. Tilmans and C.C.G. Visse // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1996. − Vol. 14 (5). − P. 2879−2892.

11. Temple-Boyer, P. Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN_x films deposited from silane and ammonia / P.Temple-Boyer, C. Rossi, E. Saint-Etienne, E. Scheid // J. Vac. Sci. Technol. A 16 (4). − 1998. − N.7-8. − P.2003-2007.

12. Bhatt, V. Stress evaluation of RF sputtered silicon dioxide films for MEMS / V. Bhatt, S. Chandra, S. Kumar, C.M.S. Rauthan, P.N. Dixit // Indian jornal of pure & applied physics. – 2007. – Vol. 45. – P.377−381.

13. Duval F.F.C. Stable TiO_2/Pt electrode structure for lead containing ferroelectric thick films on silicon MEMS structures / F.F.C. Duval, R.A. Dorey, R.H. Haigh and R.W. Whatmore // Thin Solid Films. −2003. – Vol. 444. − P. 235−240.

14. Лабунов, В.А. Современные магнетронные распылительные устройства / В.А. Лабунов, Н.И. Данилович, А.С. Уксусов, В.Е. Минайчев // Зарубежная электронная техника. − 1982. − №10 (256).−М.:ЦНИИ «Электроника»– 100 с.

15. Курносов, Н.М. Тонкопленочные преобразователи сопротивления / Н.М. Курносов, О.Д. Сороколетов // Приборы и системы управления. – 1995. − № 9. – С. 41−44.

16. Kim, M.J. Inhibition of acid etching of Pt by pre-exposure to oxygen plasma / M.J. Kim, L.A. Gruenke, R.J. Saia and S.S. Cohen // Applied physics letters. – 1984. – Vol. 44, №4. − P. 462−464.

17. Maedaer, T. Stabilized platinum electrodes for ferroelectric film deposition using Ti, Ta and Zr adhesion layers / T. Maeder, L. Sagalowicz, P. Muralt // Japanese journal of applied physics. – 1998. −Vol 1. − P. 2007−2012.

18. Паркун, В.М. Исследование объемного роста пленок пористого оксида алюминия/ В.М. Паркун, И.А. Врублевский, Е.П. Игнашев, М.В. Паркун // Доклады БГУИР. – 2003. – Том 1, №2. – С. 66−72.

19. Seidel H. Anisotropic ething of crrystalline silicon in alkaline solutions / H. Seidel, L. Csepregi, A.Heuberger, H. Baumgartel // Jornal Electrochem. Soc. – 1990. – Vol. 137, № 11. – P. 3626−3632.

20. Иващенко, Е.И. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики / Е.И. Иващенко, Ю.Б. Цветков // Микросистемная техника. – 2000. – №1. – С. 122–127.

21. Технология СБИС: В 2–х кн. Кн. 2. Пер. с англ./ Под ред. С. Зи. – М.:Мир, 1986. – 453 с.

22. Плазменная технология в производстве СБИС: Пер. с англ. с сокращ./ Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. – М.: Мир, 1987. – 472 с.

23. Zicke, D. Determination of rates for orientation-dependent etching / D. Zicke, J. Fruhanf // Sensors and actuators A 48. – 1995. – P. 151–156.

24. Пат. 5501893 США, МПК С 25F 3/12. Method of anisotropically etching silicon/ Franz Laermer, Andrea Schilp; Robert Bosch GmbH; Заявл. 27.11.1993; Опубл. 26.03.1996.

25. Handbook of semiconductor manufacturing technology/ Second Edition ed. by R.Doering, Y.Nishi. CRC Press, 2008.

26. Бобров, А.А. Расчет терморезистивного анемометрического преобразователя на мембране / А.А. Бобров, А.Ф. Попков, Н.А. Дюжев,

Н.Е. Кулагин, М.А. Махиборода, А.М. Медников // Нано- и микросистемная техника. – 2008. − №8. – С. 34−39.

27. Любимский, В.М. Изгиб прямоугольной двухслойной пластинки при изменении температуры / В.М. Любимский // Нано- и микросистемная техника. – 2008. − №12. – С. 6−11.

28. Спирин, В.Г. Математическая модель сопротивления тонкопленочного резистора / В.Г. Спирин // Нано- и микросистемная техника. – 2010. − №5. – С. 38−40.

ГЛАВА 6
МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ШАРИКА НА ЗОЛОТОЙ И МЕДНОЙ ПРОВОЛОКЕ ПРИ ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКЕ МЕТОДОМ «ШАРИК-КЛИН»

6.1. Современное состояние и проблемы технологии термозвукового присоединения золотой и медной проволоки методом «шарик-клин» в изделиях микроэлектроники

Термозвуковая сварка методом «шарик-клин» в настоящее время по-прежнему является самым быстродействующим способом присоединения проволочных выводов к контактным площадкам интегральных схем. До 95% изготавливаемых микросхем в мире используют золотую проволоку для обеспечения надежных межсоединений между кристаллом и выводной рамкой методом «шарик-клин» [1].

Первым шагом этого процесса является формирование шарика на конце золотой проволоки, выступающей из рабочего торца капилляра. Стабильность диаметра и симметрия образуемых шариков определяют качество получаемых сварных соединений. Золотая проволока, по-прежнему, является основным материалом, обеспечивающим надежность процесса термозвуковой сварки за счет уникальных характеристик золота. В настоящее время используется электроискровой способ получения шарика на конце золотой проволоки, позволяющий эффективно производить контроль процесса.

Стабильность диаметра образуемых шариков может стать решающим фактором при сборке приборов с большим числом выводов, так как контактные площадки кристаллов таких приборов имеют малые размеры и расстояние между ними. Например, для квадратной контактной площадки с размером 60х60 мкм при микросварке проволокой диаметром 25 мкм, разброс стандартного (50 мкм) диаметра образуемого шарика более 4 мкм, может привести к выходу сварного соединения за пределы контактной площадки, что приведет к дефекту прибора или замыканию с соседней точкой сварки. Использование проволоки из других материалов, таких как медь или алюминий, при присоединении методом «шарик клин» связано с трудностью образования шарика на конце проволоки из этих материалов из-за их высокой окисляемости. Использование защитной атмосферы в зоне образования шарика позволяет использовать медную проволоку, но ее повышенная микротвердость

является дополнительным ограничением широкого использования в производстве.

Растущий интерес к использованию медной проволоки как альтернативы золотой проволоке объясняется, прежде всего, ее меньшей стоимостью, которая приближается к стоимости алюминиевой проволоки. Это позволяет снизить стоимость приборов и повысить их конкурентоспособность. Физико-механические свойства проволоки, используемой в микроэлектронике для межсоединений, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Основные физико-механические характеристики золотой и медной проволоки

Параметр	Материал		
	Au	Cu	Al
Температура плавления, °С	1063	1083	660
Теплоемкость, кДж/(кг×°С)	0,12 – 0,15	0,4 – 0,55	0,9
Плотность, г/см^3	19,3	8,9	2,7
Скрытая теплота, Дж/кг	120	380	390
Теплопроводность Дж /м²×с×°К	312	406	237
Модуль Юнга, ГПа	78	112	70
Удельное сопротивление мкОм×м	0,0225	0,017	0,0282
Микротвердость (по Виккерсу), мН/м^2	216	369	167

Теплопроводность у меди в 1,7 раз выше, чем у алюминия, и в 1,3 раза выше, чем у золота [2]. Лучшая теплопроводность медной проволоки может обеспечить дополнительный теплоотвод от кристалла прибора при большом числе выводов. Меньшее электрическое сопротивление позволяет использовать медную проволоку диаметром в 1,25 раза меньше по отношению к диаметру золотой проволоки при одной и той же плотности тока. Это преимущество актуально для транзисторов средней мощности в малогабаритных корпусах для поверхностного монтажа.

Как было отмечено выше, два основных недостатка сдерживают широкое применение медной проволоки. К первому относится быстрая окисляемость проволоки, особенно при повышенных температурах, Для предотвращения окисления используют формир-газ, состоящий из 95% азота и 5% водорода для получения шариков сферической формы на конце проволоки при сборке методом «шарик-клин». Для обеспечения подвода защитного формир-газа

используются разрядники особой конструкции и устройства формирования шарика повышенной мощности. Второй недостаток–это повышенная твердость медной проволоки, что требует тщательного подбора режимов сварки, исключающих кратерообразование на контактных площадках [3]. Эти технологические трудности являются пока основным препятствием перехода на медную проволоку. В промышленном производстве медную проволоку используют в основном при сборке приборов средней мощности- транзисторов, стабилизаторов напряжения и др. на токи 1,5–2,0 А. Диаметр медной проволоки, используемый в таких приборах составляет 40–50 мкм. Многочисленные публикации показывают, что интерес к использованию медной проволоки диаметром менее 25 мкм неуклонно растет.

Присоединение золотых (медных) проводников методом «шарик-клин» в микроэлектронике представляет собой сложный технологический процесс. Качество сварного соединения зависит от многих факторов: используемых материалов, точности работы системы передачи усилия на рабочий микроинструмент установки присоединения, ультразвуковой системы и геометрии микроинструмента (капилляра). Современное промышленное оборудование, как зарубежное, так и отечественное, позволяет осуществлять сборку приборов различной сложности. Современные достижения получены за счет бурного развития компьютерных технологий и их использования в оборудовании сборки полупроводниковых приборов, обеспечивая при этом высочайшую точность и гибкость оборудования. Лидерами на мировом рынке сборочного оборудования являются такие компании, как Kulicke and Soffa (США) и ESEC (США). Производительность автоматических установок этих компаний превышает 10 соед./с и обеспечивают технологию сборки приборов с шагом между контактными площадками 35–40 мкм.

При разработке процессов присоединения решаются следующие проблемы:

1. Снижение температуры подогрева рабочей зоны. В стандартном термозвуковом присоединении температура рабочей зоны находится в диапазоне 220–240ºС. Использование низкотемпературного припоя или клея для посадки кристаллов на носитель (или в корпус) требует снижения температуры рабочей зоны до 90-100ºС. Эта задача решается за счет использования ультразвуковых систем повышенной частоты 90-140 кГц и подогрева микроинструмента. Подогрев микроинструмента используется в основном при сборке гибридных изделий в массивных корпусах, которые нагревать не представляется возможным.

2. Исключение кратерообразования и образования микротрещин под

сварным соединением при использовании медной проволоки, так как она имеет более высокую микротвердость по сравнению с золотой проволокой. Для этого необходимы исследования по оптимизации структуры контактной площадки, введения дополнительного укрепляющего слоя и др.

3. Исключение на выводных рамках драгоценных металлов для снижения стоимости прибора, что требует оптимизации технологических режимов и микроинструмента, обеспечивающих необходимую надежность соединений.

4. Контроль процесса присоединения с помощью различных сенсоров и программных алгоритмов.

5. Моделирования процесса присоединения и параметров технологической системы микросварки с использованием современных комплексов типа ANSYS для оптимизации параметров на стадии разработки оборудования.

6. Совершенствование сплавов материалов проволоки, особенно для снижения твердости медной проволоки и использования тонкого покрытия из палладия медной проволоки для предотвращения ее окисления.

6.2. Методы формирования шарика в защитной атмосфере

Как было отмечено выше, при использовании медной проволоки в процессе присоединения методом «шарик-клин» необходимо использование защитной среды при формировании шарика для получения его сферичности и предотвращения окисления. Использование обычных инертных газов, таких как аргон или азот, не позволяет достичь стабильных результатов. Применение формир-газа, представляющего собой смесь 95% азота и 5% водорода, позволило получить процесс образования шарика на медной проволоке стабильным. Однако устройство подвода защитного газа представляет собой сложную конструкцию (рис. 6.1), так как необходимо получить равномерную защитную среду и задать определенную скорость подачи газа [4].

Форма получаемых шариков на конце медной проволоки зависит от скорости подачи газа (рис. 6.2) [5]. При скорости подачи защитного газа 0,1 л/ мин видно, что образуемый шарик имеет неправильную форму. Очевидно, что окислительный процесс препятствует образованию сферического шарика. Экспериментально установлено, что оптимальной скоростью подачи защитного газа является 0,4– 0,6 л/мин. Избыточная скорость подачи защитного газа (выше 1л/ мин) приводит к ассиметрии образуемых шариков за счет резкого

охлаждения обдувающим газом.

Температура плавления медной проволоки(1083ºС) не намного выше, чем золотой (1063ºС), однако значение теплоемкости меди (0,4–0,55 кДж/кг· ºС) значительно больше, чем у золота (0,12–0,15 кДж/кг· ºС), поэтому для расплава проволоки требуется больше энергии. При электроискровом способе формирования шарика для медной проволоки приходится увеличивать ток разряда. Соответственно источник разряда должен быть специальной конструкции при использовании медной проволоки.

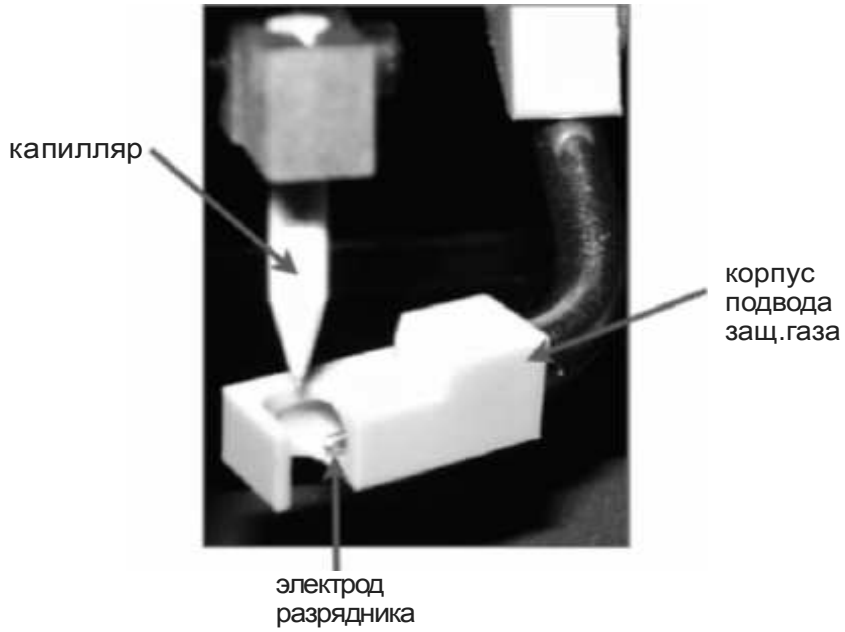


Рис. 6.1. Конструкция электрода разрядника с подачей защитного газа

Цикл образования шарика в защитной среде можно описать следующим образом. Электрод разрядника, помещенный в керамический изолятор, через который поступает с определенной скоростью защитный газ, подводится с помощью привода к микроинструменту, под торцем которого выступает кончик проволоки.

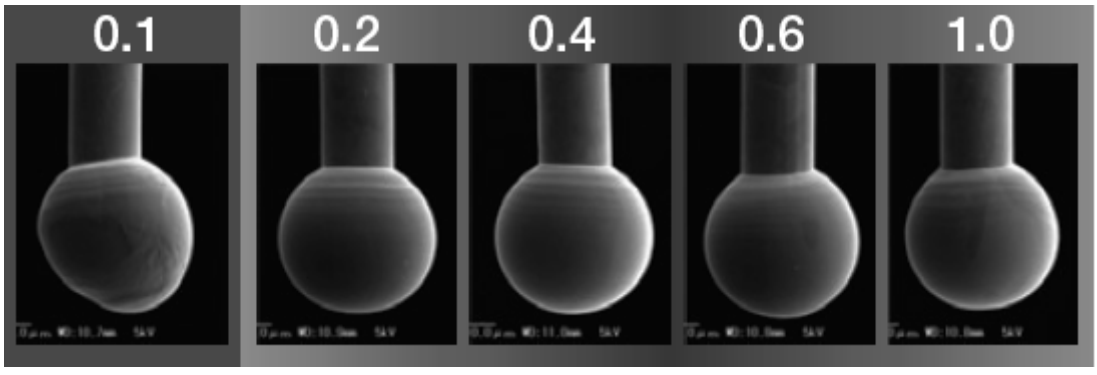


Рис. 6.2. Форма шариков в зависимости от скорости подачи газа

Выходящий защитный газ направляется так, чтобы струя газа была направлена на кончик проволоки. Затем подается импульс высокого напряжения на электрод разрядника и возникает искровой разряд между разрядником и кончиком проволоки (рис. 6.3).

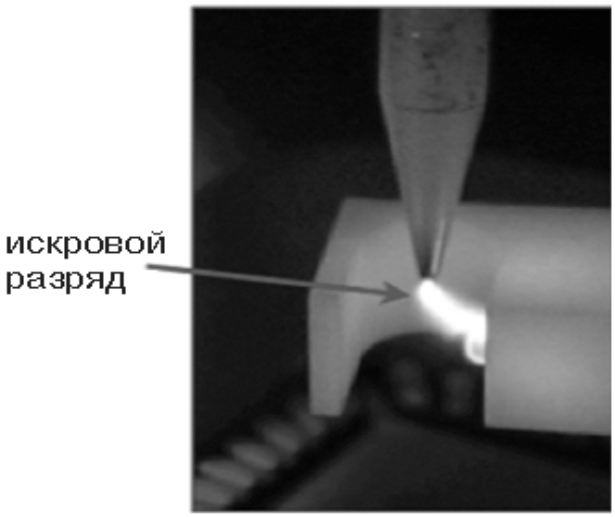


Рис. 6.3. Искровой разряд между проволокой и электродом разрядника

В результате разряда искровой промежуток разогревается до температуры, достаточной для расплавления проволоки. После определенного программируемого времени разряд прекращается, и электрод разрядника отводится от микроинструмента, под торцем которого находится оплавленный шарик заданного диаметра. Далее по циклу шарик приваривается к контактной площадке кристалла и формируется петля межсоединения между кристаллом и внешним выводом прибора. Ток разряда зависит от диаметра применяемой проволоки. Например, для медной проволоки диаметром 50 мкм ток разряда порядка 80–90 мА и время разряда 4–6 мс. Для увеличения срока службы электрода разрядника используются тугоплавкие сплавы.

6.3. Устройства формирования шарика электроискровым способом

В современных установках присоединения методом «шарик-клин» для формирования шарика применяют специальные устройства электроискрового разряда. До середины 80-х годов формирователи высоковольтного импульса состояли из устройства зарядки высоковольтного конденсатора и последующей разрядки заряженного конденсатора через токоограничительную цепь в момент команды запуска устройства (рис. 6.4).

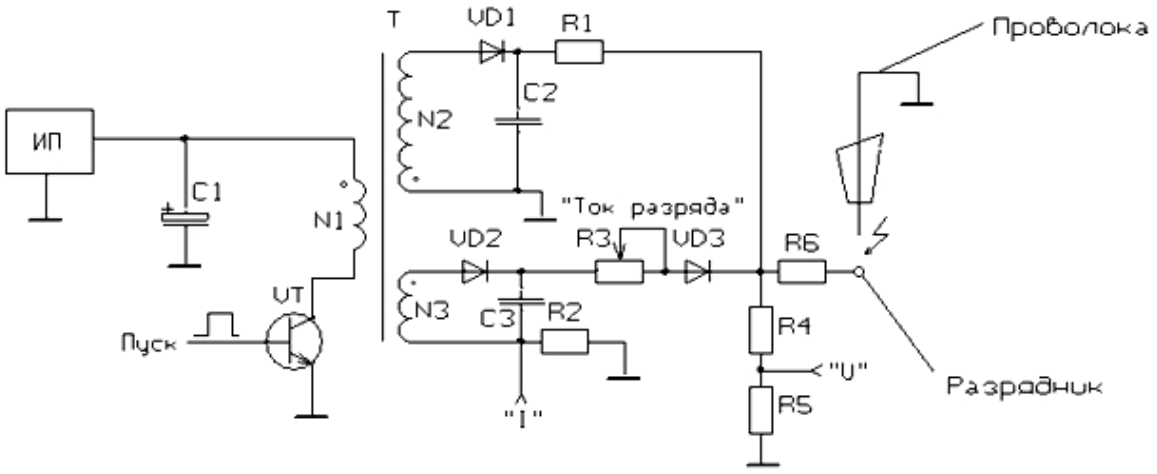


Рис. 6.4. Схема формирователя высоковольтного импульса

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии конденсатор С1 емкостью 150 мкФ заряжается от регулируемого источника питания до напряжения 100–150 В. При поступлении на вход транзисторного ключа VT запускающего импульса, он открывается и в первичной обмотке N1 появляется нарастающий ток. Вторичная обмотка N3 трансформатора Т фазирована таким образом, что в момент открытия транзисторного ключа на ней появляется положительное напряжение по отношению к аноду диода VD2. Диод VD2 открывается и конденсатор С3 емкостью порядка 0,068 мкФ заряжается до напряжения 1200–1400 В. Этого напряжения недостаточно для пробоя искрового промежутка длиной 1,2–1,4 мм между кончиком проволоки и разрядником. Чтобы получить напряжение, необходимое для пробоя, после окончания зарядки конденсатора С3 (время 1–3 мс), транзисторный ключ VT закрывается и на его коллекторе возникает короткий импульс амплитудой до 400 В. Этот импульс трансформируется через высоковольтную обмотку N2 и заряжает конденсатор С2 емкостью 100 пФ до напряжения 4000–5500 В. Такое напряжение достигается выбором соответствующего коэффициента трансформации обмоток N2 и N1 (N2/N1=15).

Высокое напряжение с конденсатора С2 поступает на разрядник через резистор R1 номиналом 2 мОм и вызывает пробой искрового промежутка. Резистор R1 выбирается большим для ограничения пробойного тока разряда до 2–3 мА и только для инициализации разряда. Диод VD3 защищает разрядную цепь от пробойного импульса. После пробоя искрового промежутка, напряжение с конденсатора С2 падает на резисторе R1 за счет протекающего тока и в разрядном промежутке напряжение порядка 600 В. Напряжение с конденсатора С3 открывает диод VD3 и через резистор R3 тока разряда

поступает на разрядник. Поскольку разрядный промежуток является проводящим за счет пробойного напряжения, конденсатор С3, предварительно заряженный до напряжения 1200–1400В, разряжается через цепь: R3-VD3-R6-разрядный промежуток. Резистор R6 номиналом 1–2 кОм устанавливается вблизи разрядника для подавления возникающей помехи от разряда.

Время разряда определяется разрядной цепью С3-R3 и напряжением на конденсаторе С3. Резистор R2 служит для контроля тока разряда, высокоомный делитель R4-R5 для контроля выходного напряжения. Резистор R3 служит для установки начального тока разряда, который спадает по мере разрядки конденсатора С3. Правильное соотношение напряжения на конденсаторе С3 и установки времени разряда определяет качество и симметрию образуемых шариков.

Подобные формирователи успешно эксплуатировались в установках с присоединяемой проволокой диаметром в диапазоне 25–40 мкм и контактными площадками не менее 100х100 мкм. При этом на электрод разрядника, как правило, подавался высоковольтный импульс положительной полярности по отношению к проволоке, так как при обратной полярности требовался ток большей амплитуды и прецизионная схема управления разрядом. Быстрое развитие технологии сверхбольших интегральных схем и уменьшение размеров контактных площадок потребовало использование проводников диаметром менее 20 мкм и соответственно высокой воспроизводимости шариков.

Установлено, что при подаче отрицательной полярности высоковольтного импульса на электрод по отношению к проволоке можно получать шарики стабильного диаметра на проволоке малых диаметров [1]. Обнаружены дополнительные преимущества: увеличение срока службы рабочего инструмента, уменьшение нагарообразования и отсутствие переноса посторонних частиц на формируемый шарик со стороны электрода. Проведенные расчеты показали, что в случае подачи на электрод высоковольтного импульса положительной полярности передача тепла к проволоке происходит через боковые поверхности выступающего конца проволоки [6], а при обратной полярности источник нагрева локализован под торцем кончика проволоки симметрично оси проволоки.

Цикл формирования шарика можно представить следующим образом. На электрод разрядника, входящий в состав сварочной головки подается высоковольтный импульс положительной или отрицательной полярности длительностью, от 1,5 до 20 мс в зависимости от диаметра проволоки. В момент подачи высоковольтного импульса конец электрода находится от конца

проволоки на расстоянии 1,0–1,5 мм. Это обеспечивается за счет предварительной фиксации электрода в сварочной головке или с помощью механизма подвода электрода (рис. 6.5). Для электрического пробоя такого воздушного промежутка требуется напряжение порядка 3,5–5,5 кВ. Возникающий разряд разогревает газ между электродом и проволокой до температуры, необходимой для расплавления конца проволоки. Под действием сил поверхностного натяжения расплав формируется в шар. При образовании шарика очень важно минимизировать отжиг проволоки над образованным шариком, так называемую HAZ (Heat Affected Zone) зону по зарубежной терминологии.

Длина разогреваемого участка проволоки раскаленным газом значительно зависит от полярности электрод – проволока. В случае положительной полярности на электроде кончик проволоки окружен раскаленным газом на длине 0,15-0,5 мм (зависит от тока разряда) , что приводит к сильному отжигу проволоки над шариком, приводящим к ослаблению прочности проволочного соединения в этом месте.

На рис. 6.6,а показана форма искрового разряда при положительной полярности на электроде по отношению к медной проволоке диаметром 50 мкм, которая обычно заземлена. Разряд охватывает часть проволоки над кончиком проволоки приблизительно 0.5 мм при токе разряда 27 мА, что приводит к сильному отжигу проволоки над образуемым шариком.

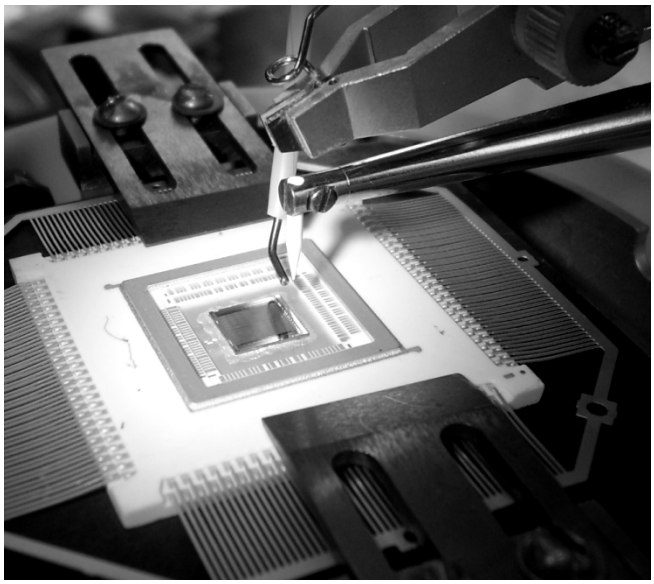
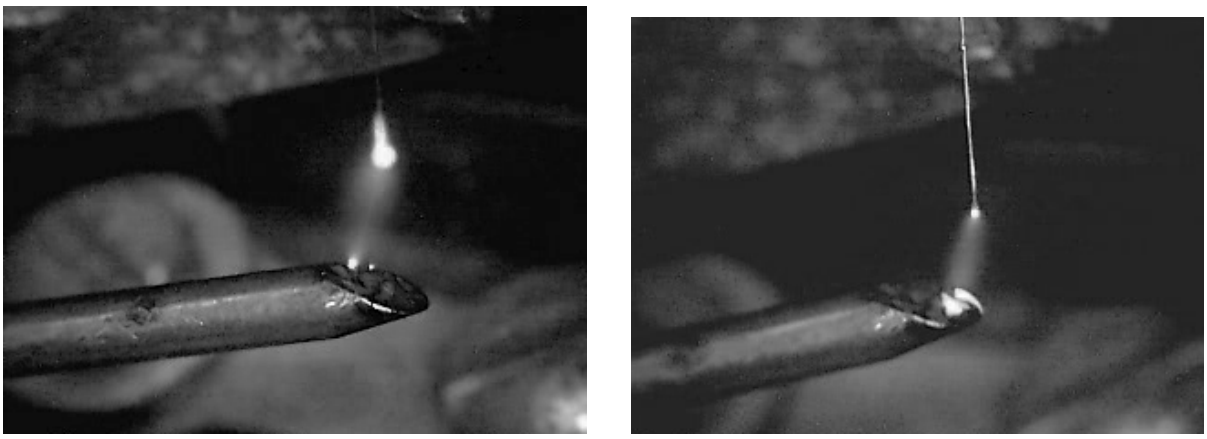


Рис. 6.5. Положение электрода разрядника относительно капилляра

Эта зона может быть фактором дестабилизации последующего формообразование перемычки и дефектов (микротрещин) перехода шарик-

проволока. При подаче отрицательной полярности на электрод по отношению к проволоке форма разряда кардинально меняется (рис. 6.6,б).



