

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

Д. А. Довгяло

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ,
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОСХЕМОТЕХНИКА

Учебно-методический комплекс для студентов специальностей
1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование
радиоэлектронных средств»,
1-36 04 02 «Промышленная электроника»

В 2 частях

Часть 1

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Новополоцк
ПГУ
2012

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73
Д58

Рекомендовано к изданию методической комиссией
радиотехнического факультета в качестве учебно-методического комплекса
(протокол № 1 от 14.09 2011)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

гл. конструктор ОАО «Измеритель» А. И. КЛЮЕВ;
канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения
УО «Полоцкий государственный университет» А. Л. АДАМОВИЧ

Довгяло, Д. А.

Д58

Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем, микроэлектроника и микросхемотехника : учеб.-метод. комплекс для студентов специальностей 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств», 1-36 04 02 «Промышленная электроника» / В 2 ч. Ч. 1. Технология микроэлектронных устройств / Д. А. Довгяло. – Новополоцк : ПГУ, 2012. – 316 с.

ISBN 978-985-531-360-2.

Рассмотрены механические, химические, ионные, плазменные, электронно-лучевые и другие методы обработки в технологии микроэлектронных устройств. Обобщены данные по выращиванию монокристаллов, диффузии, эпитаксии, ионной имплантации, технологии тонких пленок, литографии, сборке и герметизации. Значительное внимание уделено контролю, обеспечению качества и надежности при изготовлении микроэлектронных устройств.

Предназначен для студентов радиотехнических факультетов, аспирантов и преподавателей.

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73

ISBN 978-985-531-360-2 (Ч. 1)
ISBN 978-985-531-359-6

© Довгяло Д. А., 2012
© УО «Полоцкий государственный университет», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Микроэлектроника, как современное направление проектирования и производства электронной аппаратуры различного назначения, является катализатором научно-технического прогресса. Автоматизация производства, создание гибких перестраиваемых роботизированных систем, развитие автономных систем немыслимы без применения интегральных микросхем, микропроцессоров и микросборок. Технология изготовления изделий микроэлектроники обеспечивает, прежде всего, высокий уровень производительности труда, комплексную микроминиатюризацию электронной аппаратуры связи, автоматики, вычислительной техники.

Этот учебно-методический комплекс предназначен для студентов радиотехнического факультета специальностей 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» и 1-36 04 02 «Промышленная электроника», а также для студентов смежных специальностей при изучении ими курсов по основам микроэлектроники.

К сожалению, в настоящее время дисциплины «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем», «Микроэлектроника и микросхемотехника» не обеспечены в полном объеме научной и учебно-методической литературой. Ориентация на самостоятельную управляемую работу студентов определяет необходимость изложения в полном объеме теоретических основ изучаемых дисциплин.

Учебно-методический комплекс состоит из двух частей. В первой подробно рассмотрены технологические маршруты производства микросхем различного исполнения, вопросы их анализа и синтеза как необходимой совокупности и последовательности технологических операций. Уделено внимание обеспечению эффективности производства, повышению качества микросхем. Изложено содержание технологических операций и принципы работы современного технологического оборудования.

Во второй части изделия микроэлектроники рассмотрены как совокупность миниатюрных, связанных между собой электрорадиоэлементов. Даны понятия о конструктивной, схемотехнической и функциональной интеграции этих элементов, прослежена связь функциональных характеристик элементов интегральных микросхем с конструктивно-технологическими вариантами их исполнения. Эта часть направлена на овладение принципами конструкторского проектирования интегральных схем и методиками расчета элементов и фрагментов интегральных схем широкого функционального назначения.

Далее рассмотрены вопросы схемотехнического проектирования ряда микроэлектронных изделий – операционных усилителей, перемножителей сигналов, интегральных компараторов, аналоговых коммутаторов, устройств выборки-хранения информации, стабилизаторов напряжения, аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей и предназначен в основном для студентов специальности «Промышленная электроника». В разделе, предназначенном для изучения студентами специальности «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств», рассмотрены особенности компьютерного моделирования микроэлектронных изделий, приведены возможности и технические особенности современных компьютерных пакетов, даны примеры машинного проектирования некоторых узлов микросхем.

Материал, изложенный в УМК, представляет собой компиляцию большого числа научных и учебных изданий.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АК	аналоговый коммутатор;
АМ	амплитудная модуляция;
АПЕ	аппаратурно-процессная единица;
АСУП	автоматизированная система управления производством;
АСУТП	автоматизированная система управления технологическим процессом;
АЦП	аналогово-цифровой преобразователь;
БЗП	бестигельная зонная плавка;
БИС	большая интегральная схема;
БМ	балансный модулятор;
БСС	боросиликатное стекло;
БТО	быстрый термический отжиг;
БФСС	борофосфоросиликатное стекло;
ВЗП	вертикальная зонная плавка;
ГЗП	горизонтальная зонная плавка;
ГИС	гибридная интегральная схема;
ИК	инфракрасный;
ИМС	интегральная микросхема;
ИОН	источник опорного напряжения;
ИПЛ	инжекционно-полевая логика;
ИС	интегральная схема;
КВД	кремний в диэлектрике;
КМДП	комплементарная структура металл – диэлектрик – полупроводник;
КМС	камера масс-сепаратора;
КНД	кремний на диэлектрике;
КНИ	кремний на изоляторе;
КНС	кремний на сапфире;
КПД	коэффициент полезного действия;
МДМ	металл – диэлектрик – металл;
МДП	металл – диэлектрик – полупроводник;
МЛЭ	молекулярно-лучевая эпитаксия;
МОП	металл – окисел – полупроводник;
МПЛ	микрорешетчатая линия;

НТД	нормативно-техническая документация;
ОБ	общая база;
ОЖ	охлаждающая жидкость;
ОУ	операционный усилитель;
ПВЦ	поливинилциннамат;
ПГС	парогазовая смесь;
ПС	перемножитель сигналов;
ПЛИС	программируемая логическая интегральная схема;
ПММА	полиметилметакрилат;
ПТУП	полевой транзистор с управляющим р-n переходом;
РЭА	радиоэлектронная аппаратура;
РЭС	радиоэлектронные средства;
САПР	системы автоматизированного проектирования;
СБИС	сверхбольшая интегральная схема;
СВЧ	сверхвысокая частота;
СИ	синхротронное излучение;
СКИН	сварка давлением с косвенным импульсным нагревом;
ТВН	термовакuumное напыление;
ТКЛР	температурный коэффициент линейного расширения;
ТП	технологический процесс;
ТТЛ	транзисторно-транзисторная логика;
ТУ	технические условия;
УВХ	устройства выборки-хранения информации;
УФ	ультрафиолетовое;
УЭ	учебный элемент;
ФНЧ	фильтр нижних частот;
Ф/Л	фотолитография;
ФЛСС	фторолегированное силикатное стекло;
ФОГФ	физическое осаждение из газовой фазы;
Ф/Р	фоторезист;
ФСС	фосфорносиликатное стекло;
ХАЧ	химически активные частицы;
ХОГФ	химическое осаждение из газовой фазы;
ЦАП	цифро-аналоговый преобразователь;
ШВ	шлюзовые устройства выгрузки;
ШЗ	шлюзовые устройства загрузки;
ЭКС	электроконтактная конденсаторная сварка.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИН, ИХ СОДЕРЖАНИЕ И МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

«Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем»

Рабочая программа «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем» составлена на основании образовательного стандарта Республики Беларусь ОСРБ 1-39 02 01-2007 и типовой учебной программы для высших учебных заведений для специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» (регистрационный № ТД-39-062/тип).

Цель преподавания дисциплины

Основной целью изучения дисциплины является приобретение студентами знаний и навыков в области проектирования интегральных схем, изучение закономерностей, достижений и перспективных направлений развития технологии изготовления изделий интегральной техники, ознакомление с пакетами автоматизированного проектирования микросхем.

Задачи изучения дисциплины

Определяются требованиями к подготовке инженеров радиотехнического профиля, вытекающими из их роли в системе непрерывного профессионального образования в соответствии с положениями образовательных стандартов, включающими:

- овладение принципами конструкторского проектирования интегральных схем и методиками расчета элементов и фрагментов интегральных схем широкого функционального назначения;
- изучение взаимосвязи схемотехнических, функциональных, конструктивных и технологических параметров интегральных схем;
- изучение основных требований к оформлению и приобретению навыков разработки конструкторской и технологической документации на производство интегральных схем;
- овладение физико-химическими основами операционных технологических процессов производства микросхем;
- изучение базовых технологических процессов производства интегральных схем, особенностей применяемого оборудования и материалов;
- освоение основ автоматизированной подготовки производства изделий интегральной техники.

Место дисциплины в учебном процессе

Дисциплина «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем» в учебном плане специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлек-

тронных средств» расположена в центре перечня дисциплин, обеспечивающих научную и техническую подготовку инженера по радиоэлектронике. Изучая эту дисциплину, студенты знакомятся с конструкторскими и технологическими принципами построения микроэлектронных устройств, методами и особенностями проектирования ИС, с вопросами обеспечения оптимального режима их работы и другими вопросами микроэлектроники, знание которых необходимо для ряда радиоинженерных дисциплин.

Фундаментальной базой дисциплины являются знания, приобретенные студентами при изучении дисциплин «Высшая математика», «Физика», в особенности таких разделов, которые связаны с теорией рядов, дифференциальным исчислением, электричеством и физикой полупроводников.

Без знаний, полученных при изучении дисциплины «Физико-химические основы микроэлектроники и технологии», невозможно усвоение материала изучаемой дисциплины. Особенно важным для проектирования микроэлектронных изделий является понимание зонной теории твердого тела, видов и типов основных легирующих примесей, вопросов массопереноса в материалах электронной техники.

Дисциплина основана также на знании характеристик и параметров активных и пассивных элементов, рассматриваемых в курсе «Электронные приборы».

Кроме того, владение характеристиками основных электротехнических материалов, их совместностью, стабильностью при изготовлении и эксплуатации, изучаемыми в дисциплине «Материалы и компоненты электронной техники», позволит грамотно подобрать материалы конструкций микросхем, микросборок и микропроцессоров.