а б

Рис. 6.6. Форма искрового разряда на кончике медной проволоки при положительной (а) и отрицательной (б) полярности на электроде

Разряд локализуется под кончиком проволоки симметрично оси проволоки [6]. Ток разряда в обоих случаях был стабилизирован высоковольтным источником тока. Типовая осциллограмма разрядного тока показана на рис. 6.7. Экспериментально установлено, что размер горячей зоны разряда на проволоке при положительной полярности на электроде уменьшается при снижении тока разряда. Таким образом, спадающий ток разряда (рис. 6.8) предпочтителен для формирования шариков на тонкой проволоке (25–30 мкм) и уменьшения отжига проволоки над местом перехода проволоки в шар.

Рис.6.7. Осциллограмма стабилизированного тока разряда

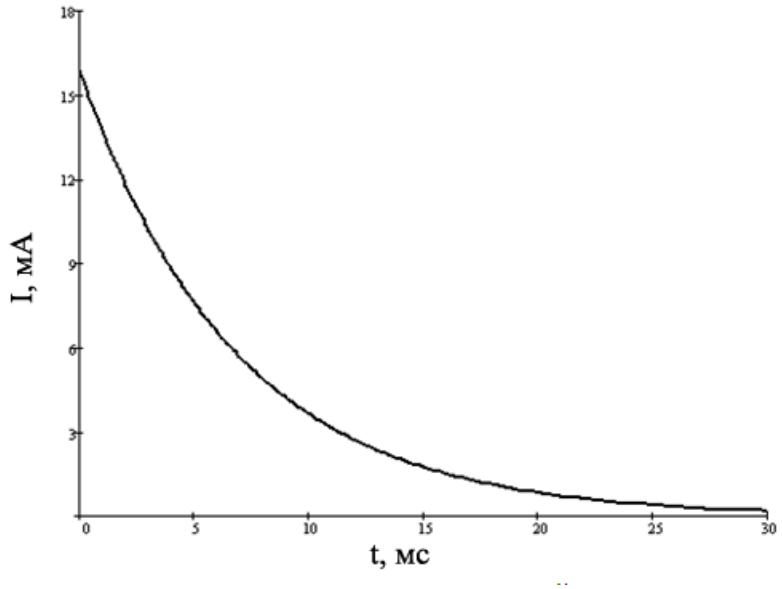


Рис. 6.8. Форма тока разряда при положительной полярности на электроде

Рассмотрим энергетические затраты искрообразования при положительной и отрицательной полярности разряда. Для вычисления общей подводимой энергии ***E*** разряда используем следующее соотношение:

$$E = U \cdot I \cdot t\,, \qquad (6.1)$$

где *U*–напряжение разрядного промежутка, *I*–ток разряда и ***t*** – время разряда.

Напряжение разрядного промежутка зависит от зазора между электродом и кончиком проволоки и от величины тока разряда (рис. 6.9). Так, при токе разряда 27 мА и зазоре 1,6 мм напряжение разрядного промежутка составляет 500 В. Для получения шарика диаметром 75–80 мкм на золотой проволоке диаметром 30 мкм при стабилизированном токе разряда 27 мА необходимо время 2,5–2,7 мс при отрицательной полярности на электроде по отношению к проволоке.

Установлено также, что при положительной полярности на электроде для получения такого же шарика необходима спадающая форма тока с начальной амплитудой тока 12 мА и длительностью разряда 15–16 мс при постоянной времени разряда 6,8 мс.

Вычислим подводимую энергию для обоих случаев. Для случая отрицательной полярности на электроде имеем:

$$E_1 = UIt = 500 \cdot 0,027 \cdot 0,0026 = 35,1 мДж \qquad (6.2)$$

Для вычисления энергии для случая положительной полярности на электроде, необходимо вычислить определенный интеграл огибающей импульса тока разряда:

$$I \cdot t = \int_0^{15} 12e^{-t/RC} dt = \int_0^{15} 12e^{-t/6,8} dt = 72,6 \cdot 10^{-6} A \cdot c\,, \qquad (6.3)$$

отсюда значение энергии при положительном потенциале на электроде:

$$E_2 = 500 \cdot 72,6 \cdot 10^{-6} = 36,3 мДж\ . \qquad (6.4)$$

Как видно из приведенных расчетов, подводимая энергия практически одинаковая, однако процесс передачи тепла происходит различно.

Как было отмечено выше, при положительной полярности на электроде передача тепла происходит с боковых поверхностей цилиндрической части проволоки высотой 0,5 мм при токе разряда 27 мА. Соответственно получить шарики стабильного диаметра на конце проволоки диаметром 20 мкм и менее затруднительно ввиду избыточного расплава проволоки. При отрицательной полярности электрода источник разогрева проволоки локализован под кончиком проволоки и отжиг проволоки происходит преимущественно за счет теплопроводности проволоки.

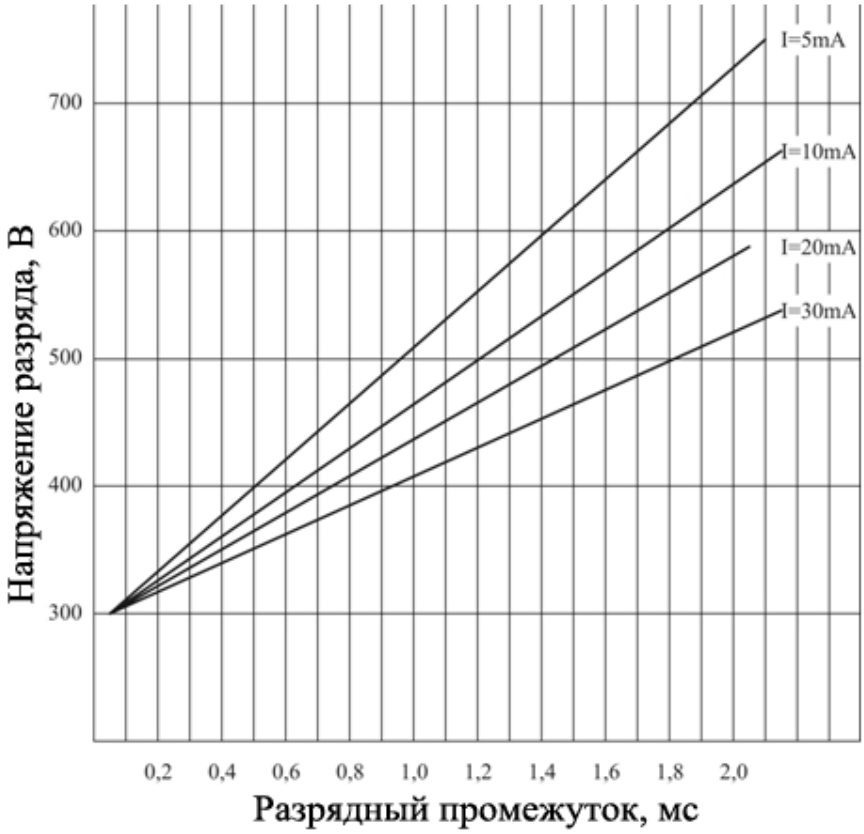


Рис. 6.9. Зависимости напряжения разряда от зазора и величины тока

Учитывая короткое время разряда (в 3–4 раза меньше, чем при положительной полярности), отожженная зона проволоки над шариком значительно меньше.

Ведущие производители проволоки, такие как Kulicke and Soffa (США), Heraeus (Германия) и Tanaka (Япония) в настоящее время предлагают проволоку для микросварных соединений с различной зоной отжига. На рис. 6.10 показаны размеры зоны отжига для золотой проволоки диаметром 25 мкм фирмы Tanaka [7] при диаметре шарика 50 мкм, времени разряда 1 мс, токе разряда 28 мА. Для проволоки типа GLF зона отжига составляет 85 мкм.

Размер зоны отжига не только определяет прочность полученных соединений на отрыв, но и влияет на формообразование перемычек. Это особенно актуально при получении перемычек малой высоты в технологии smart-card. Опытная разварка соединений на установке ЭМ-4320 [8] показала зависимость высоты перемычек от тока разряда.

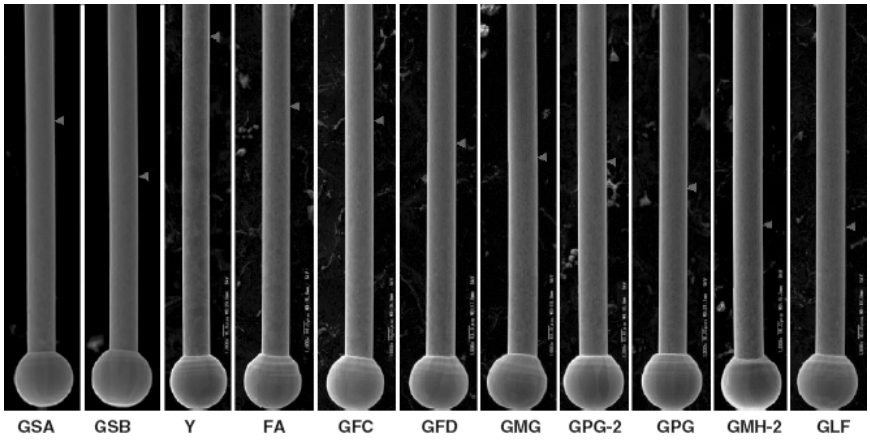


Рис. 6.10. Размеры зоны отжига для различных типов золотой проволоки

Применение технологии образования шарика с использованием отрицательной полярности на электроде минимизирует отжиг проволоки, что позволяет формировать низкопрофильные перемычки. Самые “ горячие” точки в газовом разряде находятся в приэлектродном пространстве (у катода и у анода) и видимы на рисунке 6.6 по яркости световых пятен.

Схема устройства формирования шарика с отрицательным выходным напряжением представлена на рис. 6.11. Устройство работает следующим образом. По сигналу запуска устройства, транзисторный ключ VT1 открывается на короткое время 1-2 мс и закрывается. Импульс напряжения в коллекторе VT1 трансформируется во вторичную обмотку N2 трансформатора T. Вторичная обмотка трансформатора фазирована таким образом, что

конденсатор С2 заряжается до отрицательного пробойного напряжения величиной 3500–5500 В. Одновременно, по сигналу запуска система контроля СК формирует через оптронную развязку импульс запуска формирователя импульса тока разряда ФИ. Формирователь импульса ФИ вырабатывает прямоугольный импульс программируемой амплитуды, который поступает в базу транзистора VT2, являющийся источником тока разряда. В эмиттер транзистора VT2 поступает напряжение 1200 В от источника питания.

Формирователь развязан с помощью оптрона от корпуса устройства и запитан от собственного источника питания. Ток разряда определяется напряжением на резисторе R1, являющимся датчиком тока. Напряжение на резисторе R1 равно напряжению, поступающему на базу транзистора с формирователя импульса ФИ минус напряжение база-эмиттер.

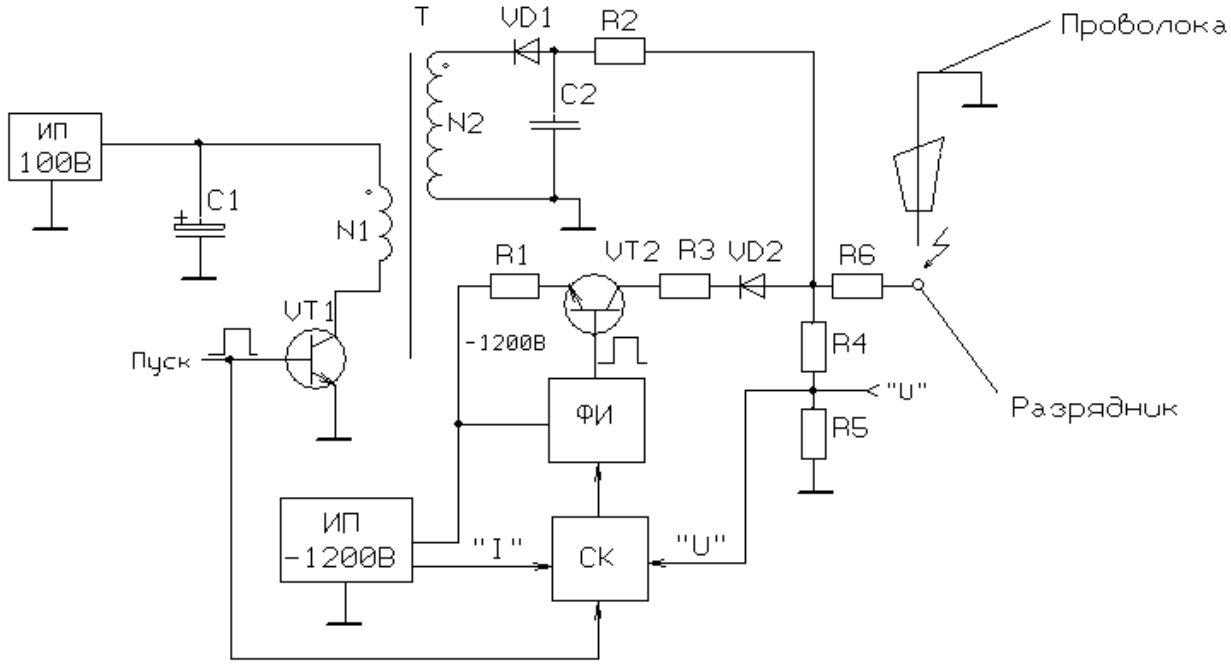


Рис. 6.11. Схема устройства формирования шарика отрицательной полярности

При достижении напряжения на конденсаторе С2 напряжения пробоя, между электродом разрядника и проволокой образуется искровой разряд, ограниченный резистором R2. При пробое разрядного промежутка напряжение с конденсатора С2 падает на резисторе R2, в результате чего напряжение разрядного промежутка составляет 500–600 В. Поэтому диод VD2 открывается и напряжение с выхода источника тока поступает на электрод разрядника и поддерживает искровой разряд при заданном токе. как на рис. 9. Система контроля СК контролирует напряжение разрядного промежутка, поступающего

с резистивного делителя R4, R5 и ток высоковольтного источника. Затем произведение тока и напряжения интегрируется интегратором, выходной сигнал которого, сравнивается с заданным порогом. При достижении порога источник тока выключается и разряд прекращается.

6.4. Методы контроля процесса образования шарика

Диаметр образуемых шариков на конце проволоки пропорционален подводимой энергии, вычисляемой по формуле 6.1. Из рис. 6.9 видно, что при изменении зазора от 1,0 до 1,4 мм напряжение разрядного промежутка изменяется на 40–50 В при токе разряда 30 мА. Это не превышает 10% напряжения разрядного промежутка и в некоторых разработках не учитывается, т.е. считается постоянным. Таким образом, стабилизируя ток разряда и время разряда можно достичь хорошей воспроизводимости диаметра образуемых шариков. Однако, для достижения более точного контроля подводимой энергии, а значит и диаметра образуемых шариков, необходимо учитывать изменение напряжения в разрядном промежутке как перед началом разряда, так и во время разряда, т.к. при образовании шарика происходит изменение зазора [9]. Изменение напряжения в разрядном промежутке вызывается двумя причинами. Первая–это колебания расстояния от кончика проволоки до разрядника перед началом разряда, что происходит из-за нестабильности образуемого кончика проволоки под торцем капилляра. Это зависит в основном от используемых материалов, типа капилляра и режимов сварки. Вторая –это изменение зазора в процессе образования шарика. Из рис. 6.12 видно, что в процессе формирования шарик приближается к торцу капилляра. Изменение зазора при образовании шарика на золотой проволоке диаметром 30 мкм составляет 0,2 мм при диаметре шарика равным 60 мкм. Таким образом, для прецизионного контроля образуемых шариков необходимо учитывать напряжение разрядного промежутка [9].

К другим методам контроля процесса образования шарика относятся контроль отсутствия кончика проволоки под торцем капилляра и наличие контакта между кончиком проволоки (длинный хвост) и разрядником. Величину длины кончика проволоки под торцем инструмента или его отсутствие контролируют обычно по величине пробойного напряжения.

Чем ближе проволока к разряднику, тем меньшее напряжение пробоя и наоборот, напряжение с высоковольтного делителя поступает на пороговое устройство, сравнивающее сигнал с установленным порогом. Наличие

короткого замыкания между проволокой и разрядником проверяется по появлению тока в цепи разряда перед началом пробойного импульса, например с помощью задержки начала пробойного импульса.

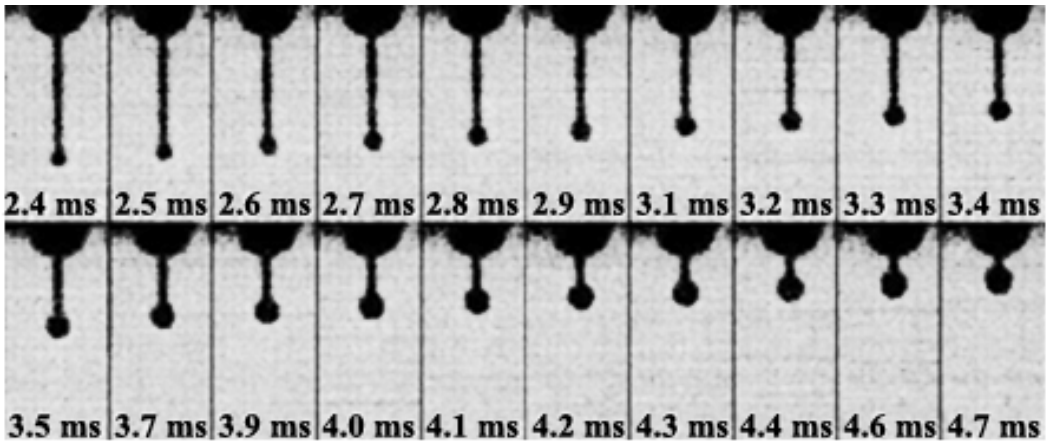


Рис. 6.12. Скоростная видеосъемка процесса образования шарика

6.5. Оборудование термозвукового присоединения проволочных выводов методом «шарик-клин» в изделиях микроэлектроники

Оборудование для присоединения проволочных выводов методом «шарик-клин» можно разделить на полуавтоматическое и автоматическое. Полуавтоматическое оборудование подразумевает обычно отсутствие машинного зрения для совмещения и ручную подачу изделия на рабочий столик оператором. В автоматическом оборудовании предусматривается максимальная автоматизация всех операций, в том числе автоматическое совмещение и подача изделий на позицию сборки. Если при работе на полуавтоматическом оборудовании оператор самостоятельно может контролировать процесс присоединения, то в автоматическом оборудовании должны быть разработаны методы и алгоритмы автоматического контроля процесса с выводом соответствующих сообщений оператору.

Из серийного отечественного полуавтоматического оборудования можно выделить установку ЭМ-4320 (рис.6.13), которая обеспечивает автоматический цикл присоединения методом «шарик-клин» после ручного совмещения оператором первой и второй точки сварки. Установка имеет два шаговых привода по координатам Z и Y, позволяющих программировать параметры петли и режимы сварки. В установке используется ультразвуковая система повышенной частоты (94 или 110 кГц) для обеспечения процесса термозвуковой сварки при пониженной температуре рабочего стола в

диапазоне 90–120ºС. Установка позволяет присоединять золотые проводники диаметром 17,5–50 мкм методом «шарик-клин». Совмещение с точками сварки оператор осуществляет с помощью стереоскопического микроскопа и с помощью световой указки. Температура рабочей зоны задается и контролируется встроенным терморегулятором.

Из многочисленного полуавтоматического импортного оборудования в числе лидеров установки фирм Kulicke and Soffa (США) и TPT(Германия). Установка 4524AD Kulicke and Soffa (рис. 6.14,а) также имеет два привода по координатам Z и Y, позволяя программировать формы петель. Совмещение с точкой сварки осуществляется аналогично через микроскоп и световую указку. Установка HB16 TPT (рис. 6.14,б) отличается тем, что управление построено на встроенной компьютерной системе, которая придает установке дополнительные опции и расширяет технологические возможности.

Рис. 6.13. Установка термозвуковой сварки «шарик-клин» ЭМ-4320

Из отечественного автоматического оборудования можно представить автомат термозвуковой микросварки проволочных выводов ЭМ-4360 (рис. 6.15,а), который позволяет осуществлять присоединение золотой проволокой диаметром 17,5–50 мкм в автоматическом режиме со скоростью 110–130 мс на перемычку.

а б

Рис. 6.14. Установки микросварки 4524AD (а) и HB16 (б)

Установка оснащена системой автоматического совмещения и автоматической системой подачи приборов с возможностью быстрой переналадкой при смене изделий. Существует модификация установки для сборки приборов на гибких носителях по технологии smart- card.

На рис. 6.15,б приведена автоматическая установка последнего поколения Maxμm Ultra Kulicke and Soffa (США), которая обеспечивает присоединение золотых проводников диаметром 13–50 мкм со скоростью 60 мс на перемычку.

а б

Рис. 6.15. Автоматы микросварки ЭМ-4360 (а) и Maxμm Ultra (б)

Сварочная головка нового поколения оснащена ультразвуковой системой с частотой 120 кГц. Установка также поставляется с опциями для возможности присоединения медной проволокой. В эти опции входит разрядник с подачей защитного газа и система контроля смеси формир –газа.

Список литературы к главе 6

1. Harman G.G. Wire bonding in microelectronics. 3- edition. N.Y.: McGraw Hill . 2010. – 432 p.

2. Study of 6 mil Cu Wire Replacing 10–15 mil Al Wire for Maximizing Wire–Bonding Process on Power ICs / Y. Jiang, R. Sun, Y. Yu, Z. Wang // IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing, 2010, V. 33, N. 2.– P. 135–142.

3. Concurrent Optimization of Crescent Bond Pull Force and Tail Breaking Force in Thermosonic Cu wire Bonding Process / J. Lee, M. Mayer, Y. Zhou,

S.J. Hong, J.T. Moon // IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing, vol.32, №3 July 2009.– P.157–163.

4. Enabling High Volume Fne Pitch Copper Wire Bonding: Enhancements to Process and Equipment Capability/ J. Foley, H. Clauberg, B. Chylak // Electronic System Integration Technology Conference (ESTC) September 2010.– P. 1–4.

5. www.tanaka-bondingwire.com// guide_Cu.pdf.

6. Electrode Heating in Wire to Plane Arc / M.A. Jog, I.M. Cohen, P.S. Ayyaswamy// Phys. Fluids B4 (2) February, 1992 .– P. 465-472.

7. www.tanaka-bondingwire.com// guide_Au.pdf.

8. Ультразвуковая микросварка ленточных выводов при монтаже мощных полупроводниковых приборов / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, С.С. Волкенштейн, И.Б. Петухов // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2009. Сер. В . – № 2. – С. 127–132.

9. Устройство для образования шарика при микросварке/ В.М. Головин, И.Б. Петухов // Патент РФ №1580692 от 25.03.1993.

10. Ланин, В.Л. Выбор полярности электрического разряда при формировании шарика в установках присоединения проволочных выводов / В.Л. Ланин, А.Ф. Цинман, И.Б. Петухов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. –2011.– №3.–С. 110–116.

ГЛАВА 7
ПРЕЦИЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ПРИВОДА ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

7.1. Исполнительный координатный привод прямого действия для оборудования микро- и наноэлектроники

Современный уровень автоматизации в большинстве областей деятельности человека принял глобальный характер и во многом стал индикатором эффективности научно-технической и экономической деятельности. В таких отраслях промышленности, как точное приборостроение и машиностроение, особенно микро- и наноэлекроника, невозможно себе представить производство без поддержки комплексных автоматических машин и автоматов. Базовым исполнительным элементом во всем существующем многообразии систем прецизионной автоматизации является преобразователь электромагнитной энергии в механические перемещения или электромеханический преобразователь (ЭМП). При этом уровень развития и технические возможности ЭМП во многом определяют уровень автоматизации и возможность внедрения передовых технологий. ЭМП являются также базовыми элементами систем перемещений, в которых в качестве привода используется привод прямого действия (ППД), представляющий собой управляемый ЭМП с глубоким редуцированием и масштабированием движения в широких диапазонах перемещений, скоростей и ускорений, осуществляемых без промежуточных механических трансмиссий или других преобразователей.

Привод прямого действия в настоящее время широко используется в оборудовании производства электронной техники. Все большее применение находят системы перемещений на базе привода прямого действия, реализующего перемещение подвижного элемента по нескольким координатам одновременно с высокой скоростью и точностью отработки перемещения. Большинство многокоординатных дискретных систем электропривода включают линейные приводы прямого действия, которые непосредственно реализуют поступательное перемещение подвижного элемента без преобразования с помощью кинематических звеньев из вращательного движения. Для достижения высоких динамических и метрологических характеристик требуется максимальная интеграция элементов электропривода,

т. е. их конструктивное объединение в единый исполнительный орган, совершающий требуемые сложные движения в пространстве.

Системы прямого привода подразделяются на линейные, поворотные и специальные многокоординатные системы. Наиболее известный вариант специальной системы прямого привода является двухкоординатный планарный двигатель. Другие типы специальных приводов прямого действия, такие как цилиндрические, сферические и комбинированные, имеют достаточно ограниченное применение. Главным элементом таких приводов является исполнительный мотор или двигатель. В классическом исполнении линейного двигателя его якорь, питаемый от источника переменного тока, перемещается над статором, состоящим из стальной пластины и постоянных магнитов. В этом случае статор создает стационарное магнитное поле со стабильным уровнем намагниченности воздушного зазора, формируя так называемую магнитную дорогу. Вследствие взаимодействия переменного поля якоря со статическим полем статора реализуется перемещение подвижного элемента исполнительного мотора.

Поворотные двигатели представляют собой электромагнитную систему, в которой в зависимости от исполнения подвижной частью может быть как якорь, так и статор. В последнем случае якорь закрепляется неподвижно, а перемещение совершает подвижное статорное кольцо. Но и в этом случае формирование движения осуществляется по магнитной дороге замкнутого цилиндрического вида.

Частными случаями поворотного двигателя являются кольцевой и сегментный двигатели. Сегментный синхронный двигатель состоит из нескольких сегментов статора с трехфазной системой обмоток и ротора с запрессованными редкоземельными постоянными магнитами. Равномерность вращения в сегментном двигателе достигается благодаря синусоидальной коммутации токов в фазах двигателя. Усилие на ротор передается непосредственно через воздушный зазор, что исключает износ движущихся частей. Главные достоинства сегментного двигателя – полый вал большого диаметра и сравнительно низкая стоимость при больших диаметрах ротора, за счет модульности конструкции.