Знания, приобретаемые при изучении дисциплины «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем», являются полезными для многих дисциплин учебного плана, таких, как «Конструирование радиоэлектронных устройств», «Системы автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств», «Типовые компоненты и датчики контрольно-диагностических средств» и др., которые излагаются параллельно с данным курсом или после него.

В результате освоения курса «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем» студент должен

➤ **знать:**

- принципы проектирования ИС и методики конструктивного расчета элементов и фрагментов ИС широкого функционального назначения;
- взаимосвязь функциональных, конструктивных и технологических параметров ИС;
- основы контроля электрических характеристик элементов ИС;

- основы обеспечения работоспособности ИС при воздействии внешних дестабилизирующих факторов;
- основные требования к оформлению и приобрести навыки разработки конструкторской документации на производство ИС;
- перспективы совершенствования ИС как элементной базы радиоэлектронных средств;
- матричный метод проектирования маршрутов микросхем;
- базовые технологические процессы производства интегральных схем;
- методы защиты ИС от воздействия внешних дестабилизирующих факторов;
- основные критерии качества ИС и их взаимосвязь с технологическими параметрами;
- основные требования к оформлению технологической документации на производство ИС;
- пути и перспективы совершенствования технологии ИС;
- **уметь характеризовать:**
- достоинства и недостатки различных вариантов конструктивного исполнения элементов и ИС в целом;
- достоинства и недостатки различных технологических процессов производства РЭС;
- пакеты компьютерного проектирования изделий интегральной техники;
- оборудование, применяемое в технологических процессах;
- **уметь анализировать:**
- техническое задание на проектирование ИС и грамотно определять ее конструктивно-технологическое исполнение;
- результаты исследований и моделирования характеристик ИС.
- **приобрести навыки:**
- компьютерного и ручного проектирования топологии активных и пассивных элементов ИС;
- измерения электрических характеристик и определения параметров электрических моделей элементов ИС;
- разработки конструкторской и технологической документации на производство ИС.

Содержание дисциплины

Программа дисциплины рассчитана на объем 222 учебных часа.

Студенты дневной формы обучения изучают дисциплину в течение шестого и седьмого учебных семестров в объеме: 72 часа – лекции, 16 часов – практические занятия, 16 часов – лабораторные занятия. Предусмотрена курсовая работа (7 семестр) в рамках самостоятельной контролируемой работы студентов (40 часов). Итоговый контроль: зачет – 6 семестр, экзамен – 7 семестр.

Студенты заочной сокращенной формы обучения изучают дисциплину в течение девятого и десятого учебных семестров в объеме: 12 часов – лекции, 4 часа – практические занятия, 4 часа – лабораторные занятия. Предусмотрена курсовая работа (10 семестр) в рамках самостоятельной контролируемой работы студентов. Итоговый контроль: зачет – 9 семестр, экзамен – 10 семестр.

Наименование тем лекционных занятий

№	Наименования разделов и тем лекций и их содержание	Число часов	
		Д(П)	З(С)
1	2	3	4
Тема 1. ПРИНЦИПЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ			
1	Интегральные схемы. Разновидности интегральных микросхем. Система условных обозначений интегральных схем. Способы изоляции элементов интегральных схем. Конструкции элементов полупроводниковых ИМС и микропроцессоров на биполярных транзисторах.	2	
Тема 2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ			
2	Особенности биполярного транзистора и назначение его отдельных областей. Конфигурации биполярных транзисторов. Основные характеристики биполярного транзистора. Транзисторы с тонкой базой. Многоэмиттерные транзисторы. Многоколлекторные транзисторы. р-п-р транзистор. Изопланарный транзистор.	2	
Тема 3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДИОДЫ			
3	Конструкции интегральных диодов. Стабилитроны. Диоды Шотки. Транзистор с диодом Шотки.	2	
Тема 4. ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ МИКРОСХЕМ			
4	Дискретные микрокомпоненты. Резисторы ИМС. Интегральные резисторы. Диффузионные резисторы. Пинч-резисторы. Ионнолегированные резисторы. Микрополосковые линии. Особенности интеграции устройств диапазона сверхвысоких частот.	2	2
5	Интегральные конденсаторы. МДП-конденсаторы. Тонкопленочные МДМ-конденсаторы. Пленочные индуктивные элементы. Применение пассивных элементов.	2	2

Продолжение табл.

1	2	3	4
Тема 5. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС ДРУГ ОТ ДРУГА			
6	Изоляция обратно-смещенными р-п-переходами. Изоляция диэлектриком: кремний в диэлектрике (КВД), кремний на диэлектрике (КНД). Комбинированная изоляция.	2	2
ТЕМА 6. ЭЛЕМЕНТЫ КОММУТАЦИИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИМС.			
7	Элементы коммутации в ИМС. Многоуровневая и многослойная разводка. Контактные площадки. Вспомогательные элементы ИМС.	2	
Тема 7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ.			
8	Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом. Усилитель-инвертор на основе полевого и биполярного транзисторов. Конструктивно-технологические варианты исполнения биполярного и полевого транзисторов в одном кристалле.	2	
Тема 8. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ. КМДП-БИС.			
9	Условное обозначение МДП-транзисторов. Конструкция и принцип действия. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналами. Охранные кольца. Охранные диоды. Основные характеристики МДП-транзисторов и их связь с конструктивно-технологическими параметрами. Конструктивные параметры. Электрофизические параметры.	2	
10	Конструктивно-технологические разновидности МДП-транзисторов: с алюминиевыми затворами (особенности конструкции), с многослойным диэлектриком, с поликремниевым затвором, на диэлектрической подложке, Д-МДП и V-МДП-транзисторы.	2	
11	Конструктивно-технологические варианты исполнения элементов КМДП-БИС, КМДП-инверторов: структуры с р-карманами, структуры с n-карманами, структура с карманами двух типов. КМДП БИС на сапфировых подложках.	2	
Тема 9. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ИС			
12	Коммутационная схема (схема расположения). Технические требования и технологические ограничения (минимальные размеры и расстояния между элементами, метки совмещения) при разработке топологии. Паразитные емкости. Оценка их влияния на работоспособность ИС. Расчет и способы их уменьшения.	2	
13	Оценка теплового режима и его связь с конструкцией ИС (способом герметизации). Расчет надежность ИС и ее связь с условиями эксплуатации (электрическая нагрузка, внешние воздействия).	2	
Тема 10. ПЛИС			
14	Достоинства ПЛИСов. Область применения. Конструктивно-технологические особенности. Основы проектирования ИС на основе ПЛИСов.	2	

Продолжение табл.

1	2	3	4
Тема 11 КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УДАЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ – ПОДЛОЖКИ.			
15	Технологические среды и жидкости, методы их очистки. Процессы удаления вещества с поверхности твердой фазы.	2	
Тема 12 ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ			
16	Схема производственной иерархии технологического процесса изготовления ИМС. Физическое и математическое моделирование технологических процессов изготовления ИМС.	2	
17	Принципы анализа технологических процессов изготовления ИМС. Применение планирования экстремальных экспериментов в технологии ИМС.	2	
Тема 13 БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ			
18	Методы выращивания монокристаллов. Ориентация полупроводниковых монокристаллических слитков. Резка, шлифовка и полировка полупроводниковых пластин. Методы очистки пластин.	2	
19	Диффузионные процессы. Способы проведения двухстадийной диффузии. Способ диффузии в открытой трубе. Ампульный способ проведения диффузии. Бокс-метод.		2
20	Ионное легирование: применение, достоинства метода, физическая сущность. Механизм образования дефектов при ионном легировании полупроводников. Отжиг дефектов при ионном легировании полупроводников. Принцип действия установки ионного легирования. Магнитная сепарация ионов.		2
21	Особенности эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев. Хемоэпитаксия. Газофазная эпитаксия. Жидкофазная эпитаксия. Способы уменьшения температурных градиентов.	2	
22	Классификация и особенности методов получения диэлектрических пленок, применяемых в производстве ИМС. Назначение маскирующих, разделительных и пассивирующих диэлектрических слоев. Применение поликристаллического кремния. Методы получения диэлектрических пленок. Термическое окисление кремния. Пиролитическое осаждение SiO ₂ . Оборудование техпроцессов.	2	
23	Процесс фотолитографии. Классификация фоторезистов. Требования, предъявляемые к фоторезистам. Характеристики фоторезистов. Типовой фотолитографический процесс: подготовка пластин, нанесение фоторезиста, сушка фоторезиста, экспонирование, проявление, задубливание, травление.	2	
Тема 14. МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ			
24	Блочная структура технологического маршрута изготовления ИМС. Микроцикл маршрута изготовления ИМС.	2	2
25	Структура и состав микроциклов маршрута изготовления ИМС. Вспомогательные и формообразующие обработки. Построение стандартных микроциклов для формирования фрагментов базовой ячейки кристалла. Анализ матрицы технологического маршрута.	2	

Окончание табл.

1	2	3	4
Тема 15. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ			
26	Классификация и особенности методов получения пленок в технологии гибридных ИМС. Анодное окисление. Термовакuumное резистивное испарение. Ионно-плазменное окисление. Ионно-плазменное распыление.	2	
27	Метод термовакuumного испарения. Механизм метода. Условия адсорбции частиц. Способы нагрева испаряемого вещества. Параметры технологического процесса термовакuumного испарения. Достоинства и недостатки метода. Нанесение пленок методом ионного распыления. Магнетронное распыление. Коаксиальная и планетарная магнетронная система.	2	
Тема 16. ТОЛСТОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ			
28	Требования к подложкам толсто пленочных ГИС. Материалы подложек. Пасты толсто пленочных ГИС.	2	
29	Структурная схема технологического процесса изготовления гибридных толсто пленочных ИМС.	2	
Тема 17. СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ			
30	Виды монтажа кристаллов ИМС в корпус. Сборка на гибкой ленте-носителе.	2	
31	Герметизация полупроводниковых приборов и ИМС.	2	
Тема 18. АНАЛИЗ ОТКАЗОВ МИКРОСХЕМ			
32	Анализ отказов ИМС. Этапы анализа. Организация и обеспечение анализа отказов ИМС. Объемные отказы ИМС. Поверхностные отказы ИМС.	2	
33	Контактные отказы ИМС. Отказы, вызванные нарушением условий применения ИМС в РЭА. Пути повышения качества и надежности ИМС.	2	
Тема 19. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ			
34	Применение САПР для разработки топологии интегральных микросхем.	4	
35	САПР для оценки тепловых режимов работы интегральных микросхем.	2	
	Всего	72	12

Практические занятия

№	Наименование тем практических занятий и их содержание	Число часов	
		Д (П)	З (С)
1	2	3	4
1	Диффузионные процессы. Изучение оборудования для проведения технологического процесса диффузии.	2	
2	Ионное легирование. Изучение установки и типовых режимов ионного легирования полупроводников.	2	

Окончание табл.

1	2	3	4
3	Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых слоев. Изучение технологического оборудования, применяемого для эпитаксии. Конструкции установок для проведения процесса эпитаксии.	2	
4	Термическое окисление кремния. Пиролитическое осаждение. Изучение оборудования и режимов техпроцессов.	2	
5	Фотолитографические процессы в технологии интегральных микросхем. Изучение типового фотолитографического процесса на примере изготовления кристалла СБИС.	2	
6	Метод термовакuumного испарения. Изучение оборудования и режимов техпроцесса. Схема установки термовакuumного испарения.	2	
7	Резисторы ИМС. Расчет диффузионных резисторов.	2	2
8	Интегральные конденсаторы. Проектирование и расчет интегральных конденсаторов.	2	2
	Всего	16	4

Лабораторные работы

№	Наименование лабораторной работы	Число часов	
		Д (П)	З (С)
1	Изучение основных нормативных документов, регламентирующих процесс производства микросхем	2	
2	Изучение технологического процесса нанесения тонких пленок методом термовакuumного напыления (установка УВН-7Ш-3)	2	
3	Конструкции и расчет полупроводниковых резисторов	2	2
4	Исследование моделей технологических процессов термического окисления кремния	2	
5	Изучение маршрутной технологии производства кристаллов СБИС	2	2
6	Изучение методов получения тонких пленок (установка ВУП-2К)	2	
7	Технология разделения пластин и подложек на кристаллы	2	
8	Технология монтажа кристаллов	2	
	Всего	16	4

Курсовое проектирование

Курсовая работа выполняется в течение 7 семестра. Студенты заочной сокращенной формы выполняют курсовую работу в 10 семестре. На выполнение курсовой работы студенту отводится 40 часов. Основная задача проектирования заключается в самостоятельной разработке студентом конструкции и технологии изготовления микросхемы.

Варианты тем курсовых работ с примерным указанием заданий:

1. Разработать конструкцию и технологию изготовления полупроводниковой микросхемы.

2. Разработать конструкцию и технологию изготовления гибридной микросхемы.

3. Разработать конструкцию и технологию изготовления совмещенной микросхемы.

Пояснительная записка должна содержать следующие разделы:

Введение.

1. Анализ исходных данных и формирование расширенного технического задания на проектирование.

2. Выбор и обоснование применяемых материалов и компонентов конструкции.

3. Конструкторские расчеты.

4. Разработка топологии микросхемы.

5. Разработка технологии изготовления микросхемы.

6. Сборка микросхемы.

Заключение.

Список использованных литературных источников.

Приложения.

Перечень графического материала:

1. Схема электрическая принципиальная микросхемы (с перечнем элементов).

2. Кристалл. Топологический чертеж общего вида. Комплект фотошаблонов.

3. Сборочный чертеж микросхемы. Спецификация.

График опрентовок курсового проектирования

Раздел курсовой работы	Время, отводимое на выполнение, ч	Процентвка (№ недели)
1	2	3
Введение. Формирование расширенного технического задания на проектирование микросхемы.	2	2
Выбор и обоснование конструктивных материалов для изготовления микросхемы.	2	3
Выбор и обоснование технологических материалов для изготовления микросхемы.	2	4
Конструктивные расчеты пассивных элементов микросхемы: резисторы, конденсаторы.	2	5
Конструктивные расчеты активных элементов микросхемы: транзисторы, диоды	2	6

Окончание табл.

1	2	3
Расчет тепловых режимов микросхемы. Расчет надежности микросхемы.	2	7
Разработка топологического рисунка проектируемой микросхемы. Конструктивные и технологические ограничения.	4	8
Разработка технологического процесса изготовления микросхемы.	2	9
Выбор технологического оборудования и режимов.	4	10
Разработка корпуса интегральной микросхемы. Присоединение кристалла или платы. Герметизация.	2	11
Разработка чертежа схемы электрической принципиальной микросхемы и перечня элементов.	2	12
Разработка чертежа кристалла или платы.	2	13
Разработка комплекта фотошаблонов.	9	14
Разработка сборочного чертежа микросхемы и спецификации.	3	15
Всего	40	

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Для изучения дисциплины «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем» предлагается модульная система. Весь материал разбит на девятнадцать тематических модулей, причем каждый модуль в своем составе содержит определенное количество УЭ. Каждый УЭ рассчитан на 2 учебных часа лекционных или практических занятий и самостоятельную работу студентов. Учебные элементы, содержащие лабораторные работы по дисциплине, рассчитаны на два аудиторных часа. В конце каждого модуля имеется УЭ контроля, представляющий набор вопросов, заданий или упражнений, которые необходимо выполнить после изучения модуля. Когда студент будет уверен, что он получил достаточные знания, умения и навыки, ему необходимо пройти собеседование у преподавателя или выполнить выходной тест – в зависимости от вида УЭ контроля. При неудачном прохождении УЭ контроля студенту необходимо изучить данный модуль более полно.

Оценка знаний

Общая оценка, получаемая в результате изучения дисциплины «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем», формируется из двух составляющих: 70 процентов – в процессе учебного семестра, 30 процентов – в результате выходного ито-

гового контроля – экзамена. Полное знание материала каждого учебного элемента максимально оценивается в 100 баллов. Таким образом, максимальное количество баллов, которое студент может заработать в семестре, составляет 2700 (1900 за теоретический материал (19 УЭ) и 800 – за лабораторные работы). Исходя из этого, ниже в таблице приведено количество баллов, по которым выставляется оценка, полученная в процессе учебного семестра и прибавляемая к оценке, полученной при выходном контроле – экзамене.

Для получения итоговой 10-балльной оценки по дисциплине (включая 6 баллов, полученных в процессе семестра, и максимальное количество баллов на экзамене – 3) студент должен:

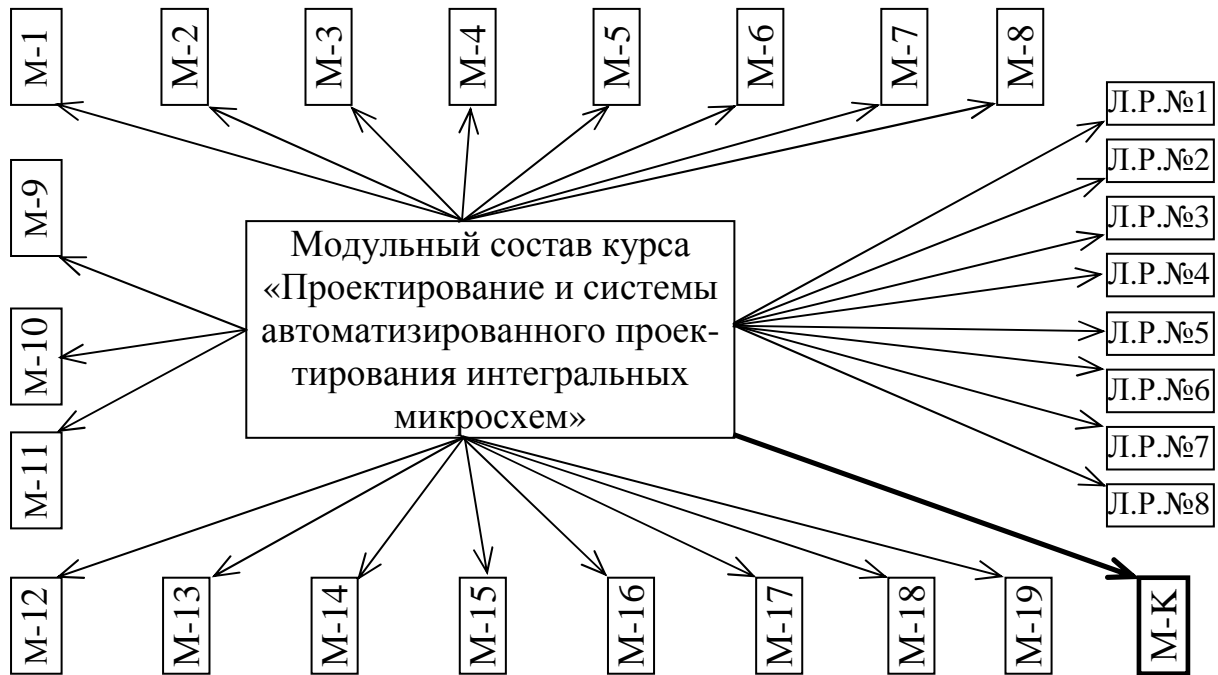
- иметь систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- выполнять самостоятельную творческую работу на лабораторных занятиях;
- активно участвовать в групповых обсуждениях, выступать с самостоятельно подготовленными докладами по тематике учебного курса;
- иметь выраженную способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- показывать полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, в том числе научных публикаций;
- участвовать в работе, проводимой по созданию лабораторной базы по дисциплине.

Студенты, набравшие в течение семестра меньше 1300 баллов, к экзамену не допускаются.

Таблица перевода заработанных студентом баллов в оценку

Количество набранных баллов в течение учебного семестра	Количество баллов, прибавляемых к оценке, полученной при выходном контроле – экзамене
2500 – 2700	6
2200 – 2499	5
2000 – 2199	4
1800 – 1999	3
1500 – 1799	2
1300 – 1499	1

Структура учебного курса



М-1. ПРИНЦИПЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.

М-2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ.

М-3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДИОДЫ.

М-4. ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ МИКРОСХЕМ.

М-5. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС ДРУГ ОТ ДРУГА.

М-6. ЭЛЕМЕНТЫ КОММУТАЦИИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИМС.

М-7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ.

М-8. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ. КМДП-БИС.

М-9. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ИС.