Кольцевой синхронный двигатель, как и сегментный, конструктивно состоит из якоря и статора, которые в отличие от предыдущего выполнены в виде колец: одно, соответственно, с электромагнитными модулями, а второе – с магнитной дорогой. Несмотря на эти конструктивные особенности все

выходные эксплуатационные характеристики кольцевого синхронного двигателя близки к характеристикам сегментного двигателя.

Существует несколько разновидностей систем прямого привода отличающихся конструктивной реализацией. Классический вариант реализации линейного двигателя (LSM) приведен на рис. 7.1.

Блок электромагнитных модулей размещается в алюминиевом корпусе, выполненном с набором крепежных отверстий и, при необходимости, системой охлаждения для мощных электродвигателей. В корпус встраивается набор шихтованных сердечников из электростали, несущих на себе катушки из медного провода или медной шины. Взаимное геометрическое расположение сердечников с катушками позволяет, при определенной схеме коммутации, обеспечить бегущее магнитное поле в нижней плоскости двигателя при подаче трехфазного напряжения 540(300) В. Индуцированное магнитное поле взаимодействует со статическим полем постоянных магнитов, расположенных в плоскости магнитной дороги, создавая синхронизирующее усилие в продольном направлении по всей площади зазора между подвижной и неподвижной частью линейного двигателя.

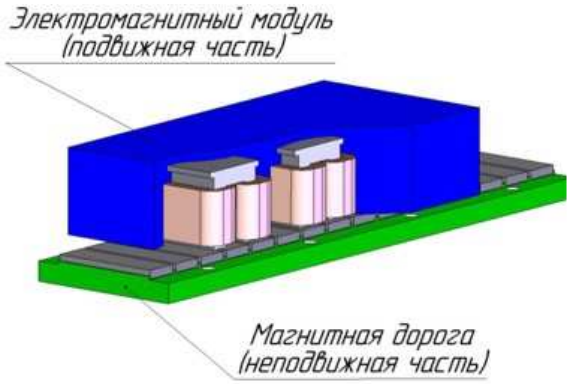


Рис. 7.1. Линейный двигатель типа LSM

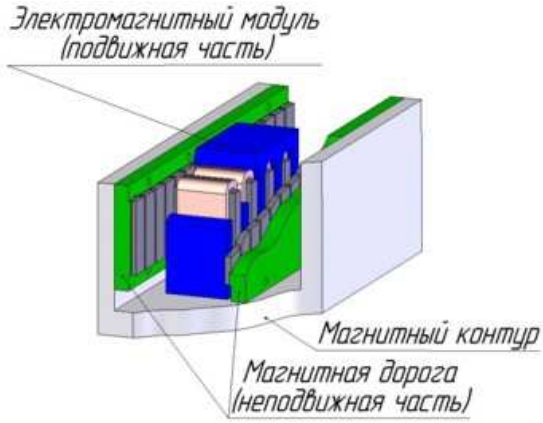


Рис. 7.2 . Линейный двигатель типа LSSM

В такой конструктивной реализации линейного двигателя, кроме продольного усилия в пределах 500–5000 Н, возникает также усилие в поперечном направлении (усилие магнитного притяжения), значение которого в 3–4 раза превышает тяговое усилие двигателя. Усилие магнитного притяжения прикладывается к системе линейных направляющих, обеспечивая их предварительный натяг и выбирая все зазоры в вертикальном направлении. Широкое применение этот тип двигателя прямого действия получил в портальных конструкциях различного назначения, начиная от систем автоматической упаковки и плазменного/лазерного раскроя материала и

заканчивая прецизионными электроэрозионными станками, гравировальными машинами и транспортными системами.

Некоторые технические характеристики линейных синхронных двигателей прямого действия типа LSM, серийно выпускаемых предприятием «Рухсервомотор», приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Технические характеристики синхронных двигателей серии LSM

Модель двигателя	**Пиковое усилие Fp (2…3 с), (обмотка 20 °C)**	**Длительное усилие при вод. охл. (обмотка 120 °C)**	**Длительное усилие при возд. охл. (обмотка 120 °C)**	**Рекомен-дуемое напряжение питания DC**	**Макс. скорость при Fa (обмотка 20 °C)**
	Fp, Н	**Fw, Н**	**Fa, Н**	**Us, В**	**Va, м/с [S/T]**
LSM-P-36-163×25-…	254	212	109	310	10,0 / 10,0
LSM-P-36-163×50-…	509	418	214		6,9 / 10,0
LSM-P-36-163×75-…	763	617	316		4,6 / 8,1
LSM-P-36-307×25-…	509	424	218	310	6,8 / 10,0
LSM-P-36-307×50-…	1017	836	429		3.4 / 6,0
LSM-P-36-307×75-…	1526	1234	633		4.0 / 7,0
LSM-P-36-307×100	2035	1559	796		6,5 / 10,0
LSM-P-36-451×50-…	1526	1253	643	540	4,0 / 7,0
LSM-P-36-451×75-…	2289	1851	949		2,6 / 4,7
LSM-P-36-451×100	3052	2339	1193		4,3 / 7,6
LSM-P-36-451×150	4579	3394	1727		2,9 / 5,1
LSM-P-36-595×75-…	3052	2468	1265	540	1,9 / 3,5
LSM-P-36-595×100-…	4070	3119	1591		3,2 / 5,7
LSM-P-36-595×150-…	6105	4526	2303		2,1 /3,8
LSM-P-36-739×150-…	7631	5657	2878	540	1,7 / 3,0

На рис. 7.2 приведена магнитная система симметричного синхронного линейного двигателя (LSSM). В данной конструкции электромагнитный модуль помещен между двумя магнитными дорогами, что обеспечивает компенсацию сил магнитного притяжения. Данный тип двигателя прямого действия применяется в системах, где требуемое развиваемое усилие превышает 5 кН и теоретически, путем секционной сборки, может быть собран мотор с тягой в несколько десятков килоньютонов. При этом реализация двигателя по принципу LSM затруднена по причине существенной для конструкции машины величины сил магнитного притяжения в несколько тонн. Основная область

применения данного типа двигателя – высокодинамичные системы в робототехнике, фрезерные и шлифовальные станки.

Следующий распространенный тип привода прямого действия приведен на рис. 7.3 и представляет собой блок катушек в магнитном поле симметрично расположенных магнитных дорог (двигатель типа LSIM).

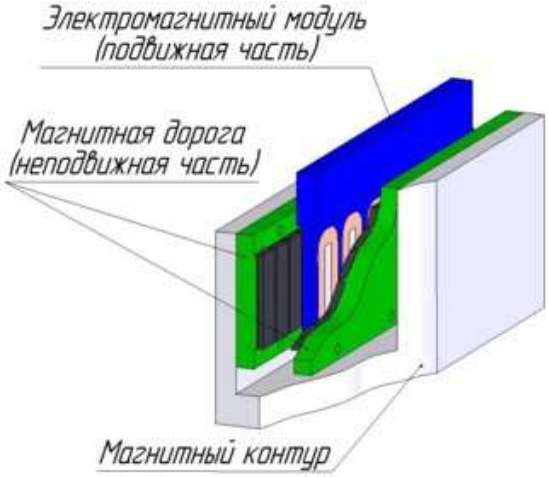


Рис. 7.3. Линейный двигатель типа LSIM

Рис. 7.4. Линейный двигатель типа LSLM

Основное отличие данной конструкции от мотора LSSM – это отсутствие сердечников (магнитопроводов) внутри электромагнитного модуля. Это значительно снижает плотность магнитного поля в рабочем зазоре двигателя и позволяет развивать усилие до нескольких сотен ньютонов. При этом пиковые усилия, в силу отсутствия влияния насыщения сердечников, могут достигать нескольких килоньютонов.

Данный тип прямого привода, при отсутствии сил магнитного притяжения, имеет также относительно низкое значение индуктивности, что позволяет создавать прецизионные координатные системы с наилучшими показателями динамической точности. Основная область применения для данного двигателя – автоматизация процессов производства в электронной промышленности и точном приборостроении. По данному принципу строится так называемый однофазный Coil-motor – однофазный линейный двигатель, работающий в пределах одного полюсного деления магнитной системы электрической машины.

Техническая характеристика линейных синхронных двигателей прямого действия типа LSIM, серийно выпускаемых предприятием «Рухсервомотор», приведены в табл. 7.2. Двигатели типа LSIM, в основном, предназначены для сборочного оборудования с рабочими скоростями перемещений до 5 м/с.

Таблица 7.2

Технические характеристики линейных двигателей серии LSIM

Модель двигателя	Длительное усилие (обмотка 120 °C, возд. охлажд.)	Длительное усилие (обмотка 120 °C, вод. охлажд.)	Пиковое усилие (обмотка 20 °C)	Рекомендуемое напряжение питания DC
	Fa, Н	Fw, Н	Fp, Н	Us, В
LSIM-P-40-92×25	22	44	96	70
LSIM-P-40-172×25	44	89	192	70
LSIM-P-40-172×50	87	175	384	155
LSIM-P-40-252×25	67	133	288	155
LSIM-P-40-252×50	131	262	576	310
LSIM-P-40-332×25	89	178	384	155
LSIM-P-40-332×50	175	350	768	310
LSIM-P-40-412-50	219	437	960	310

Модель двигателя	Максимальная скорость при Fa (обмотка 20 °C)	Максимальная скорость при Fw (обмотка 20 °C)	Максимальная скорость при Fp (обмотка 20 °C)
	Vmax.a, м/с	Vmax.w, м/с	Vmax.p, м/с
LSIM-P-40-92×25	8,7	7,8	5,9
LSIM-P-40-172×25	3,9	3,1	1,3
LSIM-P-40-172×50	4,6	4,0	2,5
LSIM-P-40-252×25	6,2	5,4	3,5
LSIM-P-40-252×50	6,4	5,7	4,2
LSIM-P-40-332×25	4,4	3,6	1,8
LSIM-P-40-332×50	4,6	4,0	2,5
LSIM-P-40-412-50	3,6	3,0	1,5

Известна еще одна реализация линейного синхронного двигателя (рис. 7.4), в котором электромагнитный блок выполнен в виде последовательности катушек, расположенных на общем магнитопроводе (LSLM). Главная отличительная особенность такого двигателя от конструкции LSM состоит в том, что внутри катушек магнитопровод отсутствует. В данной магнитной системе минимизировано усилие магнитного притяжения, но при этом существенно уменьшились и тяговые характеристики двигателя. Основная область применения – автоматизация технологических процессов в химической и медицинской промышленности, где требуется точные перемещения без жестких требований к динамике рабочих циклов.

Якоря всех рассмотренных типов двигателей имеют конструкцию, обеспечивающую работоспособность при максимальной рабочей температуре обмоток до 130°C. Каждый якорь имеет два тепловых датчика порогового типа,

рассчитанных на температуру 130°C. Максимальная температура статора при работе двигателя должна быть не более 100°C.

Рабочий зазор двигателей составляет 0,5 мм с несимметричностью по зазорам не более ± 0,2 мм, причем для двигателей типа LSSM и LSIM – для каждой из сторон якоря. Период статора равен 40 мм. Для формирования магнитной дороги в двигателях применены магниты FeNdB шириной 18 мм и толщиной 5 мм, магнитная индукция составляет 1,1 Т.

7.2. Установка голографического формирования структур на полупроводниковой пластине

В установках голографического формирования топологических структур проекция изображения на кремниевую пластину осуществляется за счет голографической решетки, засвечиваемой в ультрафиолетовом излучении. При этом формирование модуль-чипов на всей подложке осуществляется переходом от экспонирования чипа при неподвижном положении фотошаблона, объектива и подложки к сканированию фотошаблона и подложки во время переноса изображения фотошаблона на подложку. В степп-сканах такого типа это позволило при поле неподвижного проекционного объектива 8×26 мм формировать модуль-чип больших размеров за счет одновременного движения фотошаблона и подложки. При этом необходимо учитывать разность скоростей движения фотошаблона и подложки из-за различий, вызванных масштабом уменьшения проекционного объектива.

Для конструктивной компоновки в качестве прототипа использована типовая установка совмещения и мультипликации, параметры которой определяются размерами минимального элемента и поля, на котором формируется изображение (32×26 мм). Схема установки голографического формирования структур на полупроводниковой пластине показана на рис. 7.5.

При экспонировании установка должна обеспечивать традиционные для этого класса оборудования соотношения: между допустимыми отклонениями размеров элементов и его номинальным размером в пределах 0,1; между погрешностью совмещения слоёв и номинальным размером минимального элемента 0,25–0,30. Требуемые разрешение и воспроизводимость элементов необходимо обеспечивать по всему рабочему полю.

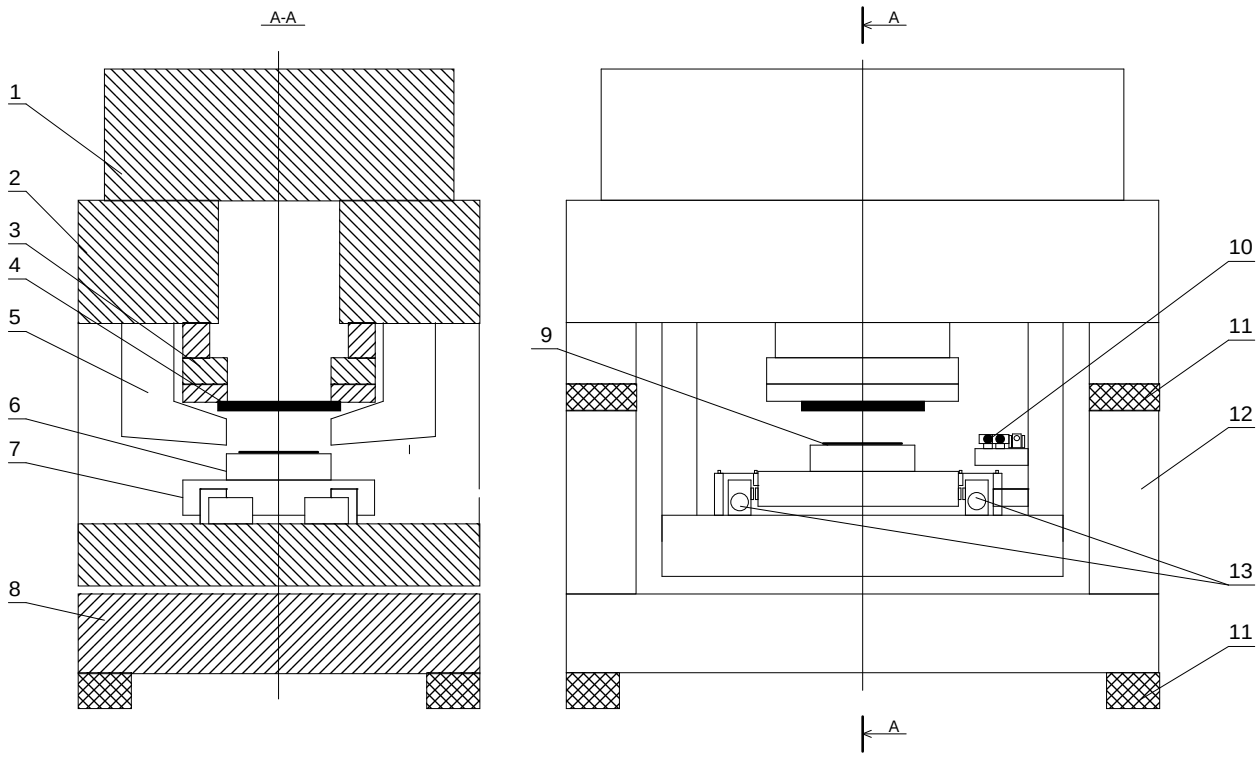


Рис. 7.5. Схема голографической установки формирования структур на полупроводниковой пластине: 1 – проекционная система; 2 – основание; 3 – стол фотошаблона;4 – фотошаблон; 5 – блок совмещения и фокусировки; 6 – координатный стол с датчиком САИ; 7 – статор; 8 – рама; 9 – подложка; 10 – интерферометр; 11 – виброгасители; 12 – опоры; 13 – механизм фокусировки

На предприятии «Рухсервомотор» разработана координатная система, включающая привод столика голографической решетки и привод столика полупроводниковой пластины, реализующая принцип сканирования степп-скан. Привод столика полупроводниковой пластины представляет собой трехкоординатную систему на магнитовоздушной подвеске, обеспечивающей грубую и точную подачу полупроводниковой пластины.

Грубая подача реализована на базе производимого серийно на предприятии «Рухсервомотор» планарного сервопривода PF26-HS. Для подачи голографической решетки использован точный координатный привод. К верхней плоскости привода точной подачи закрепляется каретка с ситталовым столиком для вакуумного крепления полупроводниковых пластин или голографических решеток. Как планарный сервопривод, так и привод точной подачи на воздушной подушке перемещается по плоскости единого статора. Конструкция координатного стола, разработанного по принципу степп-скана, показана на рис. 7.6.

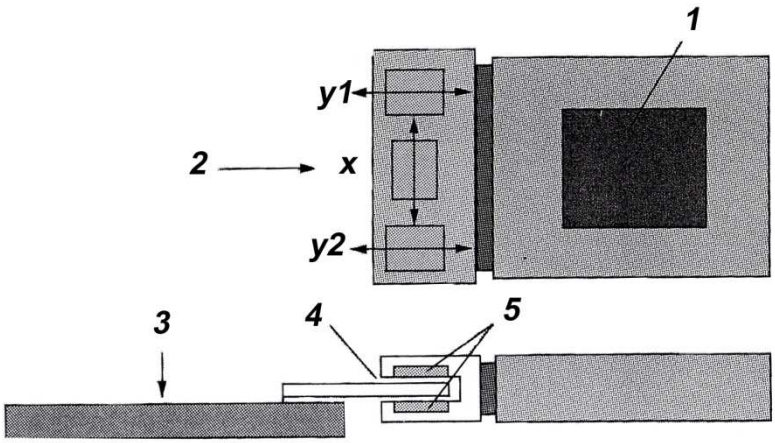


Рис. 7.6. Координатный стол, разработанный
по принципу степп-скана

Кремниевая пластина 1 устанавливается на каретке 2 с точными приводами X, Y_1, Y_2, выполненными на основе безжелезных двигателей серии SLIM. Каретка грубого планарного сервопривода 3 соединена с кареткой 2 электромагнитной связью магнитами 5 и электромагнитным двигателем с малым ходом 4. Связь между приводами грубой и точной подачи осуществляется только за счет электромагнитных сил. Отсутствие жесткой связи предохраняет прецизионную часть, на которой расположена кремневая пластина, от внешних вибраций.

Управление координатными перемещениями осуществляется микропроцессорной системой, которая получает в реальном масштабе времени информацию о положении каретки от интерферометрической измерительной системы (рис. 7.7), реализованной на двухчастотном лазере и интерферометрах AT 10736A фирмы Agilent Technologies.

Измерительная система в сочетании с координатной системой обеспечивает повторяемость позиционирования пластины относительно воздушного изображения в пределах 20 нм во всем диапазоне перемещений, максимальную скорость перемещения стола пластины до 250 мм/с, максимальный разворот пластины вокруг оси Z в пределах ± 3 угл. мин.

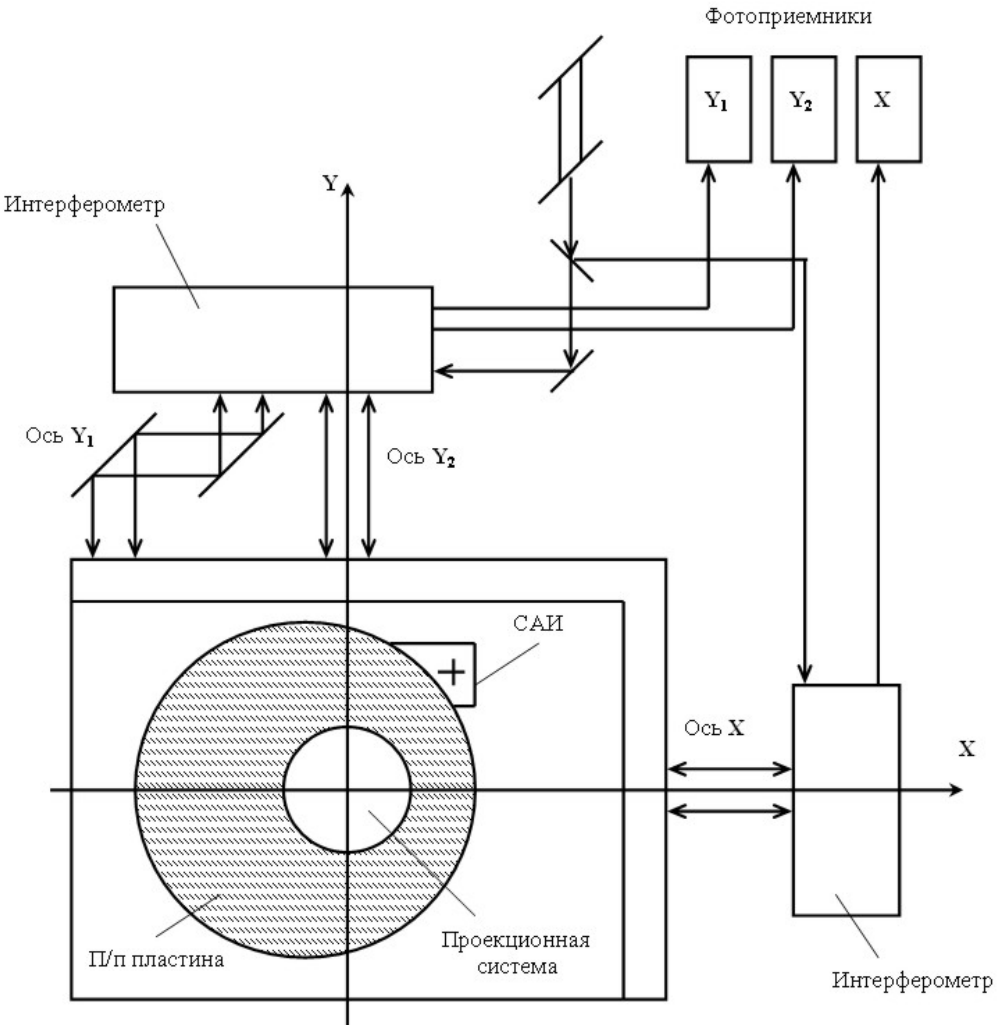


Рис. 7.7. Схема интерферометрической измерительной системы координатного стола

Привод столика голографической решетки и его система измерений реализованы на той же элементной базе, что и привод полупроводниковой пластины. Координатный столик голографической решетки состоит из датчиков базирования и механизма координатных перемещений, предназначенного для перемещения и базирования решетки по координатам X, Y, φ относительно координатных осей установки по специальным знакам, находящимся на предметном столе пластины. В процессе экспонирования обеспечиваются следующие функции: разворот решетки при совмещении, если пластина загружена с разворотом большим, чем допустимый разворот каретки координатной системы; измерение координат знаков базирования решетки (совместно с САИ) после разворота решетки и в процессе экспонирования; измерение координат знаков базирования решетки после изменения масштаба проекционной системы.

Структурная схема системы управления установки показана на рис. 7.8.

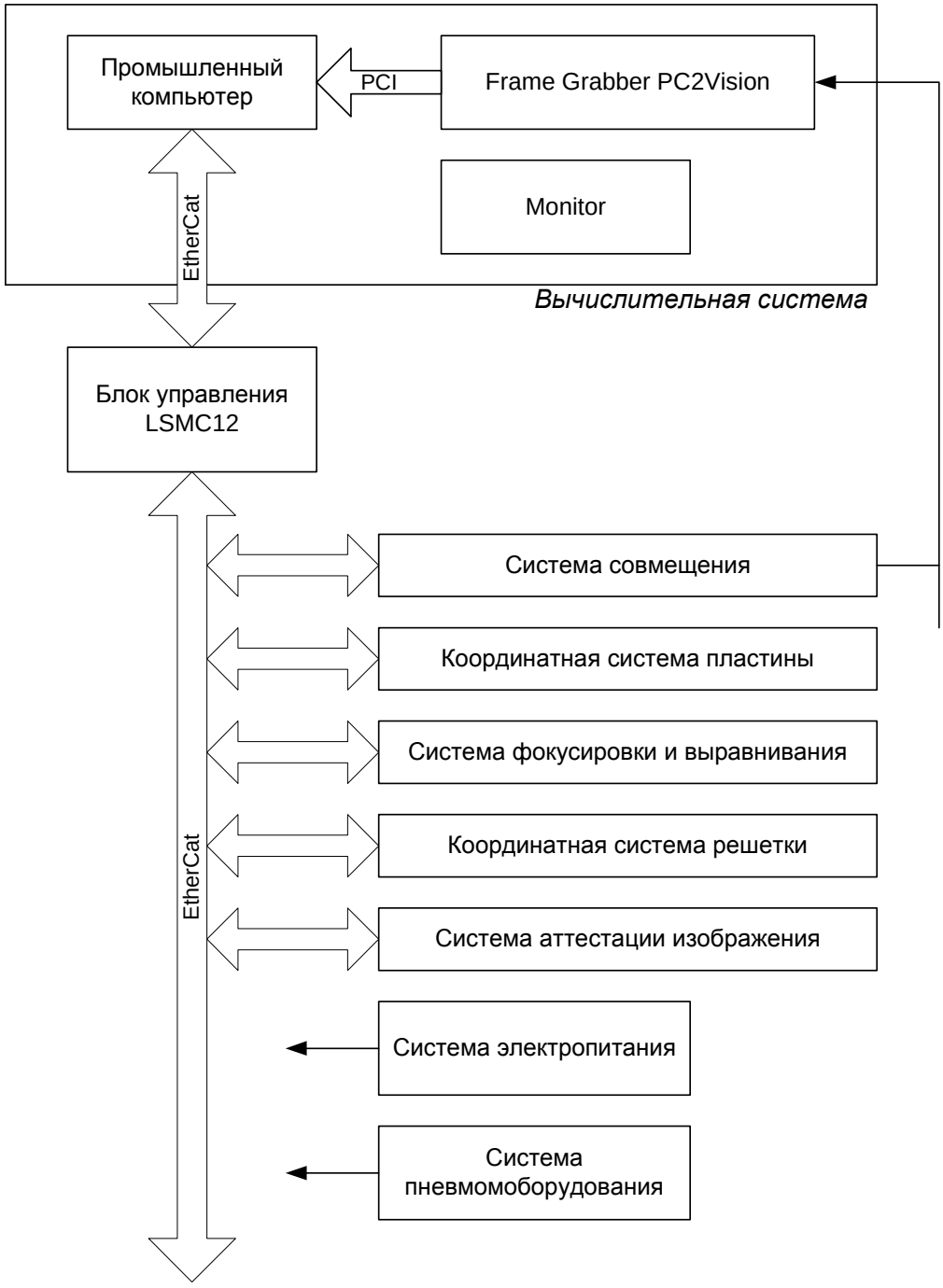


Рис. 7.8. Структурная схема системы управления установки голографического формирования структур

Система управления, разработанная на предприятии «Рухсервомотор», выполнена на базе промышленного компьютера типа IP-610 (Pentium IV), в котором установлена плата Frame Grabber PC2Vision для обработки сигнала с CCD камер и одноплатный промышленный компьютер VP7 фирмы SBS на нижнем уровне управления. Связь компьютеров осуществляется через сеть EtherCat.