М-10. ПЛИСЫ.

М-11. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УДАЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ – ПОДЛОЖКИ.

М-12. ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.

М-13. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ.

М-14. МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ.

М-15. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ.

М-16. ТОЛСТОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ.

М-17. СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ.

М-18. АНАЛИЗ ОТКАЗОВ МИКРОСХЕМ.

М-19. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.

М-К. Выходной итоговый контроль.

Подробный состав модулей приведен в содержании лекционных занятий.

Микроэлектроника и микросхемотехника

Рабочая программа «Микроэлектроника и микросхемотехника» составлена на основе образовательного стандарта ОСРБ 1-36 04 02-2008 «Промышленная электроника» и в соответствии с типовым учебным планом данной специальности.

Курс является специальной дисциплиной в подготовке инженеров по специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» и входит в блок предметов, связанных с разработкой и проектированием радиотехнических устройств и систем в микроэлектронном исполнении.

Цель преподавания дисциплины

Основной целью изучения дисциплины является приобретение студентами знаний и навыков в области проектирования интегральных схем, изучение закономерностей, достижений и перспективных направлений развития технологии изготовления изделий интегральной техники, получение знаний и навыков в области схемотехнического проектирования.

Задачи изучения дисциплины

Определяются требованиями к подготовке инженеров радиотехнического профиля, включающими:

– овладение принципами конструкторского проектирования интегральных схем и методиками расчета элементов и фрагментов интегральных схем широкого функционального назначения;

- изучение взаимосвязи схемотехнических, функциональных, конструктивных и технологических параметров интегральных схем;
- изучение основных требований к оформлению и приобретению навыков разработки конструкторской и технологической документации на производство интегральных схем;
- овладение физико-химическими основами операционных технологических процессов производства микросхем;
- изучение базовых технологических процессов производства интегральных схем, особенностей применяемого оборудования и материалов;
- овладение принципами схемотехнического проектирования интегральных схем.

Место дисциплины в учебном процессе

Курс является базовым, фундаментальным в подготовке инженеров по специальности 1-36 04 02. На основе курса базируются дисциплины «Методы анализа и расчета электронных схем», «Электронные цепи дискретного действия», «Преобразовательная техника», «Микропроцессорная техника», «Типовые компоненты и датчики контрольно-диагностических средств».

Перечень дисциплин, усвоение которых студентами необходимо для изучения данной дисциплины:

Физика – разделы молекулярной физики и термодинамики, электростатики, электромагнетизма, волновой оптики, элементов атомной физики и квантовой механики, элементов квантовой статистики.

Высшая математика – разделы дифференциального и интегрального исчисления.

Физические основы электронной техники – раздел «Зонная теория твердого тела».

Материалы и компоненты электроники – разделы «Полупроводники», «Проводники», «Диэлектрики», «Магнитные материалы».

Полупроводниковые приборы – принцип действия диодов, биполярных и полевых транзисторов.

В результате освоения курса «Микроэлектроника и микросхемотехника» студент должен

➤ **знать:**

- модели современных операционных усилителей, основные свойства, параметры и типовые схемы их включения;
- устройство и принцип действия перемножителей сигналов;

- особенности проектирования интегральных компараторов сигналов, аналоговых коммутаторов, устройств выборки-хранения информации;
- основы схемотехники стабилизаторов и компараторов напряжений;
- особенности микроэлектронного проектирования ЦАП и АЦП;
- этапы проектирования полупроводниковых, гибридных и совмещенных интегральных схем;
- методики конструктивного расчета элементов и фрагментов ИС широкого функционального назначения;
- взаимосвязь функциональных, конструктивных и технологических параметров ИС;
- основы контроля электрических характеристик элементов ИС;
- методы защиты ИС от воздействия внешних дестабилизирующих факторов;
- основные критерии качества ИС и их взаимосвязь с конструктивно-технологическими параметрами;
- базовые технологические процессы производства интегральных схем;
- пути и перспективы совершенствования технологии ИС;
- **уметь характеризовать:**
 - техническое задание на проектирование ИС и грамотно определять ее конструктивно-технологическое исполнение;
 - достоинства и недостатки различных вариантов конструктивного исполнения элементов и интегральных схем в целом, а также технологических операций и маршрутов их изготовления;
 - оборудование, применяемое в технологических процессах;
- **уметь анализировать:**
 - техническое задание на проектирование ИС и грамотно определять ее конструктивно-технологическое исполнение;
 - результаты исследований и моделирования характеристик ИС;
 - схемы современных операционных усилителей, перемножителей сигналов, интегральных компараторов, аналоговых коммутаторов, устройств выборки-хранения информации, стабилизаторов напряжения, аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей;
- **приобрести навыки:**
 - расчета электрических характеристик и определения параметров электрических моделей элементов интегральных схем;
 - разработки конструкторской и технологической документации на производство интегральных схем.

Содержание дисциплины

Программа рассчитана на объем 218 учебных часов.

Студенты дневной формы обучения изучают дисциплину в течение шестого и седьмого учебных семестров в объеме: 66 часов – лекции, 16 часов – практические занятия, 16 часов – лабораторные занятия. Предусмотрен курсовой проект (7 семестр) в рамках самостоятельной контролируемой работы студентов (60 часов). Итоговый контроль: зачет – 6 семестр, экзамен – 7 семестр.

Студенты заочной формы обучения изучают дисциплину в течение седьмого и восьмого учебных семестров в объеме: 16 часов – лекции, 4 часа – практические занятия, 4 часа – лабораторные занятия. Предусмотрен курсовой проект (7 семестр) в рамках самостоятельной контролируемой работы студентов. Итоговый контроль: зачет – 6 семестр, экзамен – 7 семестр.

Наименование тем лекционных занятий

№	Наименования разделов и тем лекций и их содержание	Число часов	
		Д	З
1	2	3	4
Тема 1. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ, ЭЛЕМЕНТЫ, КОМПОНЕНТЫ			
1	Системо- и схмотехнические направления проектирования РЭА. Основные определения (терминология) в микроэлектронике. Элементы конструкции. Степень интеграции. Классификация ИМС. Система условных обозначений интегральных схем. Разновидности технологии изготовления ИС.	2	2
Тема 2. ПРОЦЕССЫ УДАЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ – ПОДЛОЖКИ			
2	Технологические среды. Технологические жидкости. Чистота технологических жидкостей. Классификация процессов удаления вещества с поверхности твердой фазы. «Мокрые» процессы. «Сухие» методы. Физико-химические процессы, сопровождающие взаимодействие плазменных и ионных потоков с поверхностью твердого тела.	2	
Тема 3. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ			
3	Методы выращивания монокристаллов. Ориентация полупроводниковых монокристаллических слитков. Механическая обработка полупроводниковых пластин. Рентгеновский и оптический методы ориентации. Фигуры травления. Особенности резки полупроводниковых слитков. Резка полупроводниковых пластин на кристаллы. Шлифовка и полировка полупроводниковых пластин.	2	

Продолжение табл.

1	2	3	4
4	Очистка полупроводниковых пластин и подложек. Классификация методов очистки пластин. Сухая обработка пластин. Ионно-плазменное травление. Ионно-лучевое травление. Газовое травление. Плазмохимическое травление. Комплексная очистка полупроводниковых пластин.	2	
5	Диффузионные процессы. Изучение оборудования для проведения технологического процесса диффузии. Способы проведения двухстадийной диффузии. Способ диффузии в открытой трубе. Ампульный способ проведения диффузии. Бокс-метод.	2	2
6	Ионное легирование. Изучение установки и типовых режимов ионного легирования полупроводников. Ионное легирование: применение, достоинства метода, физическая сущность. Механизм образования дефектов при ионном легировании полупроводников. Отжиг дефектов при ионном легировании полупроводников. Принцип действия установки ионного легирования. Магнитная сепарация ионов.	2	2
7	Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых слоев. Изучение технологического оборудования, применяемого для эпитаксии. Особенности эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев. Хемозэпитаксия. Газофазная эпитаксия. Жидкофазная эпитаксия. Оборудование и оснастка для эпитаксии. Способы уменьшения температурных градиентов. Конструкции установок для проведения процесса эпитаксии.	2	2
8	Термическое окисление кремния. Пиролитическое осаждение. Изучение оборудования и режимов техпроцессов. Классификация и особенности методов получения диэлектрических пленок, применяемых в производстве ИМС. Назначение маскирующих, разделительных и пассивирующих диэлектрических слоев. Применение поликристаллического кремния. Методы получения диэлектрических пленок. Термическое окисление кремния. Пиролитическое осаждение SiO_2 . Оборудование техпроцессов.	2	2
9	Фотолитографические процессы в технологии интегральных микросхем. Изучение типового фотолитографического процесса на примере изготовления кристалла СБИС. Процесс фотолитографии. Классификация фоторезистов. Требования, предъявляемые к фоторезистам. Характеристики фоторезистов. Типовой фотолитографический процесс: подготовка пластин, нанесение фоторезиста, сушка фоторезиста, экспонирование, проявление, задубливание, травление.	2	2
Тема 4. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ			
10	Методы получения пленок в технологии гибридных ИМС. Классификация и особенности методов получения пленок в технологии гибридных ИМС. Анодное окисление. Примеры химических реакций. Термовакuumное резистивное испарение.	2	

Продолжение табл.