7.3. Установка алмазного точения и полирования для прецизионных асферических линз

При разработке установок алмазного точения и полирования определяющими являются субмикронные метрологические показатели, основные из которых следующие:

– базирование и метрологическая привязка основных кинематических узлов установки к гранитному основанию должно соответствовать нулевому классу точности;

– показатели плоскостности гранитного основания должны находиться в пределах 2–3 мкм;

– должна быть обеспечена возможность устойчивой работы узлов позиционирования в нанометровом разрешении;

– работа всех кинематических узлов с отклонением от нивелира в пределах 50 нм;

– обеспечение режима «монолит» при выключении пневмоподвески с обеспечением жесткой механической связи между любым кинематическим узлом и гранитным основанием;

– параметры жесткости подвески подвижных узлов по отношению к гранитному основанию должны быть в пределах от 10 нм до 500 нм во всем диапазоне нагрузки на резец.

В процессе разработки проекта были проанализированы две возможные компоновочные схемы установок алмазного точения и полирования: двухуровневая с вертикальным расположением оси вращения предметного стола (рис. 7.9), и одноуровневая с горизонтальным расположением оси вращения предметного стола (рис. 7.10).

В первой схеме компоновки, реализующей двухуровневую систему кинематики с вертикальным расположением оси вращения предметного стола нижний уровень имеет два звена упругой деформации: магнитовоздушную опору продольного привода предметного стола, гидростатическую опору привода поворотной бабки. На верхнем уровне конструкция привода инструментального стола должна включать три последовательно соединенных узла, приводящих к деформации магнитовоздушной подвески: пневмоподшипник продольного привода, пневмоподшипники поворотного привода, пневмоподшипник вертикального привода инструментального стола.

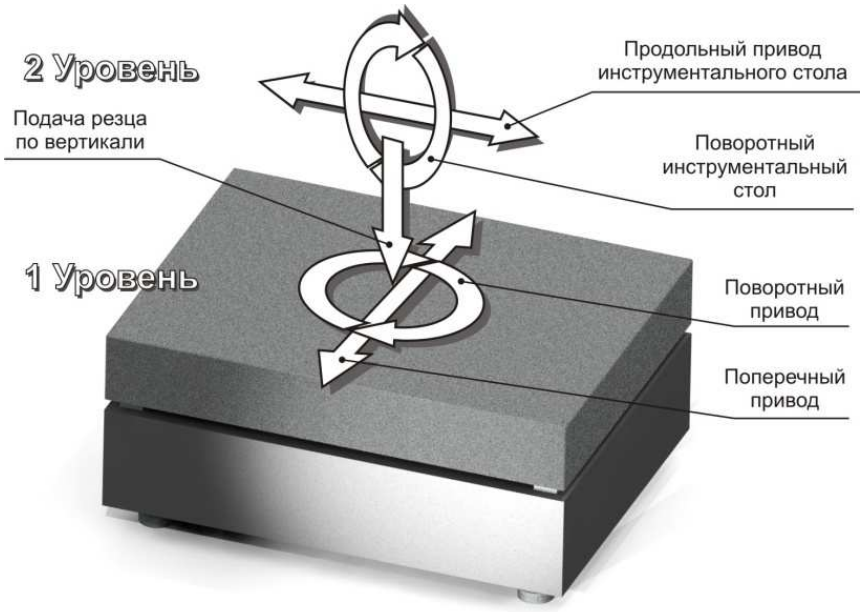


Рис. 7.9. Двухуровневая схема компоновки установки алмазного точения асферических линз

Рис. 7.10. Одноуровневая схема компоновки установки алмазного точения асферических линз

При кинематической схеме с горизонтальным расположением оси вращения предметного стола все базовые кинематические узлы стола (рис. 7.10) расположены в одном уровне по отношению к основанию, поэтому каждый отдельный кинематический компонент установки: привод предметного стола и привод инструментального стола имеют не более двух узлов упругой

деформации с минимальным выносом осей приложения возмущающих усилий на инструменте в процессе обработки.

В связи с тем, что в схеме с вертикальным расположением оси больше последовательно соединенных узлов упругой деформации, следует ожидать общего снижения жесткости системы, ухудшения суммарной реакции на возмущающее воздействие за счет значительного выноса оси инструмента по отношению к опорной оси продольного привода инструментального стола.

Для окончательного выбора оптимальной схемы компоновки было проведено имитационное моделирование параметров жесткости по двум приведенным выше схемам (рис. 7.9 и 7.10) в среде CAD SolidWorks с помощью расчетной программы «Cosmos». На основании результатов расчета предельного уровня деформации оси инструмента и отдельных кинематических узлов была получена оптимизированная конструкция установки алмазного точения асферических линз с горизонтальным расположением оси вращения предметного стола, общий вид которой показан на рис. 7.11.

Конструктивно станок выполнен на габбро-диабазовом основании с двойной системой виброразвязки. На основании расположены четыре базовых модуля:

– двухкоординатный привод предметного стола с обрабатываемой линзой, включающий поворотный привод с автоматической системой балансировки, поперечный привод подачи и оптическую систему контроля процесса точения;

– пятикоординатный привод подачи инструментального стола, включающий поперечный привод, поворотный привод, трехкоординатную систему магнитостатического привода выравнивания по нивелиру и микроподачи по вертикальной оси;

– привод подачи шлифовального узла правки и оптического контроля алмазного резца;

– узел метрологического контроля асферики, включающий интерферометр и специальную компенсационную оптику.

Оптическая линза закрепляется на предметном столе с помощью механических или вакуумных прижимов. Производится автоматическая балансировка предметного стола с линзой с помощью системы автоматической балансировки. Предметный стол с линзой подается в позицию контроля, и поперечный привод предметного стола переводится в режим «монолит».

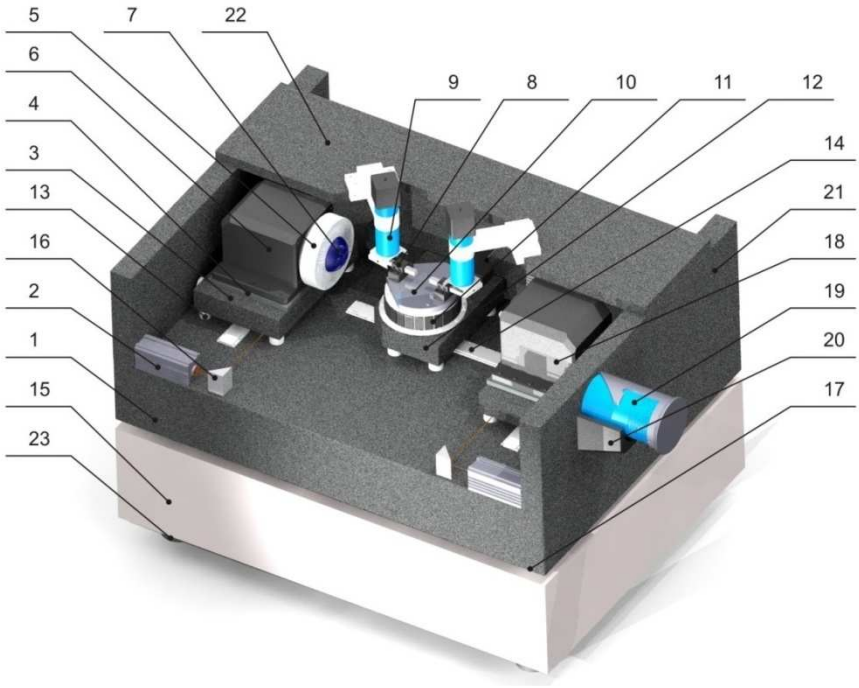


Рис. 7.11. Общий вид оптимизированной конструкции установки алмазного точения асферических линз: 1 – базовое основание установки; 2 – блок интерферометров;3 – поперечный привод предметного стола; 4 – корректирующая плита по высоте; 5 – предметный стол; 6 – поворотный привод предметного стола; 7 – обрабатываемая линза; 8 – алмазный резец; 9 – микроскоп; 10 – привод выравнивания; 11 – поворотный привод инструментального стола; 12 – продольный привод инструментального стола;13 – пневмоподшипник привода продольной подачи; 14 – линейный двигатель;15 – базовая платформа; 16 – призма; 17 – виброразвязка второго уровня;18 – шлифовальный правильный узел; 19 – метрологический интерферометр; 20 – опора юстировочного механизма; 21, 22 – конструктивные элементы;23 –виброразрязка первого уровня; 24 – шлифовальный круг; 25 – шлифовальный шпиндель

Производится полный метрологический контроль на соответствие заготовки параметрам, необходимым для получения асферической линзы с требуемыми геометрическими характеристиками, определяется ее оптическая ось и все корректирующие коэффициенты для привязки изделия к отсчетной системе координат. На основании метрологического контроля устанавливается порядок и технология обработки, тип обрабатывающего инструмента и величины подач по всем координатам.

В установке алмазного точения задействованы поворотный шпиндель предметного стола 6, две оси привода поперечная 4 и продольная 12, и поворотная ось инструментального стола 11. Два привода подачи работают в

режиме сплайновой интерполяции и обеспечивают формообразование асферической поверхности с разрешением 5 нм. Поворот инструментального стола обеспечивает требуемое положение режущей кромки инструмента к обрабатываемой поверхности. Предметный стол обеспечивает равномерное вращение со скоростью 5 000 – 15 000 об/мин, при этом две поворотные координаты кинематически связаны и взаимно регулируются в зависимости от положения точки касания резца с обрабатываемой поверхностью. В процессе точения производится периодический контроль алмазного инструмента и при необходимости корректируется форма режущей кромки на позиции правки инструмента.

Конструкция установки полирования незначительно отличается от конструкции установки алмазного точения следующими позициями (рис. 7.12). На инструментальном столе устанавливаются шлифовальный или полировальный шпиндель, а на позиции правки инструмента правочный шлифовальный узел заменяется на алмазный правочный инструмент.

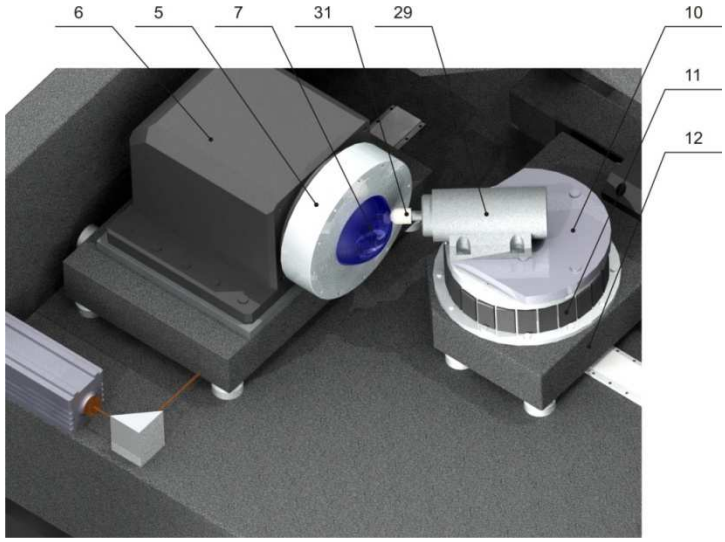


Рис. 7.12. Особенность конструкции установки полирования асферических линз

В установках алмазного точения и полирования реализована пневмоэлектродинамическая опора с системой активного виброгашения, представленная на рис. 7.13.

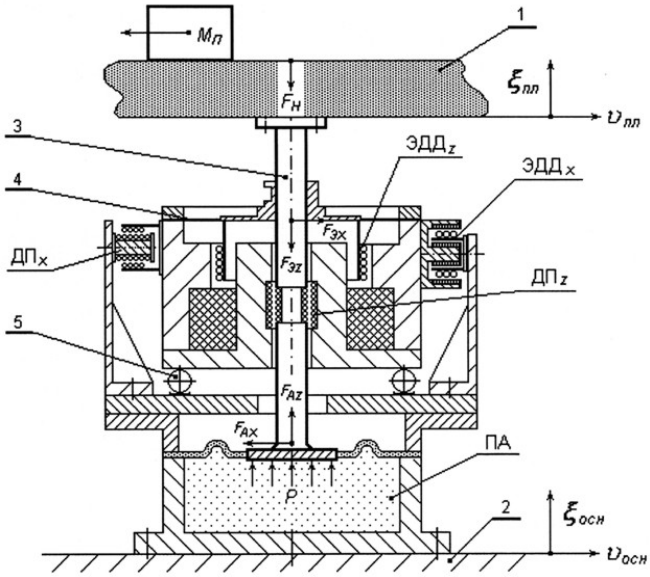


Рис. 7.13. Пневмоэлектродинамическая опора с системой активного виброгашения

Функциональная схема системы виброгашения и горизонтирования установок алмазного точения и полирования показана на рис. 7.14.

7.4. Координатная пятиосевая установка финишной полировки

Пятикоординатный станок DDM-5D-500-300-300-180-360-B (рис. 7.15), структура кинематики которого показана на рис. 7.16, применяется для изготовления на его базе экспериментальной полировальной установки, которая используется для высококачественной обработки оптических деталей из сульфида и селенида цинка. Станок обеспечивает управляемое от системы ЧПУ перемещение по трем линейным и двум угловым координатам. Диапазон диаметров обрабатываемых асферических, сферических и плоских, имеющих симметричную ось вращения оптических деталей составляет 10–200 мм. Максимальный размер обрабатываемой плоской прямоугольной детали составляет 200×400 мм. В состав станка входят следующие основные элементы:

– узел крепления оптической детали (ОД) с вакуумной системой;

– шпиндель вращения и программируемого поворота ОД (ось β);

– координатная X, Y, Z система;

– поворотный стол (ось α);

– станина;

– защитный кожух.

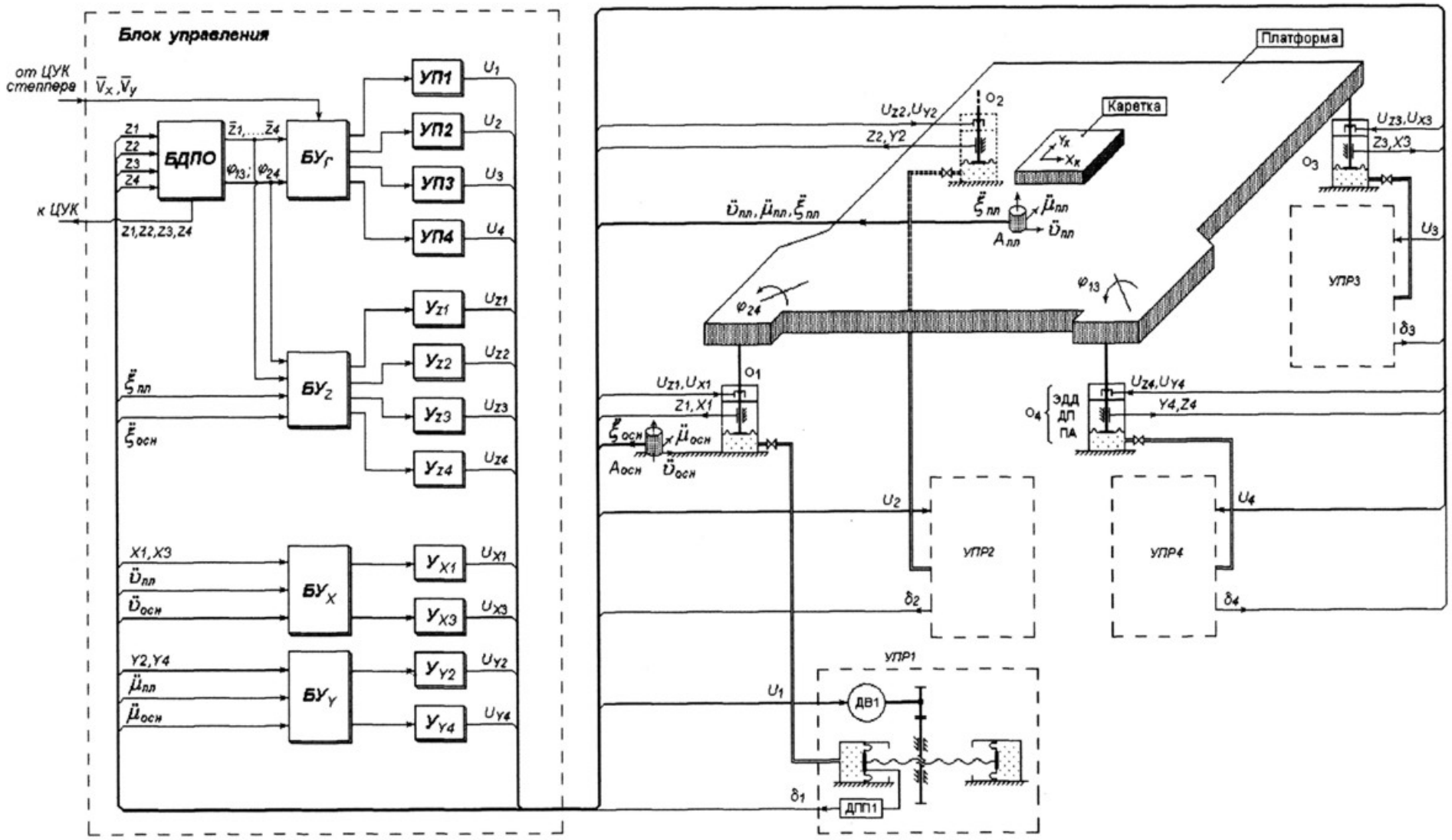


Рис. 7.14 . Функциональная схема системы виброгашения и горизонтирования

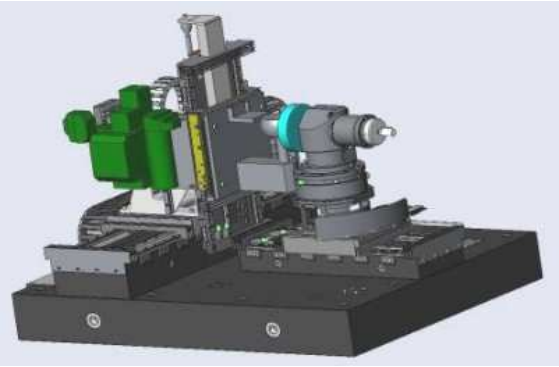


Рис. 7.15. Общий вид 5-ти координатного станка DDM-5D-500-300-300-180-360-B

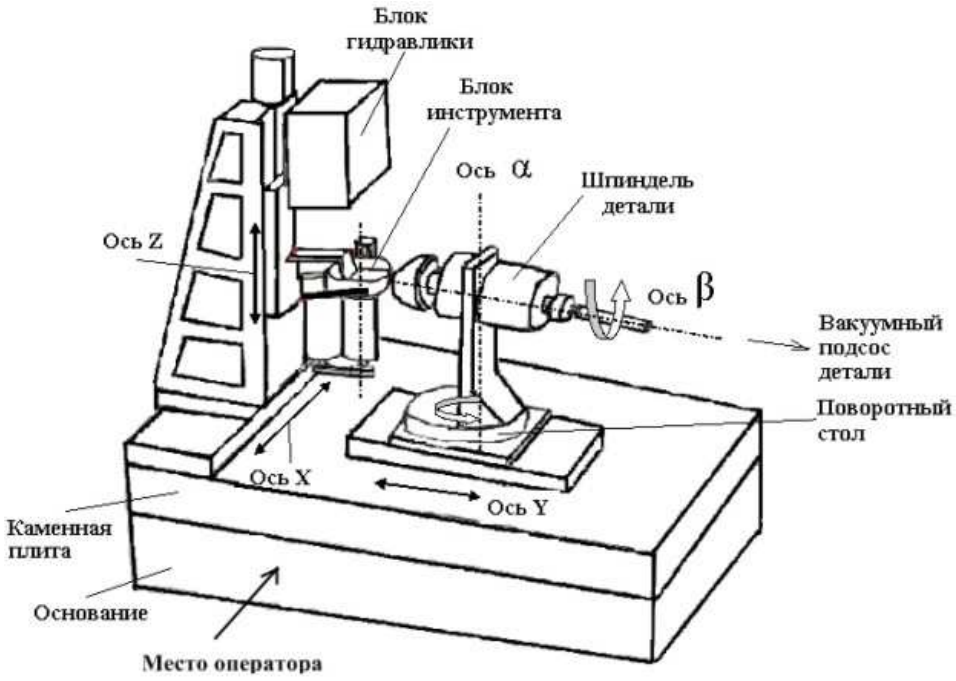


Рис. 7.16. Схема базирования и структура кинематики станка DDM-5D-500-300-300-180-360-B

Узел крепления оптической детали (рис. 7.16) располагается на шпинделе вращения детали и рассчитывается на весь диапазон параметров оптической детали от 10 мм до 200 мм. В состав узла входят сменные патроны для каждой оптической детали. Сменный патрон изготавливается из немагнитопроводного металла. Радиальное биение патрона – не более 2,0 мкм, торцевое – не более 2,0 мкм. Для крепления крупногабаритной прямоугольной плоской оптической детали размером 200×400 мм разработано отдельное крепежное приспособление, которое устанавливается на место шпинделя. Приспособление имеет две плоскости в виде прямоугольного уголка в сечении. Неперпендикулярность этих плоскостей составляет не более ± 15 угловых секунд. Нижняя основная плоскость крепится к поворотному столу. К боковой) плоскости с помощью сменного патрона из немагнитопроводного металла крепится плоская прямоугольная оптическая деталь.

Шпиндель вращения и программируемого поворота оптической детали обеспечивает вращение детали в пределах 0…500 об/мин с возможностью программируемого (также фиксированного) углового положения по оси вращения детали в диапазоне 0…360 угл. град. Он устанавливается на поворотный стол в горизонтальном положении с помощью узла крепления и обеспечивает номинальный крутящий момент не менее 5,0 нм во всем диапазоне частот вращения.

Вал шпинделя вращения детали, полый по всей длине, соединен через ротационное соединение с одной стороны с вакуумной системой подсоса детали, с другой стороны – с узлом крепления оптической детали. Требования к торцевому и радиальному биению вала шпинделя представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Основные характеристики установки финишной полировки

Наименование показателя	**Единица измерения**	**Величина показателя**
Диаметры обрабатываемых деталей Максимальный размер плоской прямоугольной детали	мм мм	10…200 200×400
Максимальная крутизна (γ) выпуклых ОД	угл. град.	60
Максимальная крутизна (γ) вогнутых ОД	угл. град.	40
Погрешность позиционирования шпинделя ОД	угл. град.	± 15
Радиальное и торцевое биение оси вращения шпинделя ОД и посадочной поверхности под патрон, не более	мкм	1,0
Диапазон угловых перемещений поворотного стола (ось α)	угл. град.	0…± 90
Диапазон угловых скоростей перемещения поворотного стола	угл. град/с	0…100
Точность позиционирования поворотного стола	угл. сек	± 15
Диапазон скорости перемещения по осям *X*, *Y*, *Z*	мм/с	0…170
Погрешность позиционирования по осям *X*, *Y*, *Z*, не более	мкм	1,0
Непрямолинейность перемещения по каждой из осей, не более	мкм	1,0
Неперпендикулярность перемещения по каждой из осей плоскости двух других осей на длине 300 мм, не более	мкм	1,0
Повторяемость	мкм	0,05
Зона нечувствительности	мкм	0,01
Непараллельность оси вращения шпинделя ОД плоскости *XY* на длине 300 мм, не более	мкм	2,0
Непараллельность оси вращения поворотного стола оси *Z*, на длине 300 мм, не более	мкм	2,0

Узел крепления обеспечивает установку шпинделя ОД на поворотном столе, при этом ось вращения шпинделя ОД перпендикулярна оси вращения

поворотного стола. Перемещение по всем осям программно управляемо, с возможностью изменения скорости перемещения в заданной точке в пределах не менее 0–170 мм/с. Диапазон линейного перемещения по оси *X* составляет 0–500 мм, а по осям *Y* и *Z* 0–300 мм.

7.5. Генератор изображения ЭМ-5289

Многоканальный лазерный генератор изображения ЭМ-5289 предназначен для изготовления 5-ти и 4-х кратных прецизионных фотошаблонов для производства СБИС с проектной нормой до 180 нм. Модификация ЭМ-5289-1 обеспечивает непосредственное формирование топологических структур на полупроводниковых пластинах с разрешением 0,35 мкм. Отличительные особенности генератора следующие:

– усовершенствованная печать с вложенной сеткой и управлением уровнями интенсивности лазерного пятна;

– усовершенствованная система совмещения по дифракционным знакам;

– двухзонный координатный стол на воздушной подвеске с использованием 4-х приводов грубой подачи ситаллового блока стола фотошаблона на базе безжелезных синхронных двигателей LSIM-40-50 и 4-х приводов точной подачи самого стола фотошаблона базе безжелезных синхронных двигателей LSIM-40-25. Общий вид генератора показан на рис. 7.17.

Конструктивно генератор выполнен в виде двух стоек управления, рабочего места оператора с персональным компьютером и станины, выполненной в виде габбро-диабазовой П-образной скобы, установленной через четыре виброразвязывающие опоры на каменную плиту основания. Система виброизоляции обеспечивает сохранение неподвижности станины при внешних и внутренних источниках колебаний. Станина, благодаря своей жесткости, обеспечивает стабильное взаимное положение координатных столов и проекционной системы. Сохранение необходимого расположения фотошаблона и подложки при сканировании обеспечивается лазерными многоканальными интерферометрами, установленными на станине, которые обеспечивают необходимое положение стола фотошаблона и стола подложки в основной координатной системе по шести направлениям: X, Y, Z и $\varphi_z, \varphi_x, \varphi_y$, то есть линейным координатам X, Y, перпендикулярным оси объектива в плоскости, где расположено изображение фотошаблона на подложке с

сохранением их положения в предметной плоскости и плоскости изображения по оси *Z*.

Рис. 7.17. Многоканальный лазерный генератор изображения ЭМ-5289

Принципиальная схема координатного стола генератора приведена на рисунке 7.18 и содержит грубую и прецизионную части.

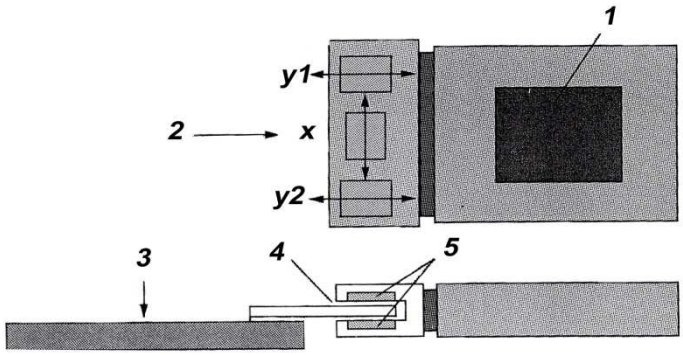


Рис. 7.18. Принципиальная схема двухзонного координатного стола

Фотошаблон 1 установлен на каретке 2 с точными приводами X, Y_1, Y_2. Каретка грубого привода 3 с линейными двигателями соединена с кареткой 2 электромагнитной связью магнитами 5 и электромагнитным двигателем с малым ходом 4. Связь между грубой и прецизионной частями стола осуществляется только электромагнитными силами. Отсутствие жесткой связи предохраняет прецизионную часть, на которой расположен фотошаблон, от внешних вибраций.

Конструкция двухкареточного координатного стола показана на рис. 7.19. Отсутствие поворотов в плоскостях обеспечивает измерение и управление положением столов вокруг оси *Z*. Положение фотошаблона и подложки в

параллельных плоскостях и соблюдение принципа Аббе обеспечивается контролем поворотов вокруг осей *X* и *Y*.

Двухчастотные интерферометры, которые следят за положением координатных столов, имеют разрешение 0,6 нм. Скорость перемещения стола пластин при сканировании составляет 250 мм/с, скорость стола фотошаблона 1000 мм/с. Лазерные интерферометры измеряют положение координатных столов на частоте 1 кГц. Сохранение взаимного расположения координатных столов обеспечивается за счет динамичного безрастрового прямого привода на базе двигателей серии LSIM, которые создают ускорение до 5 м/с^2 стола грубого отсчета и до 20 м/с^2 стола фотошаблона.

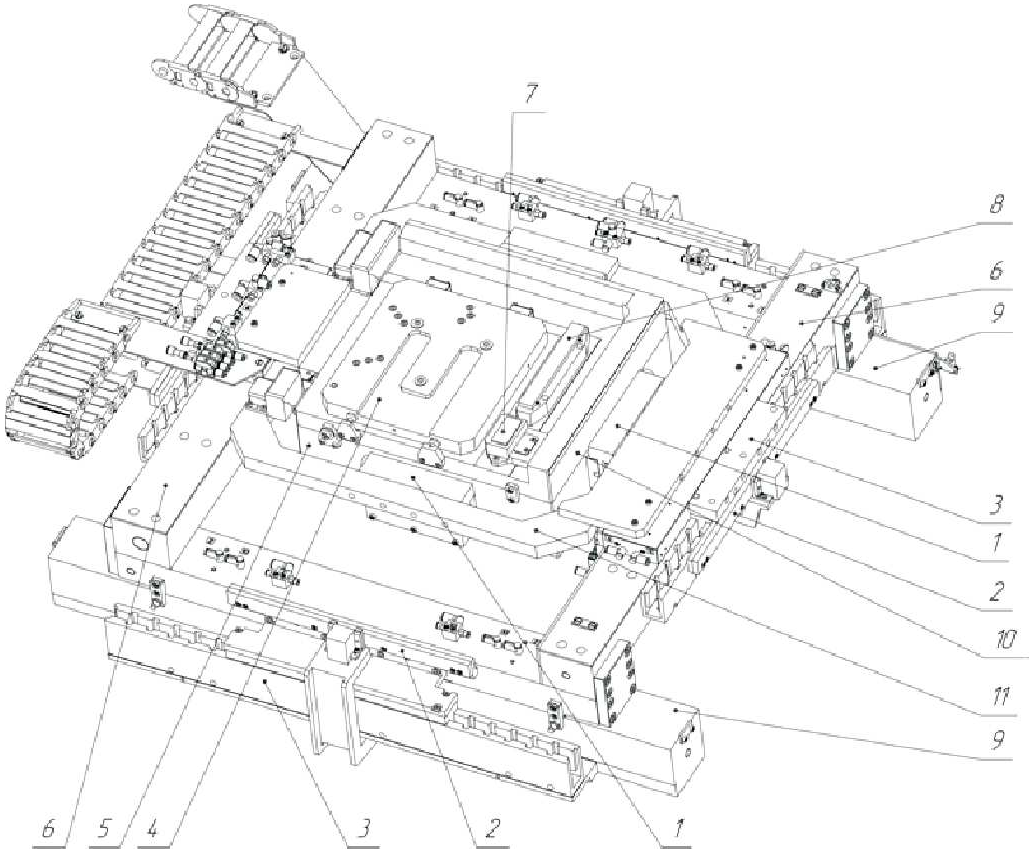


Рис. 7.19. Координатный стол генератора изображения ЭМ-5289: 1 – линейные двигатели точной ступени перемещения SLIM-40-25; 2 – линейные датчики грубой ступени; 3 – линейные двигатели грубой ступени перемещения SLIM-40-50; 4, 5, 10 – ситалловые детали стола фотошаблона; 6, 9 – аэростатические линейные подшипники по координатам *X* и *Y*; 7, 8 – оптические элементы юстировки стола фотошаблона

Для обеспечения такой динамики грубый привод стола фотошаблона развивает пиковое усилие более 700 Н. Точность формируемых элементов CD и погрешность совмещения в динамике показана на рис. 7.20.

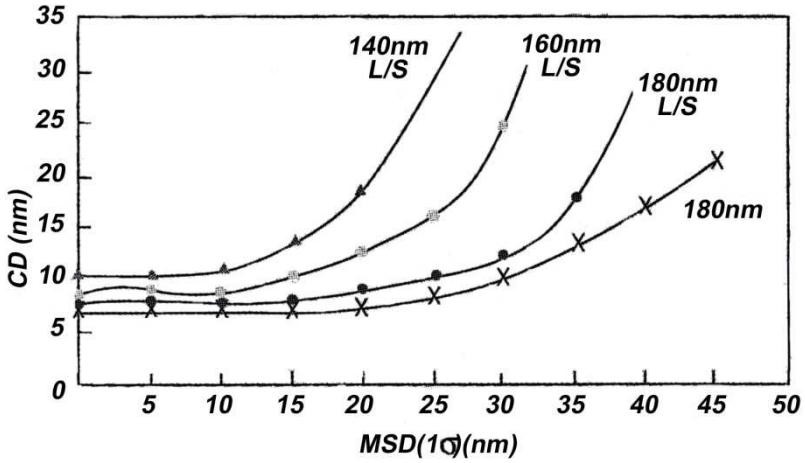


Рис. 7.20. Зависимость допуска размера элемента CD от ошибки рассогласования столов MSD для элементов разных размеров

Точность взаимного положения фотошаблона и подложки при сканировании должна обеспечить совмещение слоев и размерную точность элементов (CD – critical dimension) нанометровых размеров. Допустимые отклонения положения столов при сканировании по координатам X, Y, Z должны быть малыми. Средняя ошибка разрешения при сканировании по ортогональным осям (MA_x, MA_y) должна быть менее 10% размера CD. Колебания взаимного положения координатных столов подложки и фотошаблона в поле экспонирования MSD должны обеспечить точность положения и размеров элемента.

Эти зависимости выражаются следующим образом. Формула величины средней ошибки по координате *X* имеет вид

$$MA = \frac{1}{T_{\text{эксп}}} \int_{e_x - T_{\text{эксп}}}^{e_x + T_{\text{эксп}}} e(t)dt,$$

где $T_{\text{эксп}}$ – время экспонирования; $e(t)$ – доза энергии при экспонировании.

Функция колебания взаимного положения фотошаблона и подложки по координате *X* имеет вид

$$MSD(x) = \frac{1}{T_{\text{эксп}}} \int_{e_x - T_{\text{эксп}}}^{e_x + T_{\text{эксп}}} [e(t) - MA(x)]^2 dt.$$

Известная зависимость разрешения от длины волны излучения, апертуры и коэффициента фотолитографии k_1 $\delta = \frac{k_1 \lambda}{A}$ для метода сканирующего переноса может быть получена для структур линия-промежуток (L/S) из выражения

$$\delta = \frac{k1\lambda}{A} \cdot \frac{1}{1 - \frac{T_1^2}{2}\left(\frac{MSD}{\sigma}\right)^2}.$$

Так, из этого выражения следует, что для элементов размером $\sigma = 140$ нм при проекционной системе с $\lambda = 248$ нм и апертуре 0,7 величина MSD не должна превышать 10 нм. Выше на рис. 7.20 приведена зависимость изменения размера элемента CD от величины MSD для элементов различных размеров.

Основные технические характеристики генератора изображения ЭМ-5289 приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Характеристики генератора изображения ЭМ-5289

Параметр	**Значение**
Максимальный размер зоны сканирования	215×215 мм
Время экспонирования 1 дм^2	120 мин
Адресная сетка	1,25 нм
Размер минимального элемента	350 нм
Совмещаемость комплекта шаблонов	60 нм
Воспроизводимость размера	30 нм

Дальнейшее совершенствование конструкции координатных столов, а в особенности интерферометров, позволяет уменьшить погрешности формируемых на подложке топологий. Основная составляющая погрешности при скоростных перемещениях зеркал столов – это возникающие турбулентности воздушного столба, которые искажают измерения интерферометров. Эту проблему удается решить путем усложнения интерферометров за счет применения трех длин волн: 632 нм для основных измерений, 530 нм и 265 нм для определения нарушений оптических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 7

1. Карпович, С. Е. Системы перемещений на основе привода прямого действия / С. Е. Карпович, В. В. Жарский, И. В. Дайняк. – Минск: БГУИР, 2008. – 239 с.

2. Карпович, С. Е. Имитационное моделирование голономных и мобильных автоматических систем / С. Е. Карпович, В. В. Жарский, И. В. Дайняк. – Минск : Белпринт, 2008. – 212 с.

3. Жарский, В. В. Анализ тенденций развития линейных двигателей прямого действия / В. В. Жарский // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/5. – С. 53–58.

4. Математическое моделирование статических и динамических характеристик электромагнитного модуля / С. Е. Карпович [и др.] // Современные методы проектирования машин Респ. межведомственный сб. науч. трудов. – Минск : Технопринт, 2004. – Вып. 2. – Т. 6. – С. 98–102.

5. Avakov, S. Complete set of the special process equipment for the defect-free production of reticles / S. Avakov [et al.] // Electronics and Electrical Engineering. – 2008. – No. 4(84). – P. 94–96.

6. Karpovich, S. Automatic Mechatronic Complex for the Forming of 3D Multi-Point Structures / S. Karpovich, I. Dainiak, V. Zharsky // Prospects in mechanical engineering : Scientific Proceedings / Technical University of Ilmenau. – Ilmenau : ISLE, 2008. – P. 75–76.

7. Официальный сайт предприятия «Рухсервомотор» [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://www.ruchservomotor.com.

ГЛАВА 8
ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРЯМЫМ ИОННЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТИКИ

8.1. Особенности нанесения тонкопленочных покрытий прямым осаждением из ионных потоков

Существующие традиционные методы формирования тонкопленочных покрытий, основанные на термическом испарении (резистивное и электронно-лучевое испарение), ионном распылении (ионно-плазменное, ионно-лучевое и магнетронное распыление), осаждении из газовой фазы (пиролитическое и плазмохимическое осаждение) связаны с использованием дорогостоящих мишеней, степень использования которых составляет, в лучшем случае, около 50%, проведение процессов осаждения предполагает применения высокой температуры подложек (250-1000^{O}C), применения дорогих и мощных блоков ВЧ и НЧ-питания, согласующих ВЧ-устройств. Энергия осаждаемых на подложку атомов вещества при термическом, ионном распылении и пиролитическом осаждении составляет 0,01- 5 эВ, что не позволяет получать тонкопленочные покрытия с высокой адгезией и требуемой микроструктурой при низких температурах подложки. При магнетронном и плазмохимическом нанесении покрытий на подложки и формируемые покрытия осуществляется неконтролируемое воздействие электронных и ионных потоков, что не позволяет получать заданные параметры покрытий. Резистивное и электронно-лучевое испарение из-за точечного характера испарения не обеспечивает нанесения покрытий на широкоформатные подложки. В последние годы все больше внимания исследователей привлекают методы, основанные на нанесении тонкопленочных покрытий из ионных потоков или пучков [1,2].

При прямом ионном осаждении используется ионный источник, который способен выдавать широкий пучок ионов и направлять химически активные частицы на подложку для последующего осаждения. В реакционный канал подаются инертный газ (чаще всего аргон) и газ, содержащий вещество, пленку которого необходимо получить. Инертный газ во время формирования пленки выступает в виде активатора процесса. Ионизированные частицы, вышедшие из ионного источника, направляются к подложке. Ионы инертного газа активируют поверхность подложки, а ионы химически активного вещества, связываясь с активизированными частицами вещества подложки, осаждаются

на поверхности в виде пленки. Схематично данный процесс представлен на рис. 8.1. Прямое ионное осаждение позволяет хорошо контролировать свойства пленок посредством широкого диапазона регулирования параметров, таких как энергия частиц, плотность потока частиц и их химическое строение, которые оказывают основное виляние на свойства и состав формирующейся пленки. С помощью прямого осаждения можно получать различные покрытия. Так, было проведено осаждение алюминиевых пленок на кремниевую подложку. Энергия ионов составляла 10-200 эВ, температура подложки – 40-300°С. Было установлено, что свойства полученных пленок аналогичны со свойствами покрытий, полученных кластерным осаждением [3].

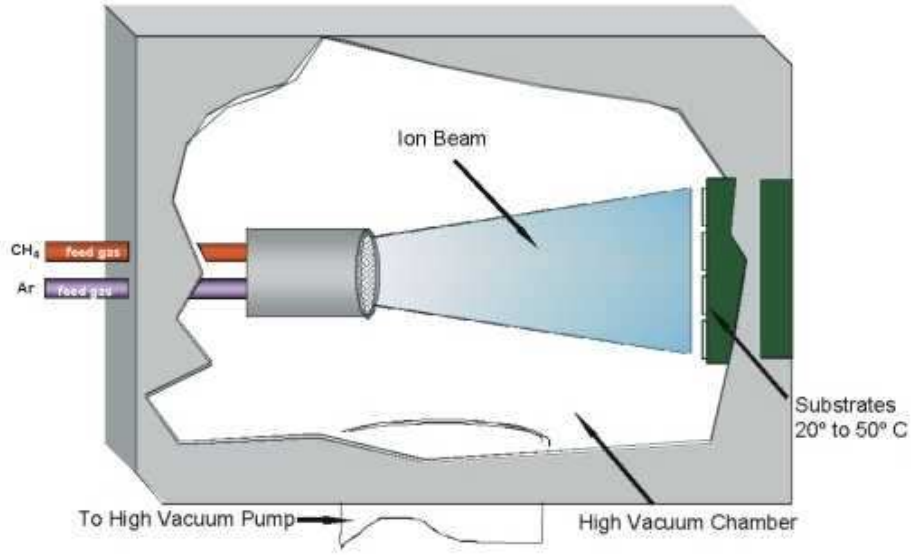


Рис. 8.1. Схема процесса прямого ионного осаждения

С использованием пучков ионов $^{13}C^{+}$ и $^{30}Si^{+}$, полученных замедлением до 40 эВ в установке ионной имплантации, были синтезированы пленки β-SiC на подложках из α-SiC при температуре последних около 700°С [4].

Для пленкообразующих газов могут использоваться SiH_4, CH_4 CF_4, O_2, N_2, B_2H_6, металлосодержащие газы (металлоорганические соединения металлов) и др. Это позволит синтезировать широкий ассортимент тонкопленочных покрытий, которые могут успешно применяться в различных областях науки и техники: SiO_2, $S_{3i}N_4$, SiC, алмазоподобные покрытия, SiOF, SiOC, C_3N_4, оксиды, нитриды, силициды, карбиды, бориды металлов и т.п. Энергия конденсирующихся на подложку ионов может контролируемо изменяться от 30 до 300 эВ, ионный ток от 0,05–5А. Благодаря высокой

энергии конденсирующихся частиц, обеспечивается хорошая адгезия к любым подложкам, включая и полимерные, повышенная плотность и однородность по толщине покрытий, высокие электро–и теплопроводность. При использовании протяженных (линейных) ионных источников можно наносить функциональные покрытия на широкоформатные подложки (1 м^2 и более) с равномерностью по толщине ±2-5%. Таким образом, применение вышеуказанных методов позволит получить высококачественные покрытия при небольших затратах на изготовление технологического оборудования и материалы.

8.2. Устройства для генерации ионных потоков

Анализ методов формирования покрытий показал, что весьма перспективным является метод нанесения покрытий непосредственно из ионного пучка с использованием торцевых холловских ускорителей (ТХУ).

Такие ионные источники позволяют формировать широкие пучки ионов любых газов с энергией 25–200 эВ и током до 5 А. Они могут быть как цилиндрические, так и протяженные, что обеспечивает высокую равномерность покрытий по толщине. ТХУ имеют простую конструкцию, надежны в эксплуатации. Для функционирования таких устройств не нужно применения высоковольтного питания, что также упрощает их конструкцию и эксплуатацию. На рис. 8.2 приведена упрощенная конструкция ТХУ.

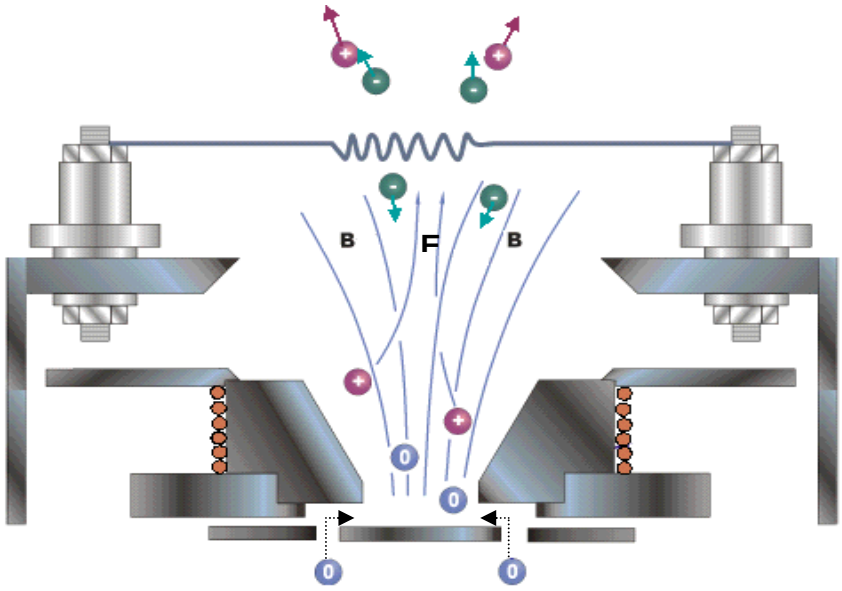


Рис. 8.2. Упрощенная конструкция торцевого холловского ускорителя

Для нанесения покрытий использовалась модернизированная установка вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенная ионным источником на основе холловского торцевого ускорителя и системой эмиссионного спектрального анализа. Измерение тока ионов осуществлялось одиночным зондом. Спектры излучения регистрировались с помощью монохроматора ММ-101, электронного усилителя ФЭУ-106 и самописца КСП-4. Конструкция подложкодержателя позволяла устанавливать расстояние «источник-подложка» в пределах 25-250 мм. Упрощенная схема подколпачного устройства приведенная на рис. 8.3.

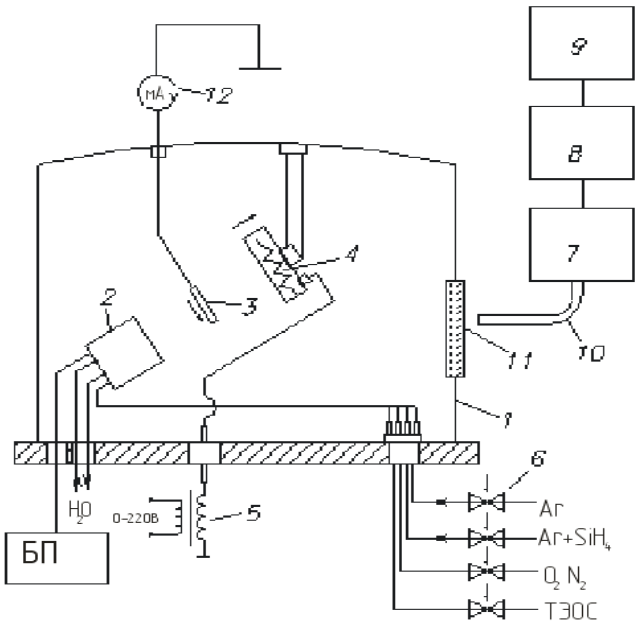


Рис. 8.3 – Схема подколпачного устройства установки ВУ-1А: 1- вакуумная камера; 2- ионный источник; 3- зонд-коллектор; 4- подложкодержатель с подогревом; 5- трансформатор питания подложкодержателя; 6- газовые натекатели; 7- монохроматор; 8- ФЭУ-106; 9- самописец; 10- световод; 11- окно камеры; 12- измеритель ионного тока

Весьма перспективным является метод нанесения тонкопленочных покрытий посредством генерации потока ионов из пучкового фокуса. Суть этого метода заключается в том, при определенных условиях в ионном источнике на основе УАС (ускорителя с анодным слоем) имеет место формирование зоны вторичного разряда. Ускоритель с анодным слоем является одной из разновидностей ускорителей с замкнутым холловским током, он имеет простую конструкцию, надежен в эксплуатации. Использование такого ускорителя позволяет получить моноэнергетический ионный пучок с плотностью до 5 мА/см^2 [5].

Экспериментальные исследования проводили на модернизированной установке вакуумного напыления ВУ-1А. Внешний вид подколпачного устройства представлен на рис. 8.4**.** Оптимальные режимы работы ионного источника следующие: анодное напряжение – 2,5–3 кВ, ток разряда – 100–120 мА. Такие режимы способствовали горению стабильного разряда. Температура подложек составляла 50–550^{o}С. Нагрев образцов осуществлялся резистивным нагревателем. Температура контролировалась термопарой хромель-алюмель и цифровым вольтметром В7–27. Для питания нагревателя использовался ЛАТР и трансформатор.

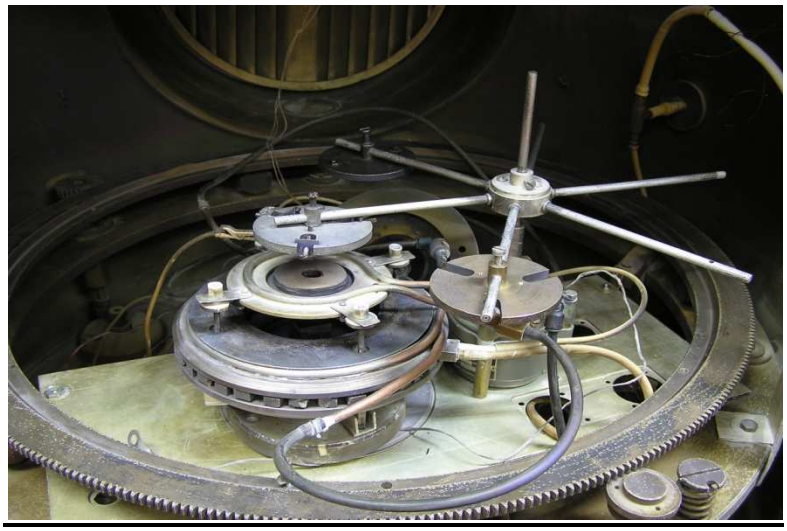


Рис. 8.4. Внешний вид подколпачного устройства

8.3. Формирование покрытий из диоксида кремния

8.3.1. Формирование покрытий из диоксида кремния с использованием торцевого холловского ускорителя

Формирование пленок SiO_2 осуществляли двумя путями: осаждением из ионных пучков смеси 5% SiH_4+95% Ar и кислорода, а также осаждением из ионного пучка паров тетраэтоксисилана (ТЭОС). Анализ спектров излучения плазмы показал наличие интенсивных линий аргона: Ar 4158,59, ионов аргона Ar^+(2979, 1; 3476,7; 4426,01; 4657,9; 4764,86), Ar^+(4609,56) и молекулярного азота 3371,3. Наличие сигналов от азота может быть вызвано наличием остаточной атмосферы в камере (рис. 8.5).

В эмиссионном спектре также были обнаружены интенсивные линии Si(2516,11), Si(2881,3), SiH(4140,0), что свидетельствует о диссоциации молекул моносилана. Изучение спектров излучения плазмы моносилана с

кислородом показало, что высота пиков атомарного кремния значительно уменьшалась, что свидетельствует о протекании химических реакций окисления кремния уже на стадии транспортировки ионного потока к подложке (рис. 8.6). На рис. 8.7 приведена зависимость относительной интенсивности линий атомов кремния от парциального давления кислорода.

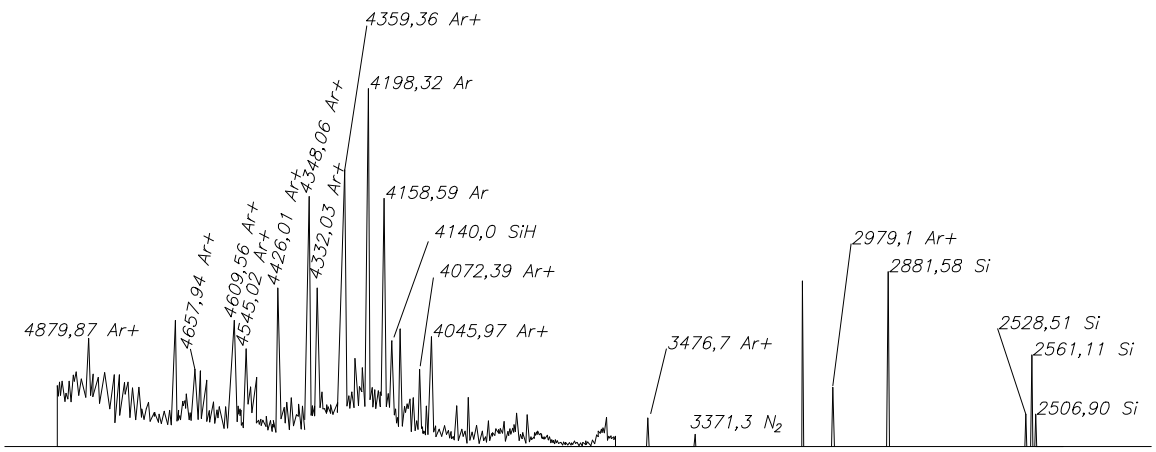


Рис. 8.5. Спектр потока ионов аргона и моносилана

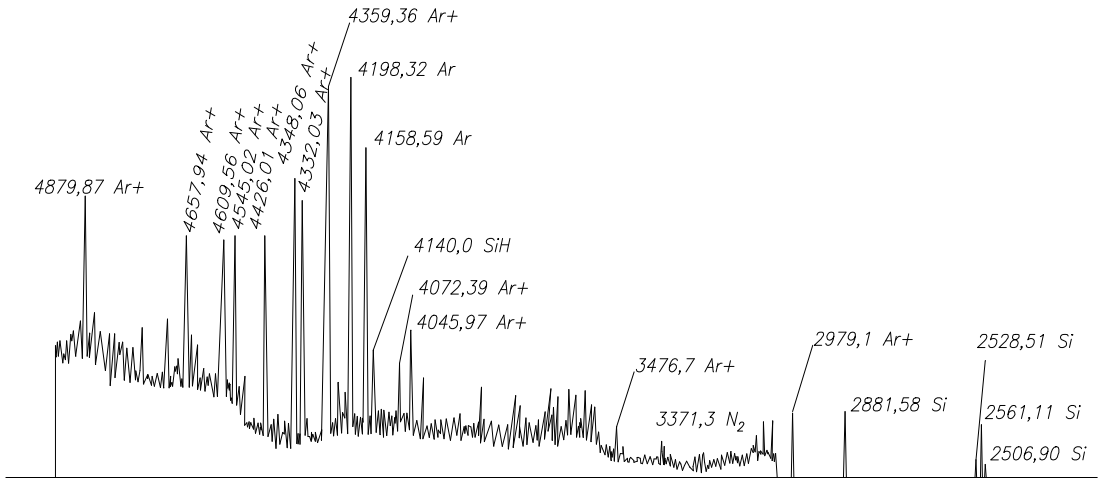


Рис. 8.6. Спектр излучения пучка моносилана, аргона и кислорода

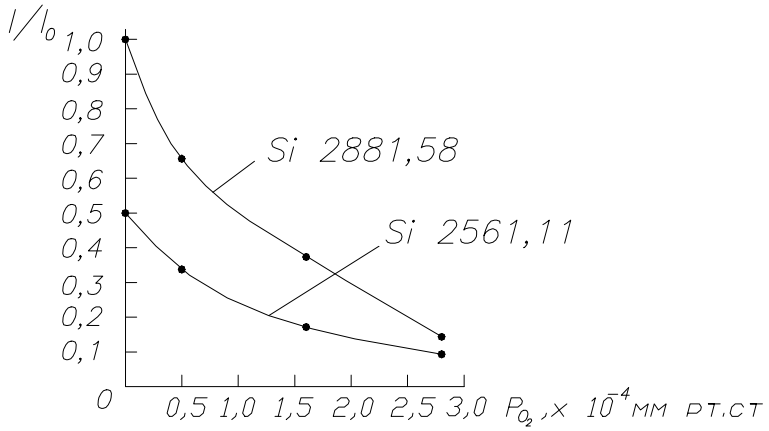


Рис. 8.7. Зависимость относительной интенсивности линий атомов кремния от парциального давления кислорода

На спектрах излучения ионного потока тетраэтоксисилана линии атомарного кремния были незначительны (рис. 8.8).