1	2	3	4
11	Ионно-плазменное окисление. Ионно-плазменное распыление. Метод термовакuumного испарения. Методы получения металлических пленок. Влияние вакуума, остаточных газов и температуры на процесс нанесения пленок.	2	
12	Метод термовакuumного испарения. Изучение оборудования и режимов техпроцесса. Схема установки термовакuumного испарения. Механизм метода. Условия адсорбции частиц. Способы нагрева испаряемого вещества. Параметры технологического процесса термовакuumного испарения. Достоинства и недостатки метода.	2	
Тема 5. ТОЛСТОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ			
13	Подложки толсто пленочных ГИС. Материалы подложек. Требования к подложкам толсто пленочных ГИС. Пасты толсто пленочных ГИС: резистивные, диэлектрические, проводящие. Назначение, характеристики. Последовательность нанесения паст.	2	
14	Схема технологического процесса изготовления гибридных толсто пленочных ИМС. Назначение операций. Особенности нанесения паст в технологии гибридных толсто пленочных ИМС. Устройство для сеткографии. Оборудование и особенности вжигания паст в технологии гибридных толсто пленочных ИМС.	2	
15	Виды монтажа кристаллов ИМС в корпус: присоединение стеклом, присоединение пластмассой, низкотемпературная пайка с применением мягких припоев, эвтектическая пайка. Сборка на гибкой ленте-носителе. Присоединение электродных выводов. Ультразвуковая сварка, термокомпрессионная сварка, микроконтактная сварка, пайка. Беспроволочный монтаж электродных выводов. Метод перевернутого кристалла. Монтаж кристаллов с балочными выводами.	2	
Тема 6. СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ			
16	Герметизация полупроводниковых приборов и ИМС. Методы оценки качества герметичности соединения. Виды герметизации. Оценка качества герметичности соединения. Технология выполнения герметизации кристаллов и элементов микросхем. Формовка зашивкой. Трансферная прессовка.	2	
Тема 7. ПРИНЦИПЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ			
17	Конструкции элементов полупроводниковых ИМС и микропроцессоров на биполярных транзисторах. Способы изоляции элементов интегральных схем. Изоляция элементов обратным смещенным р-п-переходом. Влияние скрытого n^+ слоя на величину напряжения насыщения. Изоляция элементов ИМС с помощью диэлектрического слоя. Вертикальная структура планарного эпитаксиального n^+ -р-п-транзистора. Нормальное включение транзистора с ОБ. Основные режимы работы транзисторов. Инверсное включение. Сопротивление р-п-переходов. Сравнение дискретного транзистора и планарно-эпитаксиального транзистора полупроводниковой микросхемы.	2	2

1	2	3	4
Тема 8. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ			
18	Биполярный транзистор. Особенности биполярного транзистора и назначение его отдельных областей: n^+ – скрытый подколлекторный слой, рабочая зона транзистора, n^+ – контакт к коллектору. Основные конфигурации биполярных транзисторов. Основные характеристики биполярного транзистора: коэффициент усиления по току, коэффициент инжекции, коэффициент переноса, термический коэффициент, напряжение пробоя переходов, частотные характеристики транзисторов (предельная частота коэффициента усиления тока, максимальная частота генерации). Транзисторы с тонкой базой.	2	2
Тема 9. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС ДРУГ ОТ ДРУГА			
19	Изоляция элементов интегральных микросхем. Изоляция обратнo-смещенными р-п-переходами. Достоинства. Изоляция диэлектриком: кремний в диэлектрике (КВД), кремний на диэлектрике (КНД). Технологический процесс. Недостатки изоляции диэлектриком. Комбинированная изоляция. Варианты комбинированной изоляции: изопланарная технология, полипланарная технология. Достоинства комбинированной изоляции.	2	
20	Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом (ПТУП): конструкция, недостатки схем. Принцип действия ПТУП с каналом n-типа. Преимущества ПТУП перед транзисторами МДП-типа. Усилитель-инвертор на основе полевого и биполярного транзисторов.	2	
21	Конструктивно-технологические варианты исполнения биполярного и полевого транзисторов в одном кристалле. Структура, топология, эквивалентная электрическая схема инжекционно-полевого инвертора. ИПЛ-логика с диодами Шотки: структура, топология, эквивалентная электрическая схема.	2	
Тема 10. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ			
22	МДП-транзисторы. Преимущества и недостатки МДП-транзисторов. Характерные эффекты, лежащие в основе принципа действия. Условное обозначение МДП-транзисторов. Конструкция и принцип действия n-канального МДП-транзистора. Р-канальные МДП-транзисторы. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналами.	2	
23	Вспомогательные элементы МДП-микросхем. Охранные кольца, охранные диоды. Включение охранных диодов. Использование МДП транзисторов в качестве резисторов и конденсаторов. Паразитные явления в МДП-структурах. Охранные кольца в структуре инвертора с n- и р- канальными транзисторами.	2	

1	2	3	4
Тема 11. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ			
24	Модели, основные свойства ОУ. Трехкаскадная и двухкаскадная модели ОУ. Свойства идеального ОУ. Обобщенная эквивалентная схема входной и выходной цепей ОУ. Оценка быстродействия ОУ.	2	
25	Характеристики ОУ. Включение ОУ по постоянному току. Амплитудные характеристики ОУ для неинвертирующего и инвертирующего включений. Схемы компенсации разбаланса.	2	
Тема 12. ПЕРЕМНОЖИТЕЛИ СИГНАЛОВ (ПС) И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ			
26	Перемножители сигналов. Основные свойства перемножителей сигналов. Параметры четырехквadrантных ПС. Квадратор на основе ПС. Делитель аналоговых сигналов. Корнеизвлекающее устройство. Типы аналоговых перемножителей сигналов и их отличительные особенности.	2	
27	Балансные модуляторы (БМ). Схема БМ с подавлением гармонических составляющих несущей с помощью ФНЧ. Фазовый демодулятор. Синхронный АМ-демодулятор. Частотный демодулятор. Методы реализации перемножителей сигналов.	2	
Тема 13. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КОМПАРАТОРЫ. АНАЛОГОВЫЕ КОММУТАТОРЫ (АК). УСТРОЙСТВА ВЫБОРКИ-ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ (УВХ)			
28	Интегральные компараторы сигналов. Аналоговые коммутаторы. Основные параметры компараторов. Единый тест для определения качества работы компараторов. Включение двойного дифференциального компаратора К554СА1 по схеме селектора амплитуды. Электронный аналоговый коммутатор. Аналоговый коммутатор тока типа 101КТ1. Упрощенная схема АК типа 284КН1 и характеристика управления ПТ с обедняемым n-каналом. Идеализированная эквивалентная схема АК типа 284КН1. Технические характеристики современных АК.	2	
29	Устройства выборки-хранения информации (УВХ). Назначение УВХ. Принцип действия УВХ. Диаграммы, поясняющие принцип действия УВХ и АЦП. Схема простейшего УВХ. Параметры УВХ. Низкодрейфовое УВХ на двух ОУ. Схема УВХ с компенсацией токов утечки полевых транзисторов. УВХ с повышенным временем хранения информации.	2	
Тема 14. НАЗНАЧЕНИЕ, СХЕМОТЕХНИКА, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТИПОВЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ			
30	Источники опорного напряжения (ИОН). Источник опорного напряжения на биполярных транзисторах. Температурный коэффициент напряжения. Источники опорного напряжения на запрещенной зоне. ИОН на биполярных транзисторах с ОУ и последовательным регулирующим элементом. ИОН с параллельным регулирующим элементом.	2	

Окончание табл.

1	2	3	4
31	Источники тока. Применение источников тока, управляемых напряжением. Источники тока с нагрузкой в цепи обратной связи. Эквивалентная схема источника тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку. Источники тока с заземленной нагрузкой. Схема Хоуланда. Источник тока на цепочке ОУ в инвертирующем включении. Схема токового контура системы управления двигателем постоянного тока. Источники тока для нагрузки, один из полюсов которой имеет постоянный потенциал, отличный от потенциала общей точки. Источники тока с биполярными силовыми транзисторами. Источника тока с делителем в цепи обратной связи.	2	
32	Стабилизаторы напряжения. Базовая схема линейного стабилизатора напряжения. Принцип функционирования. Интегральный линейный стабилизатор напряжения. Выходная характеристика стабилизатора напряжения с защитой от короткого замыкания нагрузки (Z-характеристика). Стабилизация отрицательных напряжений. Стабилизатор двух разнополярных напряжений, симметричных относительно общей точки. Основные параметры линейных стабилизаторов напряжения. Схемы включения линейных стабилизаторов напряжения. Типовое включение. Увеличение выходного напряжения. Стабилизация тока. Источник двухполярного напряжения.	2	
33	Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП). Классификация АЦП. Параллельные АЦП. Параметры АЦП и ЦАП. Анализ погрешностей АЦП.	2	
Всего		66	16

Практические занятия

№	Наименования тем практических занятий и их содержание	Число часов	
		Д	З
1	2	3	4
1	Ионное и магнетронное распыление. Изучение технологического оборудования и режимов проведения техпроцессов. Нанесение пленок методом ионного распыления: классификация, физические явления, сущность методов. Метод реактивного распыления пленок. Магнетронное распыление. Коаксиальная магнетронная система. Планетарная магнетронно-распылительная система.	2	
2	Разновидности биполярных транзисторов. Изучение методики расчета планарно-эпитаксиального n-p-n-транзистора. Типовые параметры транзисторных структур. Многоэмиттерные транзисторы. Конструкция многоэмиттерного транзистора. Схема включения многоэмиттерного транзистора. Топология многоэмиттерного транзистора. Эквивалентная схема включения многоэмиттерного транзистора в схемах ТТЛ. Многоколлекторные транзисторы и их применение в схемах интегральной инжекционной логики. P-n-p-транзистор: конструкция, параметры, достоинства и недостатки. Составные транзисторы. Изопланарный транзистор: стадии формирования, структура, сравнение с планарно-эпитаксиальным транзистором.	2	2

Окончание табл.