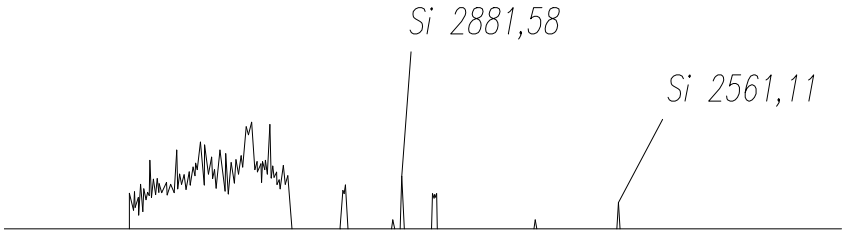
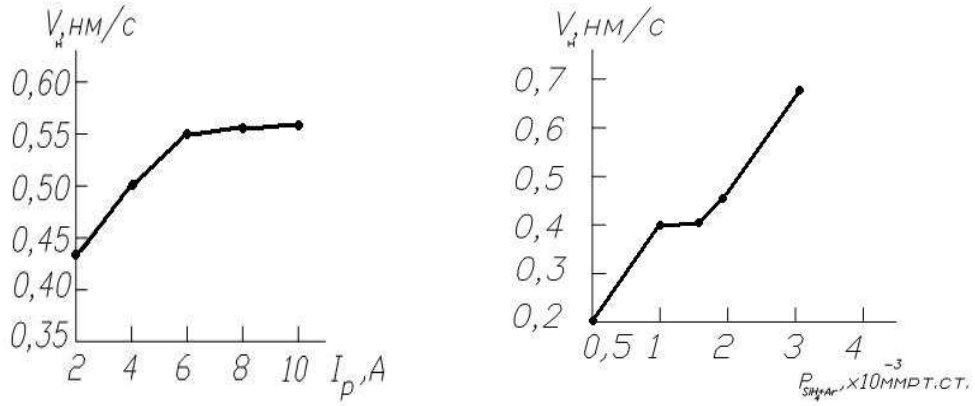


Рис. 8.8. Спектр излучения ионного пучка из ТЭОС

Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Покрытия наносились на неподвижную подложку. В качестве последней использовались кремний, оптические стекла К8 и ТФ-5. Оптимальные режимы работы ионного источника были следующими: анодное напряжение – 75– 115 В, ток разряда – 4– 8 А, ток соленоида – 5 – 7 А, ток эмиттера электронов – 12–- 13 А. Такие режимы способствовали горению стабильного разряда с хорошей степенью компенсации. Температура подложек составляла 100– 350^{o}С .

Исследования показали влияние парциального давления кислорода и тока разряда на скорость нанесения покрытий. Увеличение доли кислорода приводит к некоторому снижению скорости нанесения. Утановлено, что даже при давлении кислорода всего $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. покрытия были прозрачными в видимом диапазоне, что свидетельствует об эффективном протекании процессов окисления. Установлено также, что с ростом тока разряда и давления моносилана происходит увеличение скорости нанесения (рис. 8.9). Использование в качестве рабочего газа паров ТЭОС позволило увеличить скорость нанесения.



а б

Рис. 8.9. Зависимости скорости нанесения пленки двуокиси кремния: а – от разрядного тока ионного источника; б – от парциального давления смеси моносилана и аргона

Так, при рабочем давлении $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.; напряжении анода 100 - 125 В, токе разряда 2 - 5 А были достигнуты скорости формирования 2,8 - 4,3 нм/с, что сравнимо со скоростями, полученными при электронно-лучевом испарении кварца. При этом покрытия были прозрачны и обладали хорошей адгезией к подложкам.

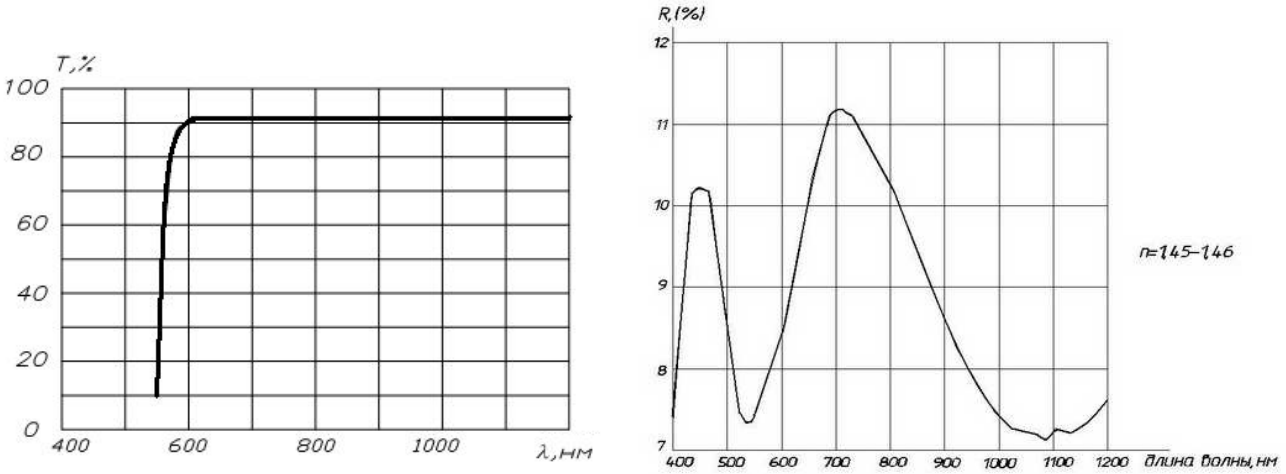
Исследование электрофизических параметров покрытий осуществляли путем изменения характеристик структур металл- диэлектрик- полупроводник. Для этого исследуемые пленки наносились на подложки из кремния р- типа с удельным сопротивлением 0,85–1,15 Ом·см. Металлические контакты из алюминия размером 0,8х0,8 мм^2 формировались путем магнетронного распыления. Полученные тестовые образцы измерялись с помощью моста Е7-8 (емкость и tgδ) и характериографа TR-4805 (пробивное напряжение). Значение ε определяли расчетным путем из величины емкости тестовой структуры.

Исследовалось влияние тока и напряжения разряда, состав потока ионов и температуры подложки на ε, tgδ и $E_{пр}$. Было обнаружено, что увеличение парциального давления кислорода с $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. проводит к возрастанию ε с 2,9 до 5,0. Тангенс угла диэлектрических потерь был минимален (0,015) при давлении $3 \cdot 10^{-4}$мм рт.ст., затем возрастал до 0,17 при $5 \cdot 10^{-4}$мм рт.ст. Значения $E_{пр}$ практически не изменялось. Увеличение парциального давления SiH_4 приводило к снижению ε с 5,8 до 3,7, tgδ и $E_{пр}$ почти не изменялись. Повышение тока разряда с 2 до 8 А способствовало возрастанию ε с 2,66 до 4,88, а $E_{пр}$ - с $0{,}15 \cdot 10^7$ В/см до $1{,}26 \cdot 10^7$ В/см. Тангенс угла потерь находился в пределах 0,01 - 0,1 и не коррелировал однозначно с величиной $I_р$. Установлено также, что величина напряжения разряда практически не влияет на электрофизические параметры пленок SiO_2. То же самое можно сказать и о влиянии расстояния ионный источник - подложка. Повышение температуры подложки способствовало увеличению ε с 2,6 до 4,37,

снижению tgδ до 0,0155, а также повышению $E_{пр}$ с $0{,}066 \cdot 10^7$ до $1{,}2 \cdot 10^7$ В/см, т.е. улучшению диэлектрических параметров.

Исследование оптических характеристик покрытий осуществлялось в диапазоне 400 - 1200 нм. Измерения коэффициента пропускания на λ=555 нм показали, что для пленок SiO_2 он находился на уровне 0,95 - 0,98, причем его возрастанию способствовало увеличение парциального давления кислорода и увеличение температуры подложки и повышение анодного напряжения. Спектральная зависимость пропускания свидетельствует о высокой прозрачности полученных покрытий (рис. 8.10,а).

На рис. 8.10,б приведена спектральная зависимость коэффициента отражения пленки двуокиси кремния, нанесенной на стекло ТФ-5. По этой зависимости определен показатель преломления для пленок SiO_2, который составил 1,45-1,47, что соответствует коэффициенту преломления кварца, т.е. происходит полное окисление кремния.

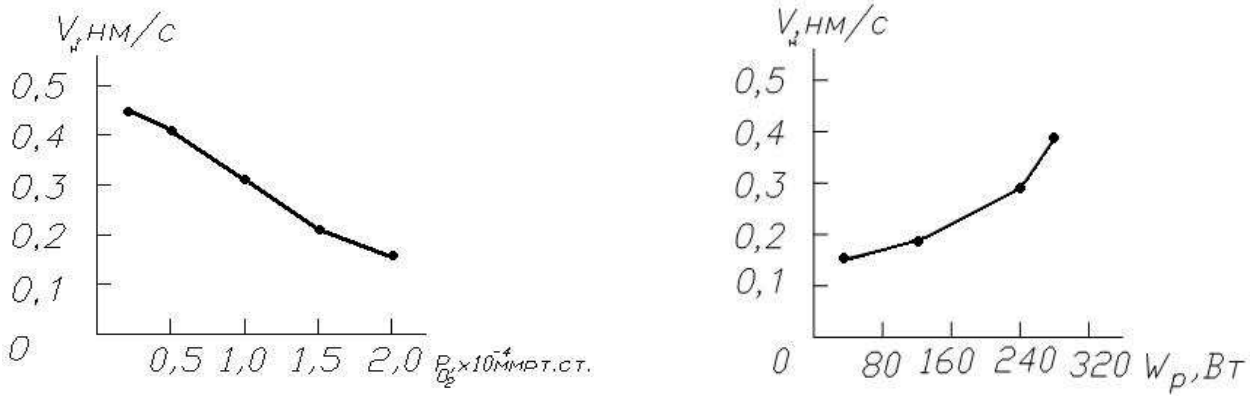


а *б*

Рис. 8.10. Спектры пропускания (а) и отражения(б) пленки SiO_2

8.3.2 Использование вторичного ионного пучка в ускорителе с анодным слоем для нанесения пленок диоксида кремния

Формирование пленок SiO_2 осуществляли осаждением из ионных пучков смеси 5% SiH_4+95% Ar и кислорода. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Покрытия из двуокиси кремния наносились на неподвижную подложку, температура которой составляла 100 – 300°С. Исследование влияния парциального давления кислорода на скорость нанесения покрытий показало, что увеличение доли кислорода приводит к существенному снижению скорости нанесения покрытий (рис. 8.11).



а б

Рис. 8.11. Зависимости скорости нанесения пленок двуокиси кремния: а – от парциального давления кислорода; б – от мощности первичного разряда ионного источника

Что же касается прозрачности покрытий, то даже при давлении кислорода всего $1 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. они получались прозрачные в видимом диапазоне, что свидетельствует об эффективном протекании процессов окисления. На рис. 4.7 представлена зависимость скорости нанесения пленок от мощности разряда. Видно, что с ростом мощности разряда происходит увеличение скорости нанесения. На наш взгляд, это можно объяснить увеличением энергии ионов как кислорода, так и кремния, что способствует их реакционной способности.

Увеличение расстояния “диафрагма – подложка” с 10 до 25 мм приводило к снижению скорости нанесения более чем в 2 раза. Рост мощности первичного разряда приводил к увеличению плотности вторичного ионного пучка и, соответственно, к возрастанию скорости нанесения покрытий.

Исследовано влияние напряжения на диафрагме на скорость нанесения диоксида кремния. Напряжение изменялось от 30 до 200 В; при этом скорость нанесения снизилась с 0,3 до 0,16 нм/с (рис. 8.12).

Исследовалось влияние мощности разряда, парциального давления кислорода, напряжения на диафрагме и температуры подложки на ε, $\mathrm{tg}\delta$ и $E_{пр}$. Обнаружено, что увеличение парциального давления кислорода с $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. проводит к снижению ε с 7,5 до 5,0. Тангенс угла потерь минимален (0,055) при давлении $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст., максимальное значение достигало 0,076 при $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.

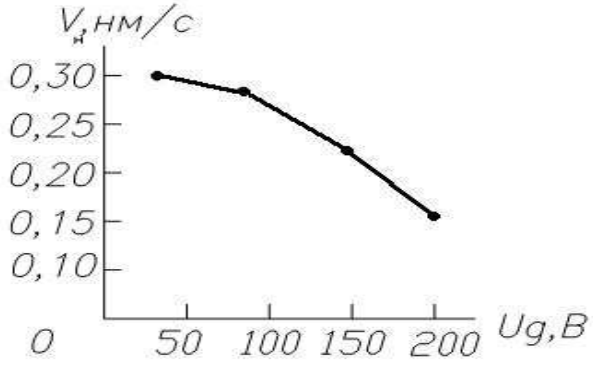


Рис. 8.12. Зависимость скорости нанесения пленки двуокиси кремния от напряжения на диафрагме

Значения $E_{пр}$ изменялись от $4{,}68 \cdot 10^6$ В/см до $1{,}16 \cdot 10^7$ В/см, при изменениях давления кислорода от $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.. Повышение мощности разряда с 120 до 280 Вт способствовало снижению ε с 4,66 до 3,38 и повышению tgδ с 0,051 до 0,084. Пробивное напряжение находилось в пределах с $0{,}78 \cdot 10^7$ В/см до $0{,}36 \cdot 10^7$ В/см. Установлено также, что величина напряжения на диафрагме влияет на электрофизические параметры пленок SiO_2 достаточно сложным образом. Повышение температуры подложки способствовало снижению ε с 5,26 до 4,34, а также повышению $E_{пр}$ с $1{,}1 \cdot 10^6$ до $4{,}9 \cdot 10^6$ В/см, тангенс угла диэлектрических потерь практически не изменялся.

Установлено, что покрытия по характеристикам пропускания близки к кварцу, то есть формируются пленки со стехиометрическим составом. В видимом диапазоне коэффициент пропускания составил 0,84 – 0,90 (рис. 8.13). Таким образом, полученные покрытия обладают высокой прозрачностью в видимом и ближнем ИК-диапазоне, а также высокой плотностью, о чем свидетельствует высокий коэффициент преломления (1,45-1,46).

8.3.3. Синтез пленок диоксида кремния, легированных фтором

Развитие микроэлектроники требует применения для межуровневой изоляции диэлектрических слоёв с низким значением диэлектрической проницаемости. это необходимо для уменьшения потребляемой мощности и увеличения быстродействия в сверхбольших интегральных схемах с размерами элементов менее 0,25 мкм [6]. Традиционные диэлектрики, например SiO2, имеют ε=3,9 и выше, что не удовлетворяет современным требованиям.

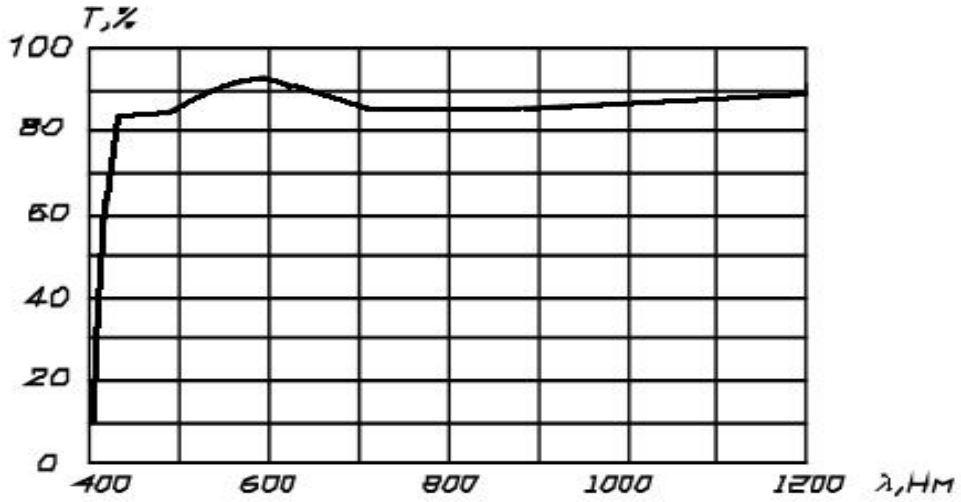


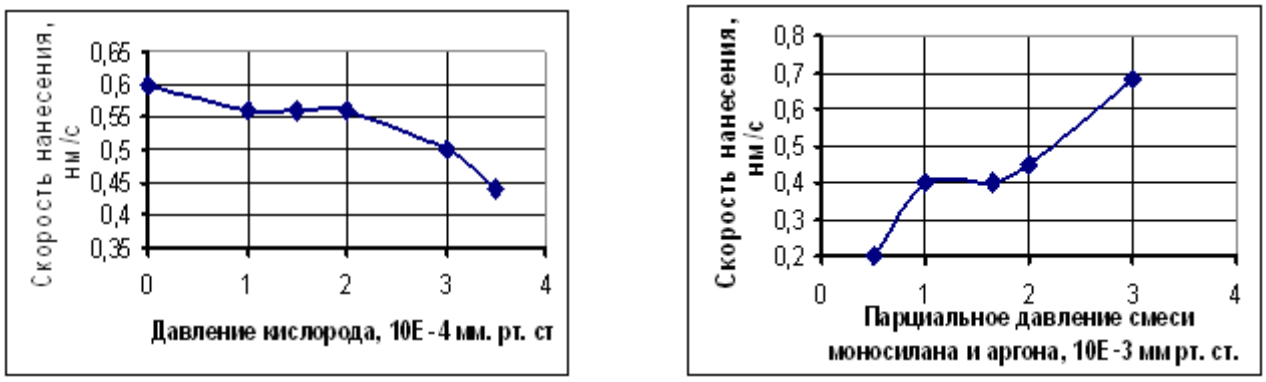
Рис. 8.13. Спектральная зависимость коэффициента пропускания

Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок двуокиси кремния применяют насыщение их фтором. Это приводит к уменьшению ε до 3,7–3,0 при 2–10 атомных процентах фтора [7]. Диэлектрическая проницаемость зависит не только от концентрации фтора, но и от степени его встраивания в структуру SiO_2. Последнее определяется методом нанесения диэлектрика. Например, плазмохимическое осаждение даёт величину ε=3,5.

Для формирования легированных пленок диоксида кремния применялся торцевой холловский ускоритель. В качестве плёнкообразующих газов использовались 5% SiH_4 + 95% Ar, CF_4 и O_2. Покрытия наносились на подложки из кремния, стекла К8, а также на стеклянные подложки с плёнками меди и алюминия. Режимы нанесения были следующими: остаточный вакуум – $1{,}95\cdot10^{-5}$ мм рт. ст.; рабочее давление – $1{,}95\cdot10^{-3}$ мм рт. ст.; давление кислорода – $3\cdot10^{-4}$ мм рт. ст.; давление CF_4 – $(4{,}9 – 10{,}9)\cdot10^{-4}$ мм рт. ст.; ток разряда – 2 – 4 А; напряжение анода – 80 – 100 В; температура подложек – 100 – 250 °С [8].

Скорость нанесения составила около 0,4 нм/с. Для измерения электрофизических параметров использовались МДП–структуры. Минимальное значение диэлектрической проницаемости наблюдалось при давлении CF_4 около $6{,}3\cdot10^{-4}$ мм рт.ст. и составило 3,1. Тангенс угла диэлектрических потерь изменялся от 0,032 до 0,059. Плёнки обладали высокой электрической прочностью $(0{,}2 – 1{,}07)\cdot10^{7}$ В/см) и высокой адгезией к кремнию, алюминию и меди. Зависимость скорости нанесения покрытий от давления кислорода и смеси моносилана и аргона приведены на рис. 8.14. Покрытия имели высокую прозрачность в видимом диапазоне. В результате исследования ИК спектров поглощения обнаружились следующие основные пики: 450 $см^{-1}$ (соответствует деформационным дважды вырожденным

состояниям SiO_2), 650 $см^{-1}$ (поглощение на α–SiH), 933 $см^{-1}$ (поглощение Si–F), 1092 $см^{-1}$ (поглощение Si–O).



а б

Рис. 8.14. Зависимости скорости нанесения покрытий SiOF: а – от давления кислорода при постоянном давлении хладона; б – от парциального давления смеси моносилана и аргона при постоянном давлении кислорода

Увеличение давления кислорода приводит к смещению полосы в более длинноволновую область (свидетельствует об увеличении расстояния Si–Si и улучшении стехиометрии плёнки). Анализ спектра пропускания показал уменьшение пика на длине волны 1092 $см^{-1}$ при введении в покрытие фтора и наличие пика при тех же условиях на длине волны 933 $см^{-1}$. Также обнаружено отсутствие поглощения воды, что свидетельствует о высокой плотности плёнки. Коэффициенты преломления составили 1,5 для плёнки SiO_2, 1,41– для SiOF и 1,46 для SiOF, полученной при 250^0C.

8.4. Формирование покрытий из нитрида кремния

Стехиометрический нитрид кремния Si_3N_4 в технологии СБИС используется для пассивации поверхности схем, сформированных на полупроводниковых пластинах. Предпочтительность для этих целей именно нитрида кремния объясняется тем, что пленки из данного материала представляют собой надежный барьер против диффузии ионов натрия и молекул воды из окружающей среды и поверхности кристалла ИС. Результатом такой диффузии может быть коррозия металлизации и, как следствие, обрыв токоведущих дорожек и разрушение контактов, а также дрейф (временной, температурный) параметров схемы, вызванный накоплением зарядов на границах Si - $Si0_2$ в кристалле. Кроме того, вследствие очень низкой скорости термического окисления нитрида кремния, пленки этого материала часто используются для создания масок, через которые производится глубокое окисление поверхности кремния.

Проведено исследование процессов формирования покрытий из нитрида кремния прямым осаждением из пучка ионов рабочего газа (SiH_4+Ar+N_2) с использованием торцевого холловского ускорителя. Пленки Si_3N_4 наносились на подложки кремния и оптического стекла К8. Остаточный вакуум не превышал значения $3\cdot10^{-5}$мм.рт.ст., анодное напряжение составляло 82-115В, ток разряда 5-6А, ток компенсатора 13-14А, ток соленоида 6-7А. При таких параметрах разряда была достигнута эффективная компенсация пучка, а сам разряд был стабилен.

Исследовано влияние технологических факторов на скорость формирования покрытий, оптические и электрофизические параметры покрытий. Установлено, что при увеличении тока разряда происходит повышение скорости нанесения (рис. 8.15). В тоже время энергия ионов не влияет на этот параметр. Увеличение доли азота приводит к снижению скорости нанесения.

Пленки Si_3N_4 были практически прозрачны в видимом диапазоне, что свидетельствует об эффективном протекании нитридизации кремния. На рис. 8.16 приведен спектр пропускания покрытий из нитрида кремния.

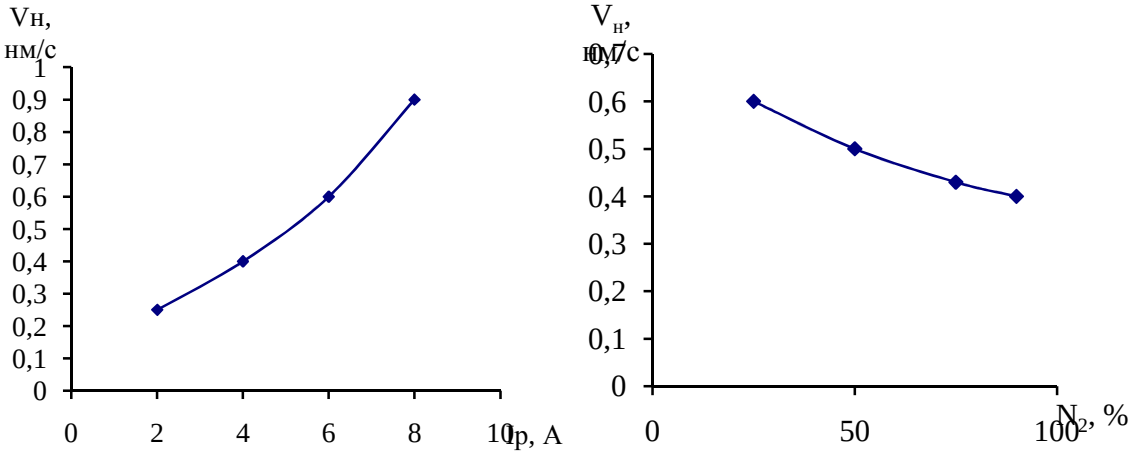


Рис. 8.15. Зависимость скорости нанесения пленок нитрида кремния от:
а – тока разряда б – от парциального давления азота

Проведенные исследования электрофизических характеристик покрытий из нитрида кремния позволили получить следующие закономерности. Изменение давления азота в диапазоне $(1\ldots4)\cdot10^{-4}$ мм рт.ст. не влияло на величину ε (5,5 – 6,5) и $E_{пр}$ ($0{,}9\cdot10^{7}$–$1{,}2\cdot10^{7}$ В/см), лишь увеличивало tgδ с 0,07 до 0,2. Возрастание парциального давления SiH_4 способствовало резкому возрастанию ε с 3 до 12 и снижению $E_{пр}$ с $1{,}3\cdot10^{7}$ до $0{,}5\cdot10^{7}$ В/см. Ток разряда не влиял значительно на параметры пленок (рис. 8.17).