1	2	3	4
3	Проектирование интегральных диодов. Конструкции интегральных диодов. Типичные параметры интегральных диодов. Стабилитроны. Температурно-компенсированный стабилитрон. Диоды Шотки. Транзистор с диодом Шотки. Диаграммы распределения концентраций. Емкость диодов. Охранное кольцо.	2	
4	Резисторы ИМС. Расчет диффузионных резисторов. Резистивные материалы. Интегральные резисторы. Диффузионные резисторы. Низкоомные резисторы. Высокоомные резисторы. Меандр. Пинч-резисторы. Ионно-легированные резисторы. Тонкопленочные резисторы. Дискретные микрокомпоненты. Интегральные конденсаторы. Проектирование интегральных конденсаторов. Пленочные индуктивные элементы. Емкость диффузионного конденсатора. Недостатки диффузионного конденсатора. МДП-конденсаторы. Тонкопленочные МДМ-конденсаторы. Микрополосковые линии. Волновое сопротивление МПЛ. Пленочные индуктивные элементы. Применение пассивных элементов. Особенности интеграции устройств диапазона СВЧ.	2	2
5	Вспомогательные элементы ИМС. Металлизированная разводка. Элементы коммутации в ИМС: материал контакта, подслои. Коммутационные проводники. Недостатки алюминиевой разводки. Многоуровневая и многослойная разводка, требования к ней. Примеры многослойной разводки. Контактные площадки. Вспомогательные элементы ИМС: фигуры совмещения, ключ, тестовые элементы.	2	
6	Проектирование МДП-транзисторов. Конструктивные параметры. Электрофизические параметры. Концентрация поверхностных состояний. Материалы затвора и подзатворного диэлектрика. Стоко-затворные характеристики n-канального транзистора. Крутизна. Пороговое напряжение и методы его снижения. Быстродействие МДП-транзисторов.	2	
7	Топология микросхемы. Основные правила проектирования. Этапы разработки чертежа топологии. Соотношение размеров областей транзистора со стандартным размером. Основные правила проектирования топологии интегральных ИМС.	2	
8	Изучение типовых схем включения операционных усилителей. Инвертирующее, неинвертирующее и дифференциальное включения ОУ. Эквивалентные схемы. Основные параметры. Схема повторителя напряжения. Компаратор на основе ОУ и протекающие в нем процессы. Классификация типов операционных усилителей. Меры предосторожности и полезные советы при использовании операционных усилителей.	2	
	Всего	16	4

Лабораторные работы

№	Наименование лабораторной работы	Число часов	
		Д (П)	З (С)
1	Изучение основных нормативных документов, регламентирующих процесс производства микросхем	2	
2	Изучение технологического процесса нанесения тонких пленок методом термовакuumного напыления (установка УВН-7Ш-3)	2	
3	Конструкции и расчет полупроводниковых резисторов	2	2
4	Исследование моделей технологических процессов термического окисления кремния	2	
5	Изучение маршрутной технологии производства кристаллов СБИС	2	2
6	Изучение методов получения тонких пленок (установка ВУП-2К)	2	
7	Технология разделения пластин и подложек на кристаллы	2	
8	Технология монтажа кристаллов	2	
Всего		16	4

Курсовое проектирование

Курсовой проект выполняется в течение седьмого семестра. На выполнение курсового проекта студенту отводится 60 часов. Основная задача проектирования заключается в самостоятельной разработке студентом конструкции и технологии изготовления ИМС. Тема курсового проекта: «Разработать конструкцию и технологию изготовления полупроводниковой микросхемы».

Примерный перечень разделов курсового проекта:

Введение.

1. Анализ исходных данных и формирование расширенного технического задания на проектирование.

2. Выбор и обоснование применяемых материалов и компонентов конструкции.

3. Конструкторские расчеты.

4. Разработка топологии микросхемы.

5. Разработка технологии изготовления микросхемы.

6. Сборка микросхемы.

Заключение.

Список использованных литературных источников.

Приложения.

Перечень графического материала:

1. Схема электрическая принципиальная микросхемы (с перечнем элементов).
2. Кристалл. Топологический чертеж общего вида. Комплект фотошаблонов.
3. Сборочный чертеж микросхемы. Спецификация.

График опрентовок курсового проектирования

Раздел курсовой работы	Время, отводимое на выполнение, ч	Процент товка (№ недели)
Введение. Формирование расширенного технического задания на проектирование микросхемы.	3	2
Выбор и обоснование конструктивных материалов для изготовления микросхемы.	3	3
Выбор и обоснование технологических материалов для изготовления микросхемы.	3	4
Конструктивные расчеты пассивных элементов микросхемы: резисторы, конденсаторы.	3	5
Конструктивные расчеты активных элементов микросхемы: транзисторы, диоды	6	6
Разработка топологического рисунка проектируемой микросхемы. Конструктивные и технологические ограничения.	6	8
Разработка технологического процесса изготовления микросхемы.	3	9
Выбор технологического оборудования и режимов.	6	10
Разработка корпуса интегральной микросхемы. Присоединение кристалла или платы. Герметизация.	3	11
Разработка чертежа схемы электрической принципиальной микросхемы и перечня элементов.	3	12
Разработка чертежа кристалла или платы.	3	13
Разработка комплекта фотошаблонов.	13,5	14
Разработка сборочного чертежа микросхемы и спецификации.	4,5	15
Всего	60	

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Для изучения дисциплины «Микроэлектроника и микросхемотехника» предлагается модульная система. Весь материал разбит на четырнадцать тематических модулей, причем каждый модуль в своем составе

содержит определенное количество УЭ. Каждый УЭ рассчитан на 2 учебных часа лекционных занятий и самостоятельную работу студентов. УЭ, содержащие лабораторные работы по дисциплине, рассчитаны на два аудиторных часа.

В конце каждого модуля имеется УЭ контроля, представляющий набор вопросов, заданий или упражнений, которые необходимо выполнить после изучения модуля. Когда студент будет уверен, что он получил достаточные знания, умения и навыки, ему необходимо пройти собеседование у преподавателя или выполнить выходной тест – в зависимости от вида УЭ контроля. При неудачном прохождении УЭ контроля студенту необходимо изучить данный модуль более полно.

Оценка знаний

Общая оценка, получаемая в результате изучения дисциплины «Микросхемотехника», формируется из двух составляющих: 70 процентов – в процессе учебного семестра, 30 процентов – в результате выходного итогового контроля – экзамена. Полное знание материала каждого учебного элемента максимально оценивается в 100 баллов. Таким образом, максимальное количество баллов, которое студент может заработать в процессе семестра, составляет 2200 (1400 за теоретический материал (14 УЭ) и 800 – за лабораторные работы). Исходя из этого, ниже в таблице приведено количество баллов, по которым выставляется оценка, полученная в процессе учебного семестра и прибавляемая к оценке, полученной при выходном контроле – экзамене.

Для получения итоговой 10-балльной оценки по дисциплине (включая 6 баллов, полученных в процессе семестра, и максимальное количество баллов на экзамене – 3) студент должен:

- иметь систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- выполнять самостоятельную творческую работу на лабораторных занятиях;
- активно участвовать в групповых обсуждениях, выступать с самостоятельно подготовленными докладами по тематике учебного курса;
- иметь выраженную способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;

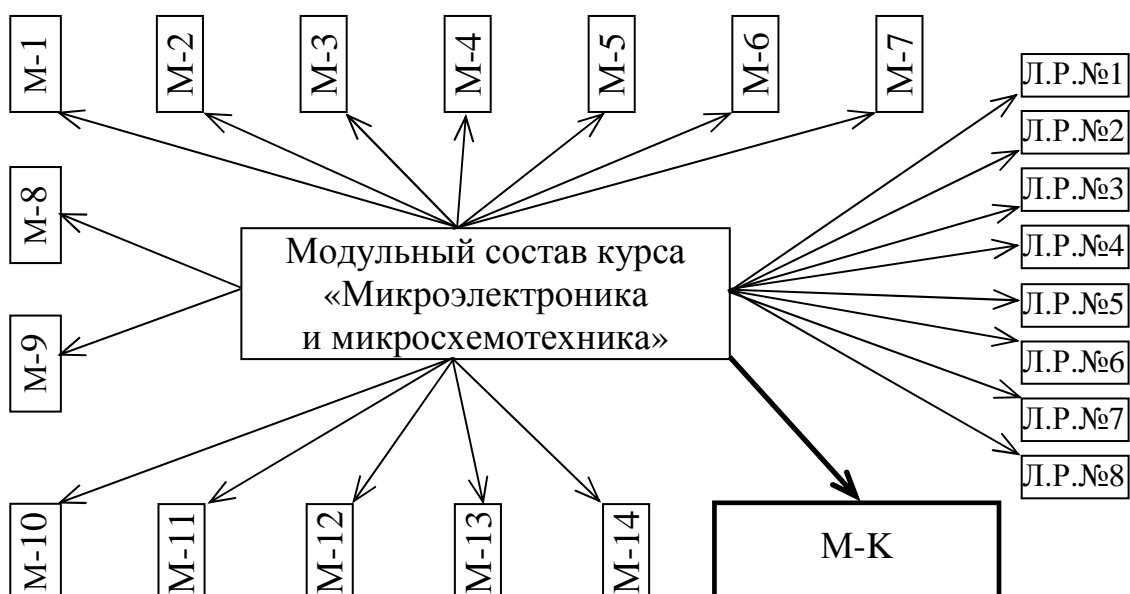
- показывать полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, в том числе научных публикаций;
- участвовать в работе, проводимой по созданию лабораторной базы по дисциплине.

Студенты, набравшие в течение семестра меньше 1000 баллов, к экзамену не допускаются.

Таблица перевода заработанных студентом баллов в оценку

Количество набранных баллов в течение учебного семестра	Количество баллов, прибавляемых к оценке, полученной при выходном контроле – экзамене
2000 – 2200	6
1900 – 1999	5
1700 – 1899	4
1400 – 1699	3
1200 – 1399	2
1000 – 1199	1

Структура учебного курса



М-1. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ, ЭЛЕМЕНТЫ, КОМПОНЕНТЫ.

М-2. ПРОЦЕССЫ УДАЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ – ПОДЛОЖКИ.

М-3. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ.

М-4. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ.

М-5. ТОЛСТОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ.

М-6. СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ.

М-7. ПРИНЦИПЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.

М-8. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ.

М-9. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС ДРУГ ОТ ДРУГА.

М-10. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ.

М-11. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ.

М-12. ПЕРЕМНОЖИТЕЛИ СИГНАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.

М-13. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КОМПАРАТОРЫ. АНАЛОГОВЫЕ КОММУТАТОРЫ. УСТРОЙСТВА ВЫБОРКИ-ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ.

М-14. НАЗНАЧЕНИЕ, СХЕМОТЕХНИКА, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТИПОВЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ.

М-К. Выходной итоговый контроль.

Подробный состав модулей приведен в содержании лекционных занятий.

ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от типа структуры ИМС и конструкции корпуса общее количество операций технологического процесса ее изготовления может достигать 200. Процесс охватывает разнообразные по физическим принципам, методам контроля и технологическому оснащению методы обработки, причем характер связей между отдельными операциями во времени и пространстве также весьма различен. Таким образом, процесс производства ИМС представляет собой систему, оптимальная организация которой имеет первостепенное значение для ее эффективного функционирования. Изменения в процессе производства, связанные, например, с изменением структуры ИМС, увеличением диаметра полупроводниковых пластин, увеличением выхода годных ИМС, изменением объема выпуска ИМС и т.д., различным образом влияют на отдельные стадии производства ИМС. При этом с учетом непрерывного прогресса микроэлектроники организация производства ИМС по предметно-замкнутому принципу не является эффективной даже в условиях массового производства.

По своему назначению и месту, занимаемому в общем процессе производства ИМС, все операции объединяются в самостоятельные (частные) технологические процессы, которые, в свою очередь, могут быть подразделены на три группы (рис. 1).

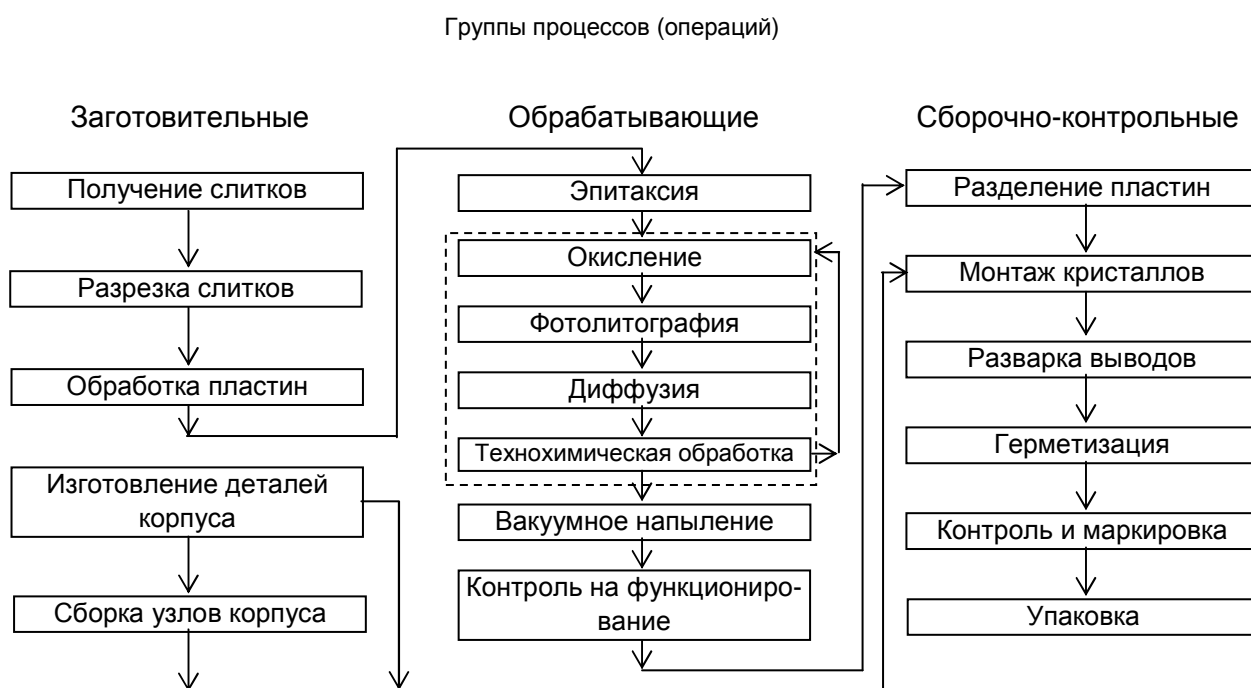


Рис. 1. Классификация частных технологических процессов производства полупроводниковых ИМС

Первая группа включает *заготовительные процессы*, имеющие целью получение монокристаллических полупроводниковых слитков определенного типа электропроводности и заданного удельного сопротивления, резку слитков

на пластины, обработку их поверхностей с заданной микро- и макрогеометрией, а также качеством поверхностного слоя, изготовление отдельных деталей и узлов корпуса ИМС.

Вторая группа процессов – *обрабатывающая* – объединяет все операции, необходимые для формирования структур ИМС в групповых пластинах и их контроля на функционирование. Сюда входят процессы окисления, диффузии примесей, эпитаксии, ионной имплантации, вакуумного напыления, фотолитографии, теххимической обработки.

В третью группу процессов – *сборочно-контрольную* входят разделение групповой пластины на отдельные кристаллы, монтаж кристаллов в корпусах, разварка выводов, герметизация, контроль и классификация, механические и климатические испытания, окраска, маркировка и упаковка.

Из схемы видно, что первая группа процессов является обеспечивающей для процессов второй и третьей групп и по своему характеру близка к приборостроительному производству. Специфичность методов обработки и оборудования этой группы, а также независимость их от конкретной структуры ИМС делает целесообразным передачу заготовительных процессов специализированным предприятиям, связанным с предприятиями, составляющими вторую и третью группы процессов, по линии кооперации.

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

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

- 1) взаимосвязь производственных участков, обусловленная цикличностью технологического процесса (групповые пластины многократно возвращаются на участки для формирования очередного слоя);
- 2) ограниченное время межоперационного хранения групповых пластин;
- 3) высокие требования к производственной гигиене (1 – 2-й классы помещений по климатическим параметрам и 1 – 2-й классы по запыленности воздушной среды).

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

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

1.1. Подготовительные операции

1.1.1. Методы выращивания монокристаллов

Получение монокристаллов полупроводниковых и целого ряда других материалов, используемых в электронной технике, осуществляют в основном методами, разделяемыми на две группы:

- кристаллизация из расплава;
- кристаллизация из газовой фазы.

Методы выращивания из расплава монокристаллов элементарных и сложных веществ обеспечивают высокую скорость роста и хорошую воспроизводимость свойств.

На формирование монокристалла из расплава существенное влияние оказывает форма фронта кристаллизации, так как рост кристалла всегда происходит в направлении, перпендикулярном к фронту кристаллизации. Форма фронта кристаллизации зависит от способов нагрева и отвода тепла от расплава и растущего монокристалла. Если тепло отводится с периферийной части кристалла, то фронт кристаллизации может иметь вогнутую форму. Это наблюдается при выращивании монокристаллов непосредственно в контейнере, например, по методу направленной кристаллизации. При вытягивании кристалла из расплава тепло отводится через растущий кристалл и фронт кристаллизации может иметь выпуклую форму. В обоих случаях в кристалле будут возникать дополнительные напряжения, однако выпуклый фронт более предпочтителен, так как в этом случае увеличивается вероятность исчезновения в процессе роста побочных центров кристаллизации.

Следует учитывать, что практически в любом расплаве присутствуют примеси, а реальные процессы кристаллизации всегда связаны с относительно большими скоростями роста, так, что равновесие между расплавом и растущим кристаллом не успевает устанавливаться, то есть отесняемая от фронта кристаллизации примесь не успевает равномерно распределяться по расплаву и накапливается вблизи фронта кристаллизации.

Выращивание монокристаллов может осуществляться как с монокристаллической затравкой, так и без нее. В этом случае используют капилляр, который способствует развитию кристаллического зародыша в одном направлении.

Существуют следующие методы выращивания монокристаллов из расплава:

- 1) направленная кристаллизация в контейнере;
- 2) вытягивание кристалла из расплава;
- 3) рост кристалла на «пьедестале».

Процесс может осуществляться в инертной среде, в вакууме или в атмосфере какого-либо газа, если данное вещество частично разлагается с выделением газообразного компонента. Рассмотрим наиболее распространенный метод выращивания монокристаллов – кристаллизацию из расплавов (рис. 1.1).

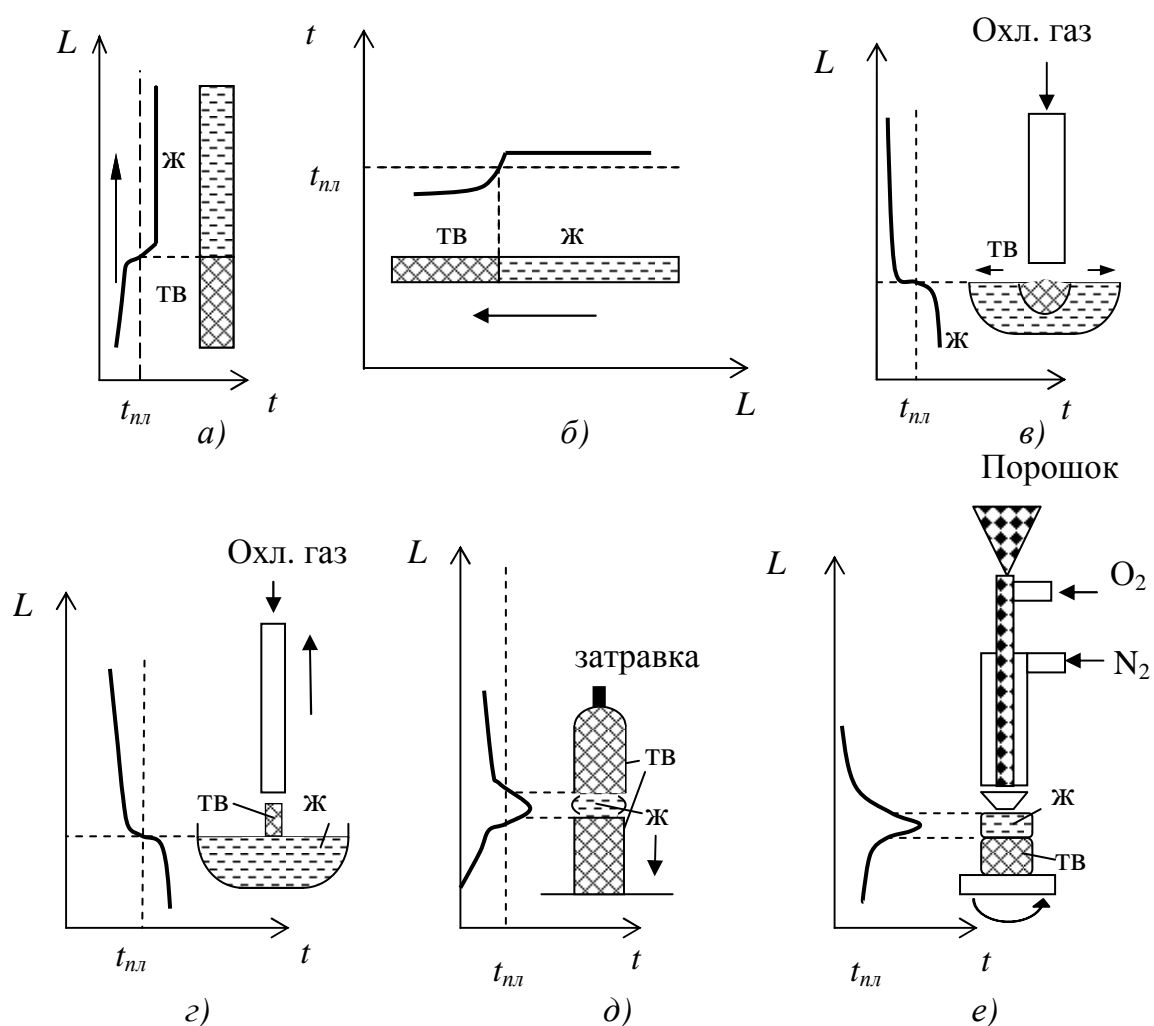


Рис. 1.1. Схематическое изображение методов выращивания монокристаллов: направленная кристаллизация в вертикальном (а) и горизонтальном (б, в) контейнерах; вытягивание монокристалла из расплава (г); выращивание на «пьедестале» по методу Хорна (д) и Вернейля (е)