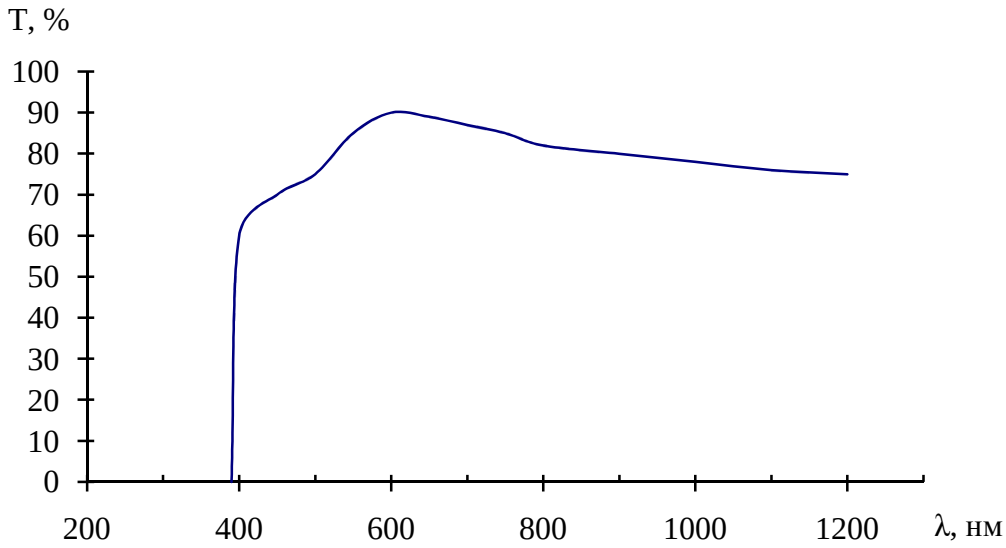


Рис. 8.16. Спектральная зависимость коэффициента пропускания пленки нитрида кремния

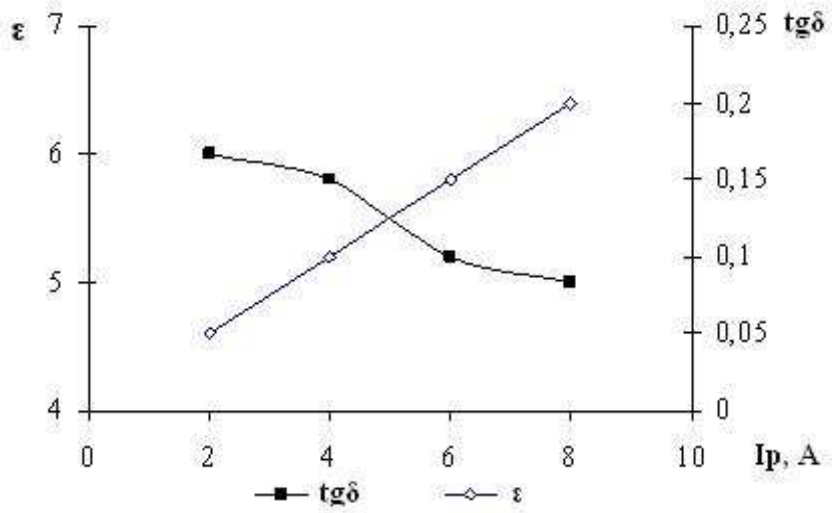
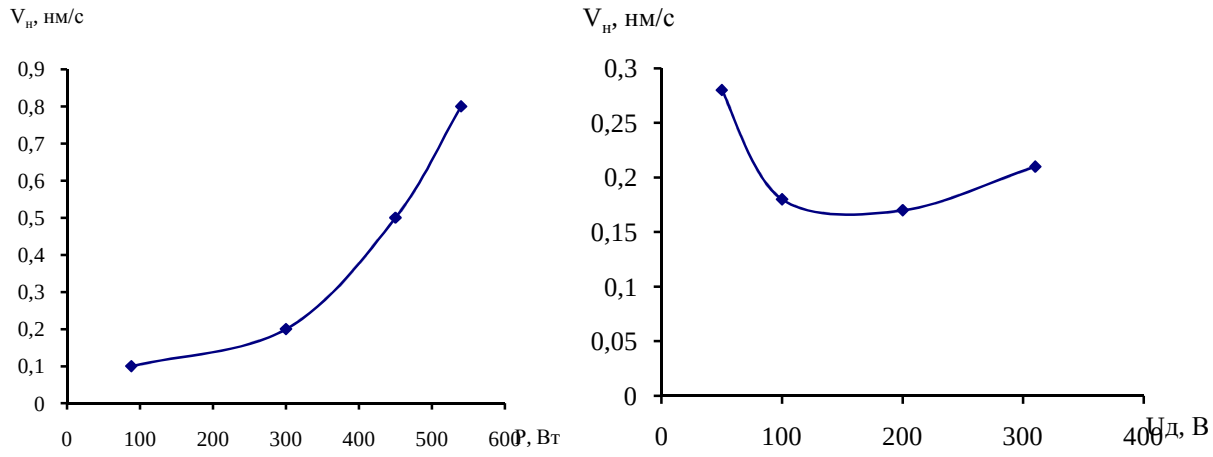


Рис. 8.17. Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от тока разряда

Повышение температуры подложки до 250–300^{0}C также способствовало улучшению электрофизических характеристик. Следует отметить отслаивание пленок Si_3N_4 как с кремния, так и со стекла при температурах подложки менее 250^{0}C.

Были проведены исследования параметров пленок, формируемых ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса из смеси газа 95% Ar + 5% SiH_4 и азота. Напряжение на аноде варьировалось в пределах 2 –3 кВ, ток разряда при этом составлял 80 – 120 мА. Рабочее давление было в диапазоне 10^{-4} – 10^{-3} мм рт.ст. Установлено, что увеличение доли азота приводит к некоторому снижению скорости нанесения

покрытий. С ростом мощности разряда происходило увеличение скорости нанесения (рис. 8.18).



а б

Рис. 8.18. Влияние мощности разряда ионного источника (а) и напряжения на диафрагме (б) на скорость нанесения покрытий

Исследовано влияние напряжения на диафрагме на скорость нанесения покрытий. Напряжение варьировалось от 50 до 300 В, при этом скорость нанесения изменялась в пределах от 0,18 до 0,28 нм/с (рис. 8.20).

Исследование оптических характеристик в зависимости от процентного содержания азота показало, что коэффициент преломления составил 1,8–1,9 (рис. 8.19). На рис. 8.20 представлена спектральная зависимость коэффициента пропускания при различных парциальных давлениях. Очевидно, что с ростом парциального давления азота прозрачность пленок растет.

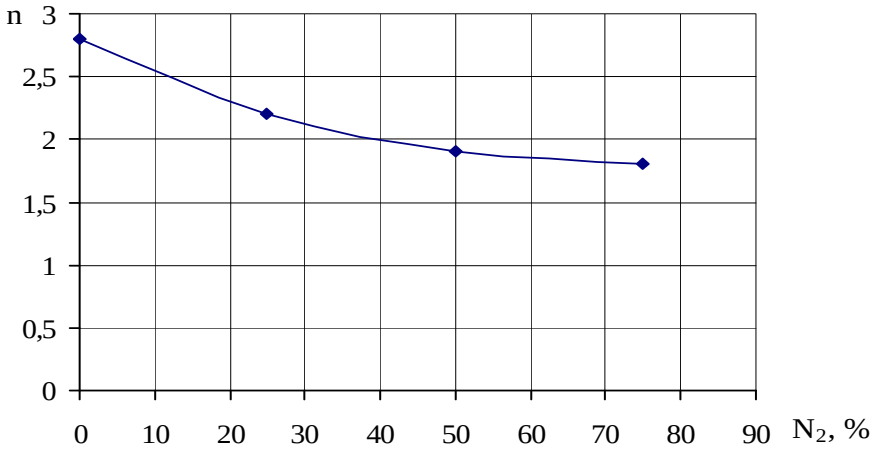


Рис. 8.19. Зависимость коэффициента преломления покрытий от процентного содержания азота

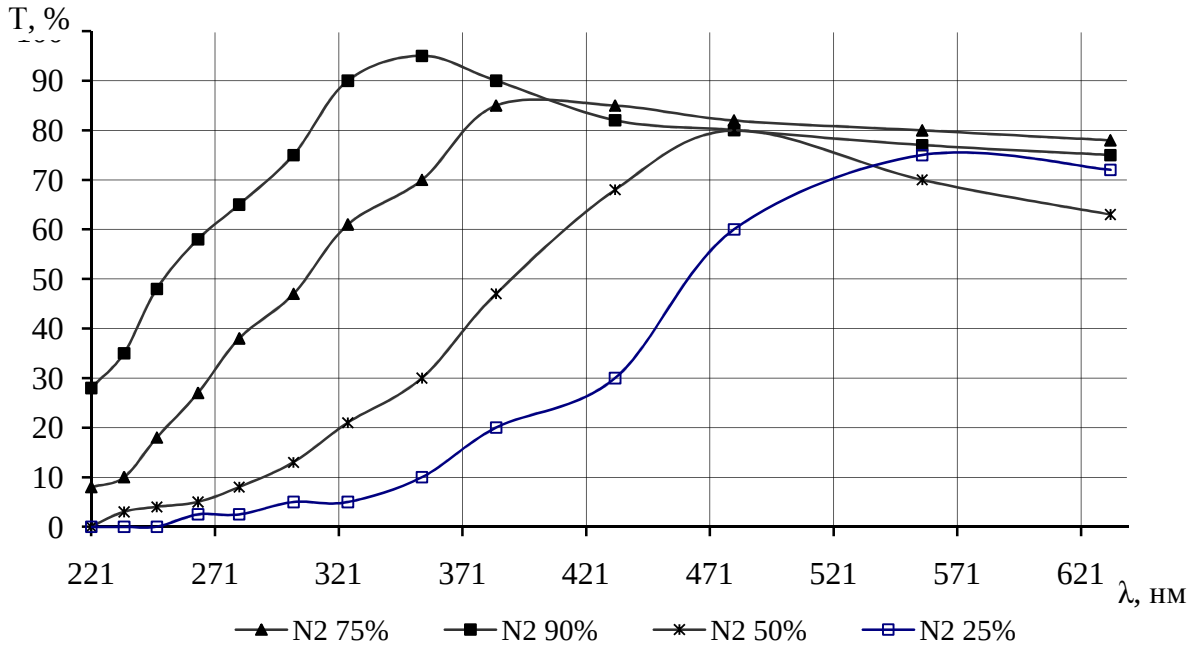


Рис. 8.20. Спектральная зависимость коэффициента пропускания покрытий из нитрида кремния при различных парциальных давлениях азота

Исследовано влияние температуры подложки, парциального давления азота и напряжения на диафрагме на ε и tgδ покрытий. Установлено, что диэлектрическая проницаемость растет с повышением напряжения на диафрагме, увеличением температуры подложки и увеличением парциального давления азота и находится в пределах 6–8. Тангенс угла диэлектрических потерь находился в пределах 0,05–0,3.

8.5. Формирование покрытий из нитрида углерода

В 1989 году был предсказан сверхтвердый материал β – C_3N_4 схожий по структуре с Si_3N_4. С тех пор было осуществлено много исследований по формированию покрытий из нитрида углерода методами магнетронного распыления, ВЧ реактивного распыления, ионно-лучевого распыления и др. Полученные покрытия были аморфными и содержали низкое количество азота, что не обеспечило необходимых параметров по твердости, прозрачности, износостойкости. Пленки из нитрида углерода обладают высокой твердостью, низкой скоростью диффузии, позволяющей использовать пленки в качестве масок при диффузии, защитных герметических покрытиях, межслойной изоляции. Они используются при изготовлении БИС и СБИС в качестве защитных слоев, в том числе и от радиационных повреждений. Нитрид углерода может применяться не только для сверхтвердых покрытий, но и для

изоляции в структурах на основе полупроводников A_3B_5, для формирования дисплеев с полевой эмиссией.

Формирование пленок нитрида углерода осуществляли прямым осаждением из ионных пучков смеси метана, аргона и азота с использованием ТХУ и УАС в режиме ионно-пучкового фокуса. В первом случае покрытия получали при следующих условиях: остаточный вакуум – $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст., рабочее давление – $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст., напряжение на аноде – 100–125В; ток разряда – 4А ; ток эмиттера электронов – 13А, температура подложки – 50°С [9].

Скорость нанесения зависела от парциального давления азота и уменьшалась с ростом его содержания, что связано с уменьшением доли углерода, вступающего в реакцию (рис. 8.21). При 50% содержании азота покрытия на кремнии отслаивались, что, по-видимому, связано с большими механическими напряжениями.

Исследовано влияние тока разряда и парциального давления азота на спектры пропускания пленок нитрида углерода (рис. 8.22). Увеличение содержания азота соотвественно увеличивает пропускающую способность пленок, а увеличение тока разряда ведет к ее уменьшению.

Полученные пленки исследовались на микротвердость по шкале Кнуппа с использованием твердомера фирмы Leica. Микротвердость находилась в пределах 1540-1968 НК. Трибологические характеристики измерялись с использованием микротвердомера МТ– 4. В качестве индентора применяли шарик из стали ШХ15 диаметром 4мм. Нагрузка в условиях сухого трения составляла 0,5Н. Испытаниям подвергались образцы на кремнии и на стекле.

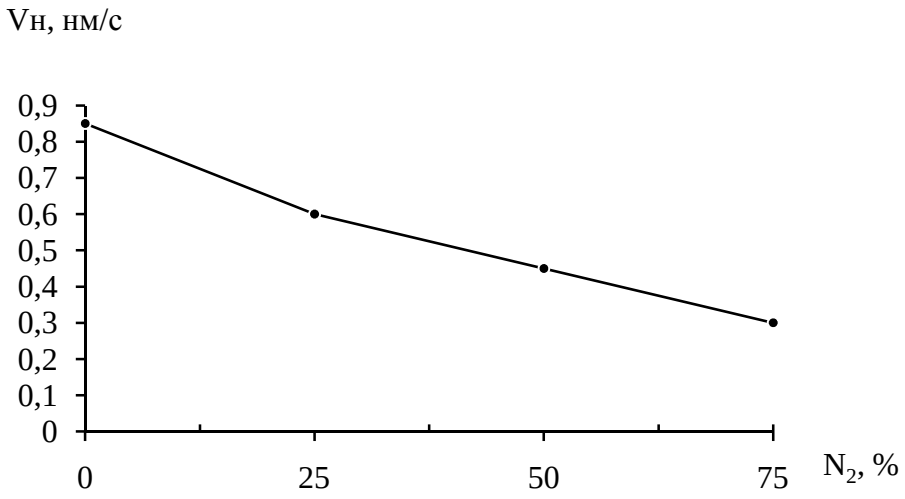


Рис. 8.21. Зависимость скорости нанесения пленок нитрида углерода от парциального давления азота

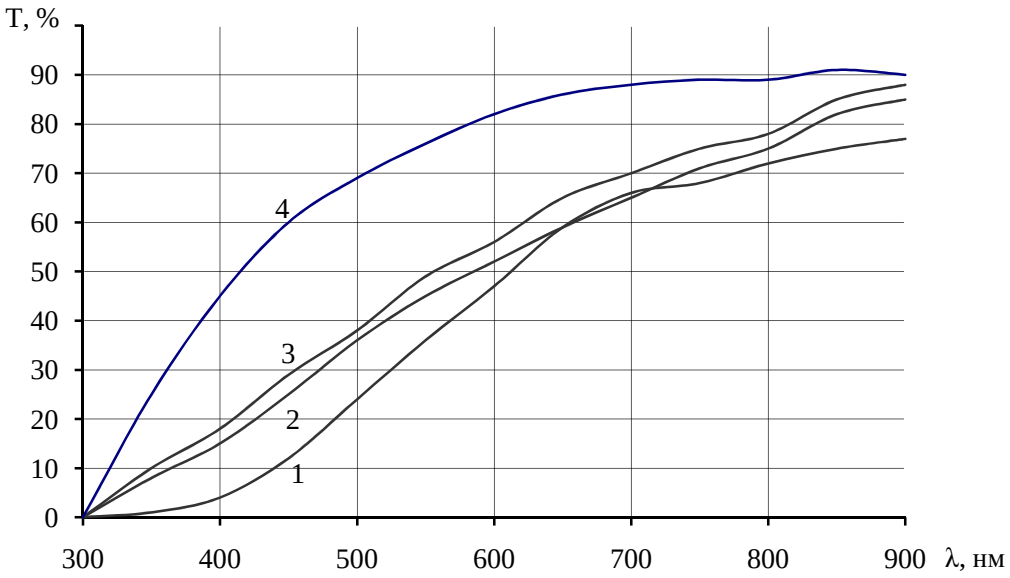


Рис. 8.22. Спектр пропускания пленок нитрида углерода:
1- Ip=4A, N_2=25%; 2- Ip=4A, N_2=50%;
3- Ip=6A, N_2=50%; 4- Ip=2A, N_2=50%

Установлено, что покрытия, нанесенные на стекло, обладали невысокой адгезией, что приводило к их истиранию через несколько циклов. Исследование покрытий, нанесенных на кремний, дало следующие результаты: коэффициент трения находился в пределах 0,58-0,9, среднее число циклов истирания составляло 260, и возрастало с увеличением парциального давления азота.

Были проведены исследования параметров пленок, формируемых ионным источником из ионно-пучкового фокуса смеси метана, аргона и азота. Установлено, что увеличение доли азота также приводит к снижению скорости нанесения покрытий (рис. 8.23).

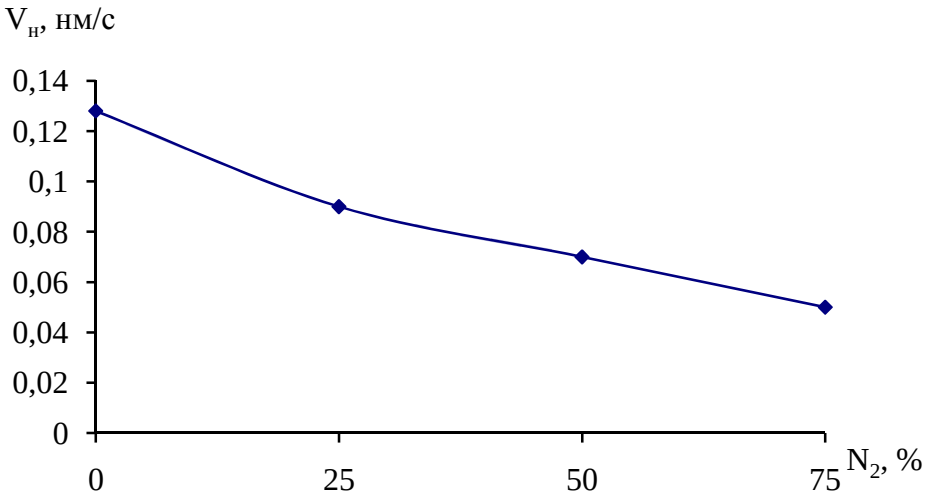


Рис. 8.23. Зависимость скорости нанесения пленок нитрида углерода от парциального давления азота

Исследовано влияние парциального давления азота на пропускание полученных пленок нитрида углерода (рис. 8.24).

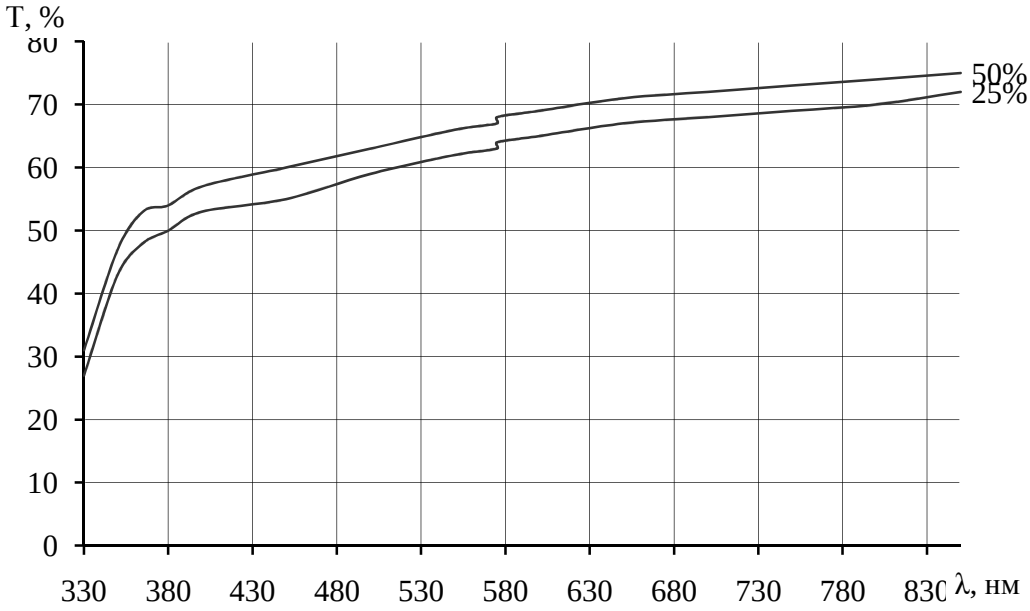


Рис. 8.24. Спектр пропускания пленок нитрида углерода

Из спектра видно, что увеличение содержания азота повышает пропускание пленок. Следует отметить снижение коэффициента пропускания по сравнению с покрытиями, полученными с использованием торцевого холловского ускорителя.

8.6. Формирование покрытий из алмазоподобного углерода

Тонкие пленки на основе углерода используются в микроэлектронике, оптике, машиностроении и других областях техники в качестве полупроводниковых и теплопроводящих слоев, отражающих, просветляющих, износостойких и коррозионно-стойких покрытий. Существует несколько разновидностей пленок на основе углерода: α-C, α-C:H, алмазоподобные и полимерные. Критерием алмазоподобности служит совокупность физических и химических свойств и зависит от способа получения покрытий.

Существующие методы формирования алмазоподобных покрытий основаны на ионном распылении графита и деструкции углеводородов на подложке. Для формирования качественных алмазоподобных покрытий энергия конденсирующихся на подложке частиц находиться в диапазоне 20-60 эВ.

Весьма перспективным является метод нанесения тонкопленочных покрытий посредством генерации потока ионов из пучкового фокуса. Суть

этого метода заключается в том, при определенных условиях в обычном ионном источнике на основе УАС (ускорителя с анодным слоем) имеет место формирование зоны вторичного разряда. Плотность тока в зоне вторичного разряда достигает 5 мА/см^2, а энергия ионов в нем может изменятся в широких пределах. Зона этого разряда имеет форму слаборасходящегося пучка ионов. Для устранения воздействия первичного пучка ионов используется диафрагма из высокоплотного графита, которая имеет по центру отверстие 8-10 мм. Генерация дополнительного пучка наблюдается в широком диапазоне изменений тока разряда и напряжения на аноде. Внешний вид вторичного ионного пучка показан на рис. 8.25.

Экспериментальные исследования проводили на установке вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенной модернизированным ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем, системой подачи рабочих газов (метан, пропан, пары толуола), зондовым устройством и системой эмиссионного спектрального анализа. Состав ионного пучка исследовался с применением эмиссионной оптической спектроскопии. Спектры излучения регистрировались с применением монохроматора ММ-101, ФЭУ-106 и самописца. Анализ спектров показал наличие интенсивных линий атомарного углерода, водорода и азота, ионов углерода (рис. 8.26). Наличие сигналов от азота может быть вызвано наличием остаточной атмосферы в камере.

Рис. 8.25. Внешний вид вторичного ионного пучка

На рис. 8.27 приведены тормозные характеристики пучка ионов метана, полученные при различных режимах. Диафрагма была заземлена, т.е. $U_д$=0. Установлено, что увеличение тока разряда ионного источника приводит к росту тока коллектора ионов. Анализ тормозных характеристик показывает, что средняя энергия ионов составляет 40–60 эВ.

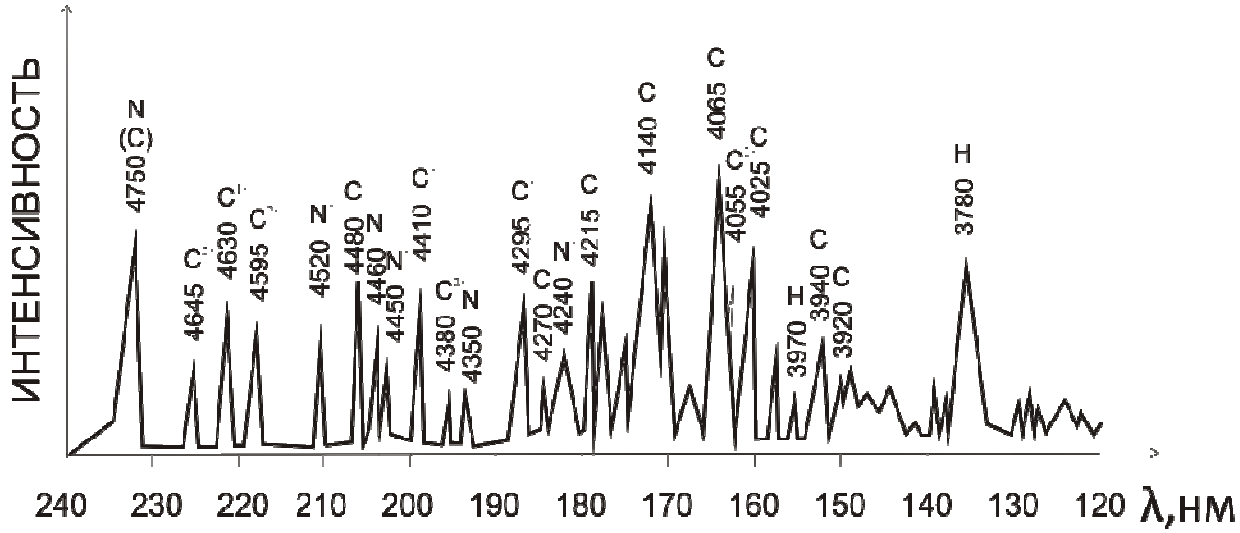


Рис. 8.26. Спектр излучения ионного пучка из метана

При наличии напряжения на диафрагме тормозные характеристики пучка изменяются (рис. 8.28. Увеличение энергии ионов пучка напрямую связано с ростом напряжения на диафрагме $U_д$. Таким образом, можно легко варьировать энергию ионного пучка путем изменения сопротивления переменного резистора, соединенного с диафрагмой.

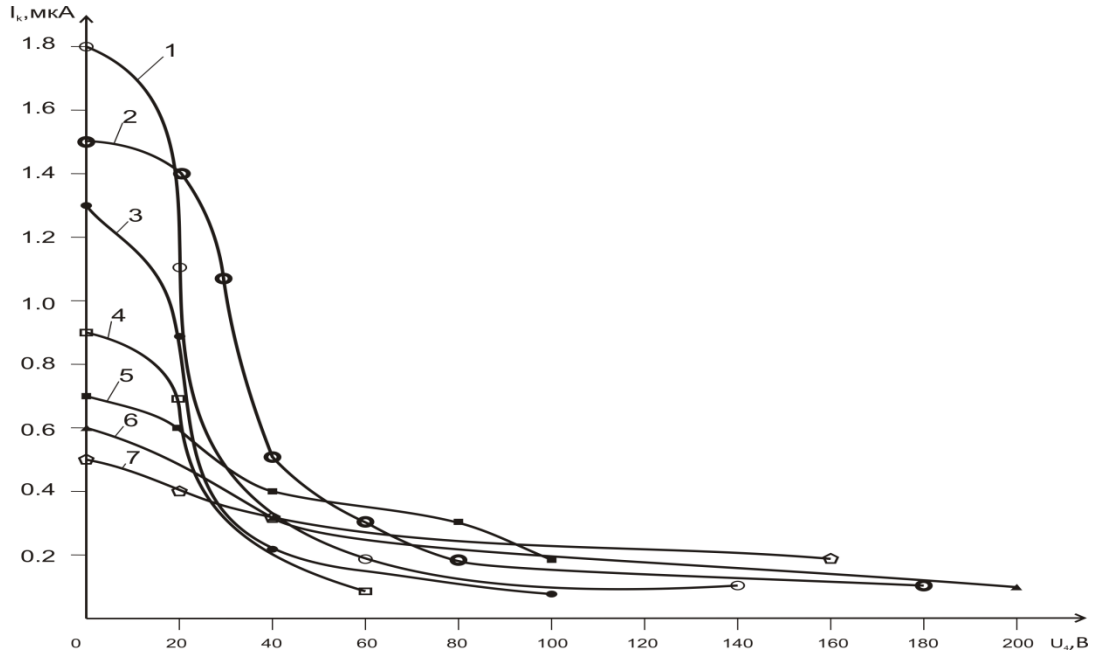


Рис. 8.27– Тормозные характеристики пучка ионов метана, полученные при различных режимах: p= $8\cdot10^{-4}$ мм рт.ст: 1 – U_A= 4 кВ, I_p= 65 мА; 2 – U_A= 4 кВ, I_p= 60 мА; 3 – U_A= 3 кВ, I_p= 60 мА; 4 – U_A= 3 кВ, I_p= 60 мА; p= $7\cdot10^{-4}$ мм рт.ст: 5 – U_A= 4 кВ, I_p= 55 мА, 6 – U_A= 3 кВ, I_p= 50 мА; 7 – U_A= 2 кВ, I_p= 50 мА

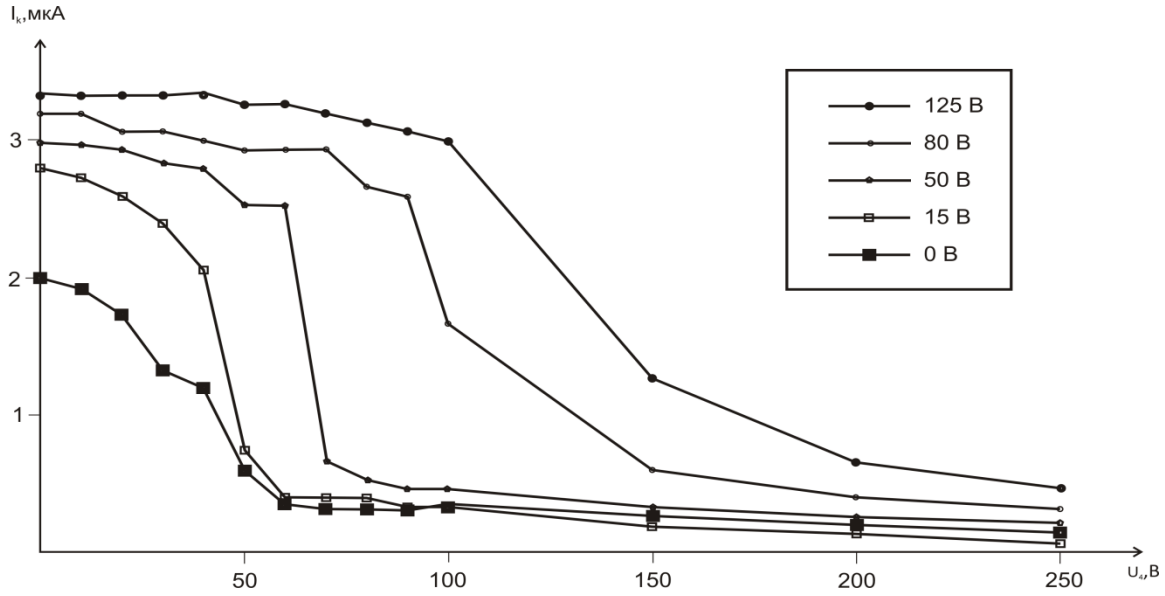


Рис. 8.28. Тормозные характеристики пучка ионов метана, полученные при различных напряжениях на диафрагме

Формирование покрытий осуществляли осаждением из ионных пучков метана, пропана и толуола. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Покрытия наносились на неподвижную подложку. В качестве последней использовались кремний, германий стекло К8. Температура подложек не превышала 40^{o}С. С ростом мощности первичного разряда происходило увеличение скорости нанесения, которая находилась в диапазоне 0,15–0,40 нм/с. Было установлено, что увеличение $U_д$ от 30 до 200 В привело снижению скорости с 0,4 до 0,16 нм/с.

Проведено формирование алмазоподобных покрытий с использованием различных рабочих углеродсодержащих газов (метан, пропан, толуол). Эти вещества содержат разное количество атомов углерода и водорода, поэтому энергия деструкции и ионизации этих веществ должна быть разной. Исследования показали, что наибольшую скорость обеспечивает использование пропана и толуола.

Для исследования оптических параметров пленки алмазоподобного углерода наносились на подложки из стекла К8. Покрытия имели окраску от желтоватого до коричневого цвета, толщина покрытий составляла 0,17–0,37 мкм. На рис. 8.29 приведена спектральная зависимость коэффициента пропускания. Пленки имели плохую прозрачность в видимом диапазоне (Т=50%), но переходе в инфракрасную область пропускание увеличивается. По спектральной зависимости отражения был определен коэффициент преломления покрытий, который находился в диапазоне 2,2–2,4.

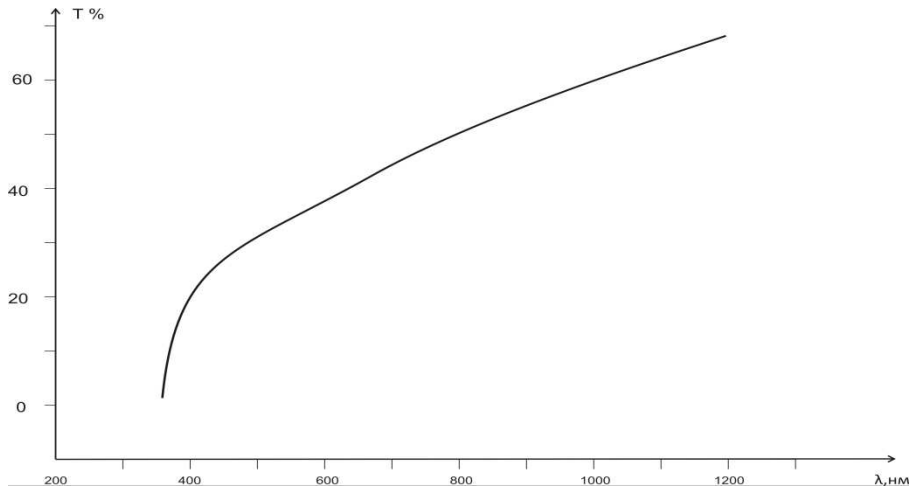


Рис. 8.29. Спектральная зависимость коэффициента пропускания

Покрытия из алмазоподобного углерода толщиной ~1,15 мкм были нанесены на поверхность германиевой подложки. На рис. 8.30 приведена зависимость пропускания системы АПП/германий от длины волны падающего излучения. Анализ этой зависимости позволяет сделать вывод о перспективности использования полученных покрытий для просветления германиевой оптики инфракрасного диапазона.

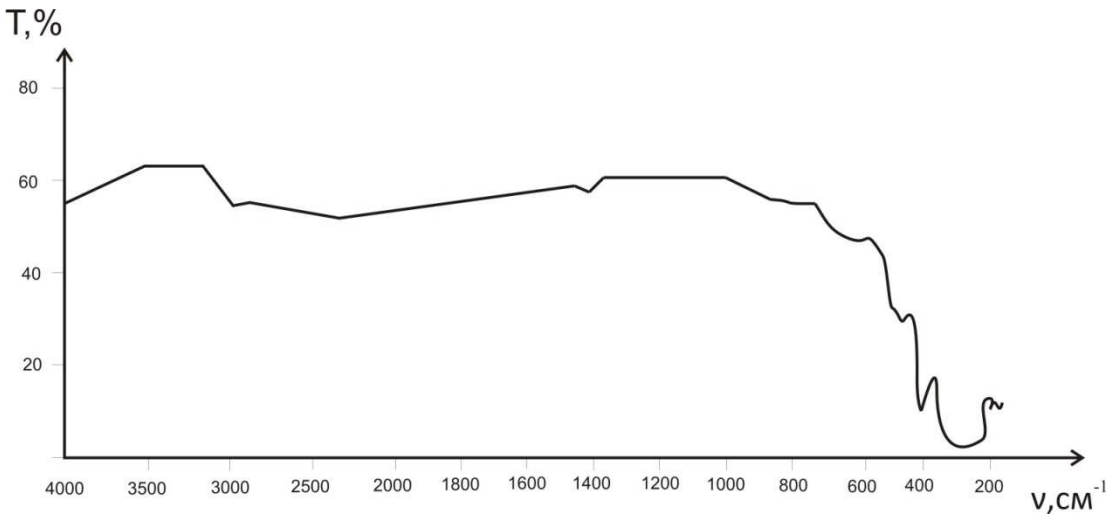


Рис. 8.30. Зависимость пропускания системы АПП/германий

Полученные покрытия исследованы с применением рамановской спектроскопии. Пики, соответствующие графитовой фазе (1580 $см^{-1}$) не были обнаружены. На спектре имелся интенсивный пик (1333 $см^{-1}$), соответствующий алмазной фазе. На рис. 8.31 приведен ЭПР-спектр, измеренный на спектрометре Radiopan-SE/x на частоте 9,3 ГГц. Он показывает наличие ярко выраженного сигнала с g=2,00286. Этот результат получен для покрытия, сформированного при 30° С, и свидетельствует об образовании

структуры α–С. Это подтверждается также измерением электрической прочности покрытия, которая составила $1{,}1 \cdot 10^6$ В/см, а удельное объемное сопротивление – $1{,}4 \cdot 10^8$ Ом·см. Что касается других электрофизических характеристик, то они были следующими: диэлектрическая проницаемость ε = 3,1…4,6; тангенс угла диэлектрических потерь tg δ = 0,06…0,0054. Это свидетельствует о высоком проценте содержания алмазной фазы в покрытиях.

Для измерения трибологических характеристик покрытия толщиной ~ 0,3 мкм наносились на подложки из кремния. Измеренная на трибометре ТАУ-1Н износостойкость составила 1240 циклов истирания . Для сравнения покрытие из нитрида алюминия выдержало лишь 150 циклов истирания. Измерение микротвердости покрытий дало результаты от 1145 до 2155HV. Исследование адгезии покрытий методом отрыва липкой ленты показало, что покрытия имели отличное сцепление со всеми использованными в экспериментах подложками.

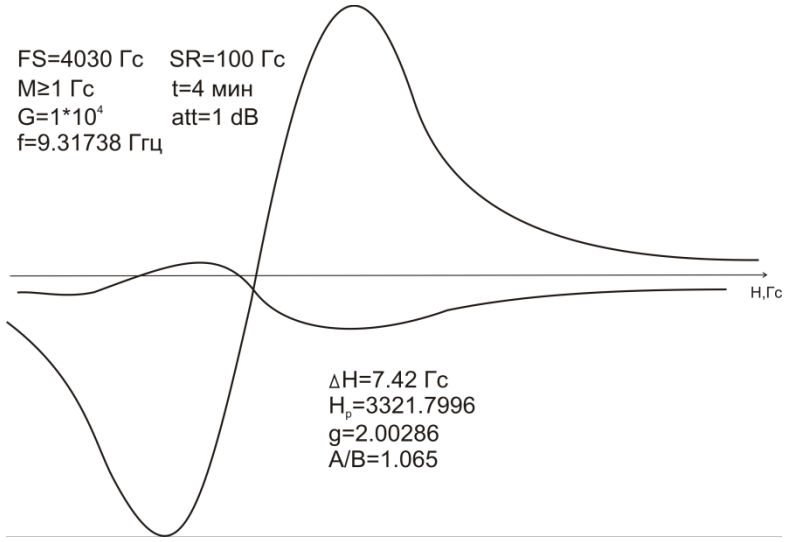


Рис. 8.31. ЭПР спектр алмазоподобного покрытия

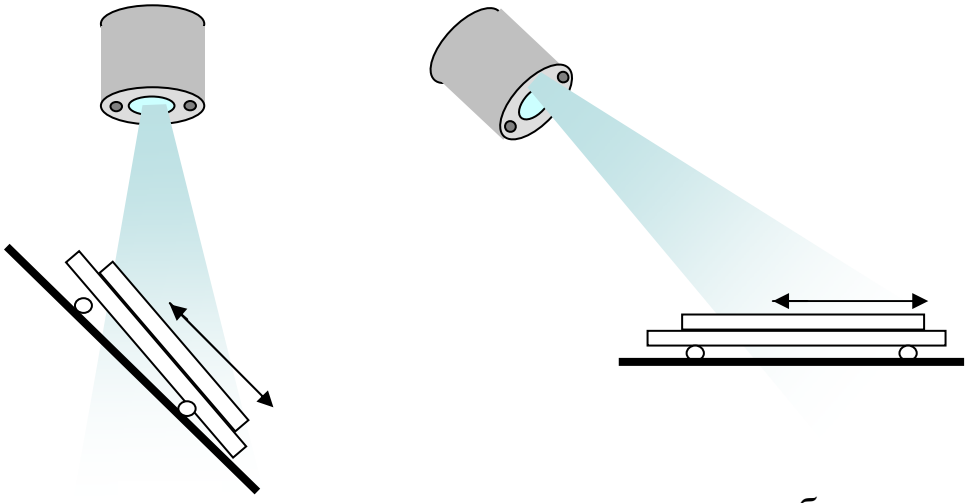
8.7. Применение разработанных процессов для синтезаориентирующих покрытий в ЖК-дисплеях

Одной из основных проблем при производстве широкоформатных жидкокристаллических дисплеев является ориентация кристаллов. Обычно это осуществляется натиранием фетром покрытия из полиакриловой кислоты (ПАК). Такой способ не обеспечивает воспроизводимости и равномерности особенно на широкоформатных подложках. В настоящее время для формирования ориентирующего слоя используют альтернативные процессы: косое напыление пленок и ионное травление ранее нанесенного слоя [10].

Предложено использовать для формирования ориентирующих слоев метод прямого осаждения из ионных потоков [11]. Для этого применялся

цилиндрический торцевой холловский ускоритель. Нанесению покрытий предшествовала очистка ионами аргона поверхности подложек для обеспечения хорошей адгезии. Энергия ионов составляла 30– 50 эВ, ток разряда 0,5 А, время очистки 5 минут. Подложки располагались под углом 60–90^0 к осевой линии ускорителя (рис. 8.32).

После ионной очистки осуществляли формирование ориентирующих покрытий. В качестве подложек применялись стекло, стекло с нанесенным слоем оксида индия-олова, полиимид, триацетилцеллюлоза (ТАС) и пластик СОР. Режимы нанесения представлены в таблице 8.1. ЖК-ячейки заполнялись нематическими жидкими кристаллами с положительной и отрицательной анизотропией Δε. Зазор между электродами составлял 7–15 мкм.



а б

Рис. 8.32. Схемы обработки подложек с наклоном подложки (а) и ионного источника (б)

Таблица 8.1

Режимы нанесения ориентирующих покрытий

Покрытие	Парциальные давления компонентов рабочего газа, мм рт.ст.	U_a, В	I, А
a-CH	CH_4/1.2 10^{-3}; Ar/0.7 10^{-4}	70	2
a-CHN	CH_4/ 7*10^{-4}, N_2/1.2*10^{-3}	80	2
a-CHF	CH_4/1.2*10^{-3}, CF_4/0.8*10^{-4}	90	2
a-SiO_x	SiH_4/2 10^{-3}; O_2/3.5 10^{-4}	60	4
a-$SiO_xH_yC_zF_k$	SiH_4/2*10^{-3}, CF_4/7*10^{-4}, O_2/3.5 10^{-4}	80	4

Ячейки исследовались визуальным контролем с использованием скрещенных поляризаторов и с применением поляризационного микроскопа. При вертикальном ориентировании жидких кристаллов ячейки были темными при любом вращении. Для горизонтально ориентированных ЖК-ячеек при

вращении происходило изменение цвета ячейки на темный и светлый. Для a-CHF , a-SiO_x и a-$SiO_xH_yC_zF_k$ покрытий были получено отличное вертикальное ориентирование жидких кристаллов. Ячейки при наклонном ориентировании демонстрировали бездефектное переключение в электрическом поле (таблица 8.2).

Наоборот, для a-CH, a-CHN и a-SiO_x покрытий влияние однородного орентирования ЖК с $\Delta\varepsilon>0$ было неоднозначным. Жидкие кристаллы ориентировались в перпендикулярном направлении по отношению к направлению осаждению покрытия. В результате угол преднаклона был близок к нулю. Однако, используя комбинацию двух стадий осаждения покрытий во взаимно перпендикулярных направлениях, был получен небольшой угол преднаклона. Такие ЖК-ячейки демонстрировали отличное электрооптическое переключение с характеристикой «пропускание-приложенное напряжение», сопоставимой с технологией натирания ПАК.

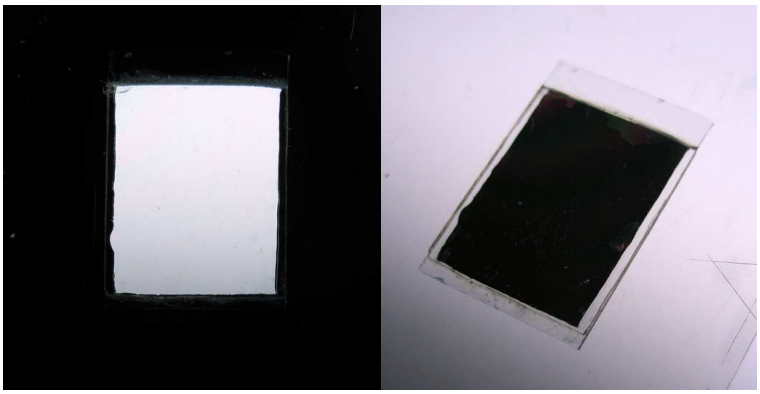
Таблица 8.2

Результаты испытаний ЖК-ячеек

Покрытие / Образец	a-CH	a-CHN	a-CHF	a-SiO_x	a-$SiO_xH_yC_zF_k$
	Оптическое качество ориентации ЖК				
256C	⊙	⊙	⊙	⊙/○	Δ
141	⊙/○	⊙/○	-	○	X
19B	○	○	⊙	⊙	⊙

Качество ориентации ЖК: ⊙ – отличное, ○ – хорошее, Δ – удовлетворительное, X – плохое.

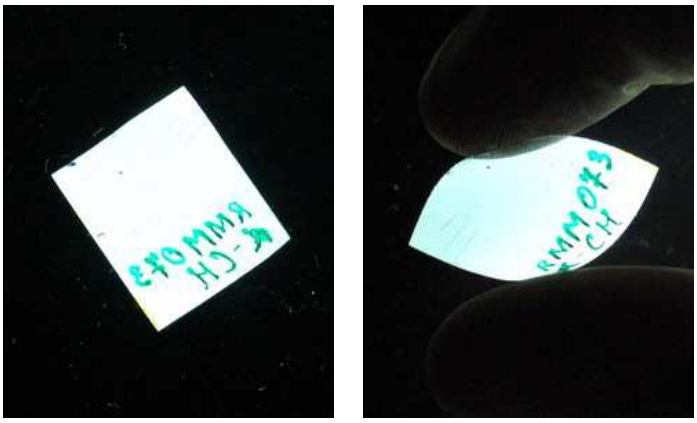
На внешнем виде такой ячейки между двумя поляризаторами видно, что жидкие кристаллы демонстрируют ориентацию с высокой равномерностью. Здесь в качестве материала ориентирующего слоя применялся a-C:H (рис. 8.33).



а б

Рис. 8.33. Внешний вид ассиметричной ЖК-ячейки между двумя поляризаторами: (а) скрещенные поляризаторы; (б) параллельные поляризаторы

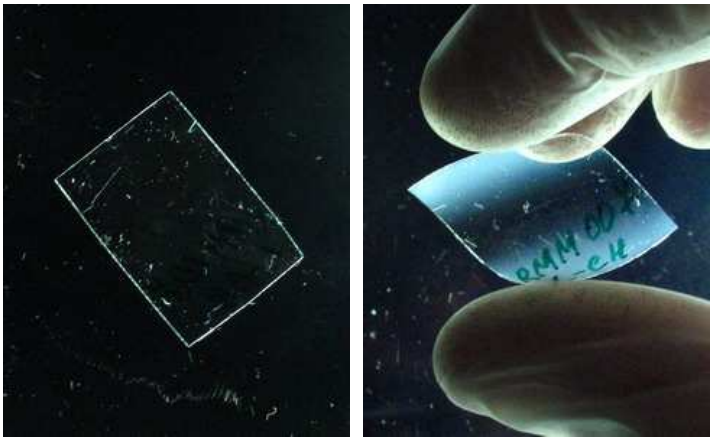
Другой функцией ориентирующих покрытий является барьерная, т.е. защита от проникновения атмосферных газов, что особенно важно для полимерных ЖК-дисплеев. На рис. 8.34 приведены фотографии ЖК-ячейки на пластике COP размером 2x3 $см^2$, которые демонстрируют высокое оптическое качество. Для ориентирующего покрытия применялся a-CHN.



а б

Рис. 8.34. Фотография ЖК-ячейки на подложке из пластика COP: недеформированное состояние (а); деформированное состояние (б)

На рис. 8.35 приведена фотография ЖК-ячейки на гибкой полимерной подложке из триацетилцеллюлозы (TAC) с ориентирующим покрытием из a-CH. Ячейка исследовалась с применением скрещенных поляризаторов.



а б

Рис. 8.35. Фотография ЖК-ячейки на гибкой полимерной подложке из TAC: недеформированное состояние (а); деформированное состояние (б)

Таким образом, прямое осаждение их ионных пучков является перспективным методом для формирования ориентирующих, барьерных, а также защитных и просветляющих покрытий для изделий оптоэлектроники.

Список литературы к главе 8

1. Ширипов, В.Я. Нанесение DLC покрытий на германиевые окна тепловизионных приборов/ В.Я. Ширипов, Т.Б. Бояренко, С.П. Марышев, Е.В. Телеш, С.М. Насточкин //10-я Междунар. НТК "Состояние и перспективы развития вакуумной техники “Вакуум-2001”, Тезисы докладов, Казань, 29.05-01.06 2001.– С. 198-199.

2. Meskinis, S. Dielectric properties of the ion beam deposited SiO_x doped DLC films/ S. Meskinis, R.Gudaitis, S. Tamulevicius, V.Kopustinskas, M.Andrulevicius // Material Sci. V.15, № 1, 2009.– P.3-6.

3. Zuhr, R.A. Formation of aluminum films on silicon by ion beam deposition: a comparison with ionized cluster beam deposition / R.A.Zuhr,T.E. Haynes, M.D.Galloway, S.Tanaka, A.Yamada., I.Yamada // Nuclear Instr. and Methods in Phys.Research. Section B, V.59. – P.308-311.

4. Withrow, S.P. Ion beam deposition of β-SiC layers onto α-SiC substrates/ S.P.Withrow, , K.I.More, R.A.Zuhr., T.E.Haynes //Vacuum, V.39, №. 11-12, 1989.– P.1065–1068.

5. Зыков, А.В. Генерация потока ионов из пучкового фокуса/ А.В.Зыков, Ю.А.Качанов, В.И. Фареник // Письма в ЖТФ, т.12, в.10, 1986.– С.593-596.

6. Murarka, S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application/ S.P.Murarka //Solid State Technology, №3, 1996.– P.83–89.

7. Телеш, Е.В. Формирование пленок Si-O-F ионно-лучевым распылением / Е.В.Телеш, О.В.Максуль // Тезисы докладов Междунар. НТК, посвященной 45-летию МРТИ-БГУИР. Минск, БГУИР, 19 марта 2009 г., С.218–219.

8. Максуль, О.В. Получение пленок SiOF прямым ионным осаждением / О.В.Максуль, Е.В.Телеш // Материалы 4-й Междунар. молодежной научн.-техн. конференции"Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008", 12-14 апреля 2008 г. Севастополь.– С.306.

9. Телеш, Е.В. Формирование покрытий из нитрида углерода с использованием ионных потоков / Е.В.Телеш, М.А.Якунин // Материалы Междунар.научн.-практ. конференции "Современная радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров, Минск, 20-21 апреля 2006.– С.147–149.

10. Khakhlou, A.Second wind of the oblique deposition method of liquid crystal alignment: ion-beam sputtering technique / A.Khakhlou, A.Murausky, O.Yaroshchuk, E.Telesh, R.Kravchuk // Journal of SID,14/3, 2006.– P. 257–263.

11. Alignment film for liquid crystals optanable by direct particle beam deposition Всемирная заявка WO 2009/106208 A1, G02F 1/1337(2006.1), Priority Data: 29 February 2008/ O.Yaroshchuk, E.Telesh, A.Khokhlov.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монография обобщает значительный объем теоретических и экспериментальных исследований авторов, в нее включены новые оригинальные разработки отечественных и зарубежных ученых по созданию высоких технологий твердотельных структур конкурентоспособных изделий микро– и наноэлектроники.

Электрофизические процессы вакуумной плазменной обработки материалов в сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полях эффективны при травлении поверхностей, осаждении пленок металлов, сплавов, диэлектриков, полупроводников, сверхпроводников, выращивания эпитаксиальных пленок и модификации структуры поверхностных слоев твердых тел ионной имплантацией. СВЧ плазменная обработка обеспечивает высокие требования субмикронной микро– и наноэлектроники и позволяет существенно сократить материальные и временные затраты на разработку оборудования и технологии.

Модульные источники энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона позволяют снизить энергозатраты при электрофизической термообработке обработке органических и полимерных материалов и улучшить качество готового продукта. Предложены новые конструкции облучателей в виде резонансных волноводно-щелевых антенн, повышающие равномерность распределения напряженности СВЧ-поля на поверхности обрабатываемого материала.

Моделирование процессов магнетронного распыления материалов, применяемых в технологии вакуумного ионно-плазменного нанесения тонких пленок для формирования функциональных слоев в микроэлектронике, оптике, оптоэлектронике и машиностроении: скорости напыления, распределения толщины слоев по подложке, элементного состава тонкопленочных слоев позволяет прогнозировать параметры наносимых покрытий с погрешность не более 10 %.

Прямое осаждение из ионных пучков является перспективным процессом формирования ориентирующих, барьерных, а также защитных и просветляющих покрытий для изделий оптоэлектроники. Эти процессы могут найти применение в производстве широкоформатных жидкокристаллических дисплеев.

Разработаны устройства формирования шарика на проволочном выводе при термозвуковой микросварке электроискровым разрядом в защитной атмосфере со встроенной системой контроля и стабилизации процесса

образуемых шариков на конце золотой или медной проволоки. Преимуществами использования отрицательной полярности высокого напряжения на электроде разрядника являются возможность образования шариков стабильного диаметра на проволоке малого диаметра и уменьшение отжига. Стабилизация процесса образования шариков определяет высокое качество формируемых контактных соединениях в изделиях микроэлектроники.

Использование пошагового метода ионного легирования в производстве интегральных микросхем позволяет получать бездислокационные структуры кремния и тем самым улучшать электрофизические характеристики элементов интегральных схем (снизить токи утечки диодов, повысить коэффициенты усиления транзисторов) и повысить выход годных изделий.

Оптимизированы процессы формирования мембран микромеханических датчиков микронной и субмикронной толщины, обеспечивающие получение сбалансированных гетеросистемных мембран микроэлектромеханических устройств.

Разработаны линейные синхронные двигатели субмикронной точности перемещений, которые нашли применение в технологическом оборудовании микро– и наноэлектроники, в том числе в установках голографического формирования структур на полупроводниковой пластине, алмазного точения и полирования и др.

Монография может служить практическим руководством для инженерно-технического персонала по освоению перспективных технологических процессов создания соединений в современных изделиях микроэлектроники, а также может быть полезна аспирантам, магистрантам и студентам при изучении соответствующих дисциплин.

Научное издание

ДОСТАНКО Анатолий Павлович,
БОРДУСОВ Сергей Валентинович,
ЛАНИН Владимир Леонидович,
РУСЕЦКИЙ Анатолий Максимович и др.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Монография

Ответственный за выпуск С.Л. Жукова
Редактор М.И. Волковец

Подписано в печать____.Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. Уч.-изд л.
Тираж 100 экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:
УП "Беспринт". ЛИ №02330/0494307 от 04.03.2009.
ЛП 02330/0494209 от 03.04.2009.
Ул. Филатова, 9, 220026, г. Минск