Направленная кристаллизация чаще всего осуществляется в контейнере вертикальной или горизонтальной формы, причем расплав затвердевает постепенно от одного конца контейнера к другому (см. рис. 1.1, *а*, *б*). Выращивание монокристалла этим методом обычно совмещают с его очисткой. Рассмотрим некоторые из вариантов направленной кристаллизации.

По методу Шубникова (1924 г.) используется вертикальный контейнер (см. рис. 1.1, *а*), причем он имеет на конце капилляр для образования зародыша. Печь с температурным градиентом перемещается относительно контейнера.

Горизонтальный вариант направленной кристаллизации по методу Бриджмена (1925 г.) предусматривает использование контейнера, имеющего коническую верхушку, что способствует образованию зародыша. В этом случае контейнер перемещается относительно печи.

Метод Стокбакера (1939 г.) аналогичен методу Бриджмена, только в этом случае используются две печи, между которыми устанавливается металлический тепловой экран для увеличения температурного градиента, что способствует диффузионному оттеснению примесей вглубь расплава и улучшает условия очистки выращиваемого монокристалла.

В методе Капицы (1928 г.) используется горизонтальный вариант направленной кристаллизации (см. рис. 1.1, *б*) с монокристаллической затравкой на коническом конце. В принципе, этот метод аналогичен методу Бриджмена. Выбор вертикального или горизонтального варианта направленной кристаллизации обусловлен разницей в плотностях расплава и твердой фазы данного вещества. Если плотность твердой фазы меньше, что наблюдается, например, для кремния и других алмазоподобных полупроводников, то для избежания всплывания кристалла используют горизонтальный вариант.

Метод Киропулоса (1926 г.) в основном используется для выращивания монокристаллов большого диаметра (см. рис. 1.1, *в*). Затвердевание расплава осуществляется в контейнере за счет отвода тепла через точечный контакт расплава с охлаждаемым «пальцем» с затравкой, который вводится в поверхностную часть расплава в середину контейнера, имеющего небольшую глубину. Отвод тепла в этом варианте направленной кристаллизации осуществляется через растущий кристалл, что делает профиль фронта кристаллизации выпуклым (что более предпочтительно).

Во всех случаях направленной кристаллизации, кроме метода Киропулоса, отвод тепла осуществляется через периферийную часть, делая фронт кристаллизации вогнутым, то есть менее предпочтительным для роста монокристалла.

Метод зонной плавки (перекристаллизации). В некоторых случаях в технологии полупроводниковых материалов монокристаллы выращивают методом зонной плавки. Достоинством метода является совмещение процесса глубокой очистки полупроводника с последующим выращиванием его монокристалла. В технологии полупроводниковых соединений применение этого метода позволяет совместить в одном технологическом цикле сразу три операции: синтез, очистку синтезированного соединения и выращивание его монокристалла. Проведение операций в герметичных реакторах дает возможность путем регулирования давления пара летучего компонента над расплавом получать монокристаллы определенного стехиометрического состава или с любым отклонением от него.

В связи с различной растворимостью примесей в твердой и жидкой фазах зонная плавка является одним из наиболее эффективных и производительных методов глубокой очистки монокристаллов. Перед началом кристаллизации расплавляется не вся твердая фаза кристалла, а только узкая зона, которую перемещают вдоль кристалла. Различают вертикальную (ВЗП) и горизонтальную (ГЗП) зонные плавки.

Большинство примесей обладает хорошей растворимостью в жидкой фазе (по сравнению с твердой). Поэтому по мере продвижения зона плавления все больше насыщается примесями, которые скапливаются на конце слитка. Обычно процесс зонной плавки повторяют несколько раз, по окончании очистки загрязненный конец слитка отрезают.

Для ускорения процесса очистки вдоль контейнера ставят несколько индукторов для образования ряда зон плавления (рис. 1.2).

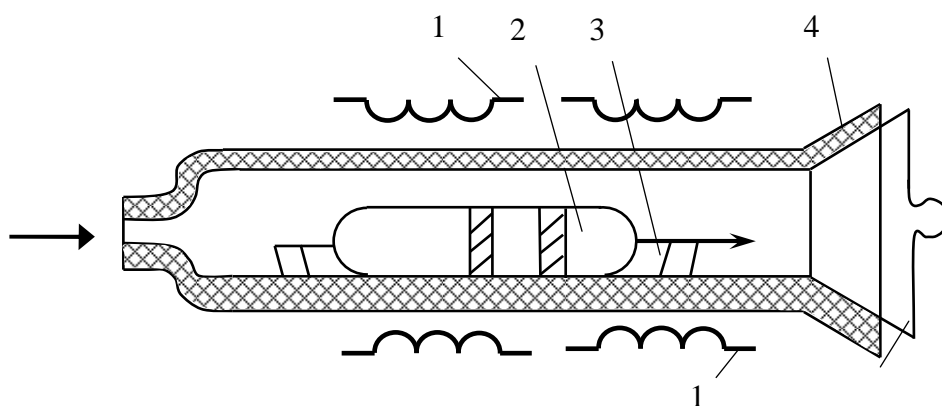


Рис. 1.2. Схема установки для очистки германия зонной плавкой:
 1 – нагреватели; 2 – слиток германия; 3 – лодочка; 4 – кварцевая труба;
 5 – шлиф с патрубком для выхода газов

Теоретически многократная зонная плавка позволяет очень глубоко очистить исходный материал, например, можно получить 50 % очищаемого слитка с концентрацией остаточной примеси менее 10^6 см^{-3} . Однако на практике такого результата достичь невозможно, так как одновременно с очисткой и увеличением числа проходов расплав загрязняется примесями из контейнера и окружающей среды.

Рассмотрим метод бестигельной зонной плавки (БЗП). В основном он применяется для получения монокристаллов кремния. Из-за отсутствия тигля при выращивании кристалла одновременно происходит и его очистка, так как примеси оттесняются в конец кристалла, благодаря чему кристаллы становятся значительно чище, чем выращиваемые методом Чохральского. Для повышения степени очистки используют неоднократное перемещение зоны.

Скорость выращивания кристалла методом БЗП вдвое больше, чем по методу Чохральского, и в отличие от него затравка подводится снизу. Растущий кристалл «висит» на исходном поликристалле, откуда он вытягивается вниз от зоны расплава (рис. 1.3). Для обеспечения начального роста бездислокационного участка кристалла также проводится вытягивание «тонкой шейки» диаметром 2...3 мм и длиной 10...20 мм и более, после чего кристалл доращивают до требуемого диаметра через коническую часть.

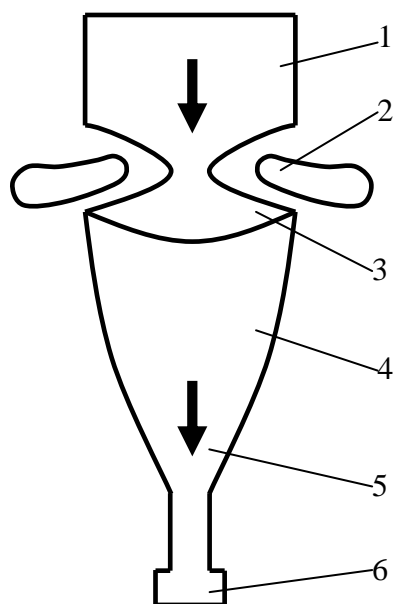


Рис. 1.3. Схема выращивания кристаллов методом бестигельной зонной плавки:
1 – поликристаллический стержень; 2 – индуктор в форме игольного ушка;
3 – расплавленная зона; 4 – бездислокационный монокристалл; 5 – «тонкая шейка»;
6 – затравка

Современная технология БЗП кремния (рис. 1.4) позволяет выращивать монокристаллы диаметром до 125 мм благодаря использованию индуктора, диаметр которого меньше диаметра проплавляемого стержня (рис. 1.5).

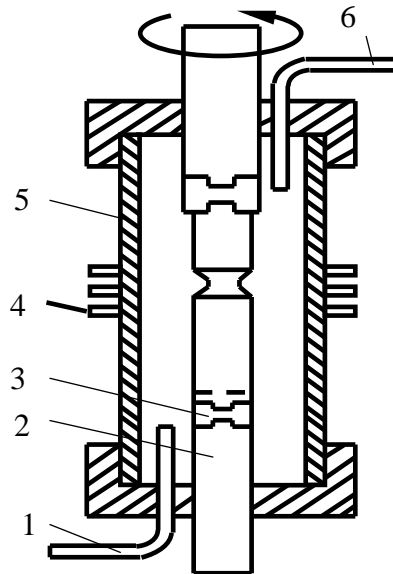


Рис. 1.4. Схема установки для бестигельной зонной плавки кремния:
1 – подача аргона; 2 – металлический держатель; 3 – кварцевый стержень;
4 – высокочастотный индуктор; 5 – кварцевый цилиндр; 6 – выход аргона

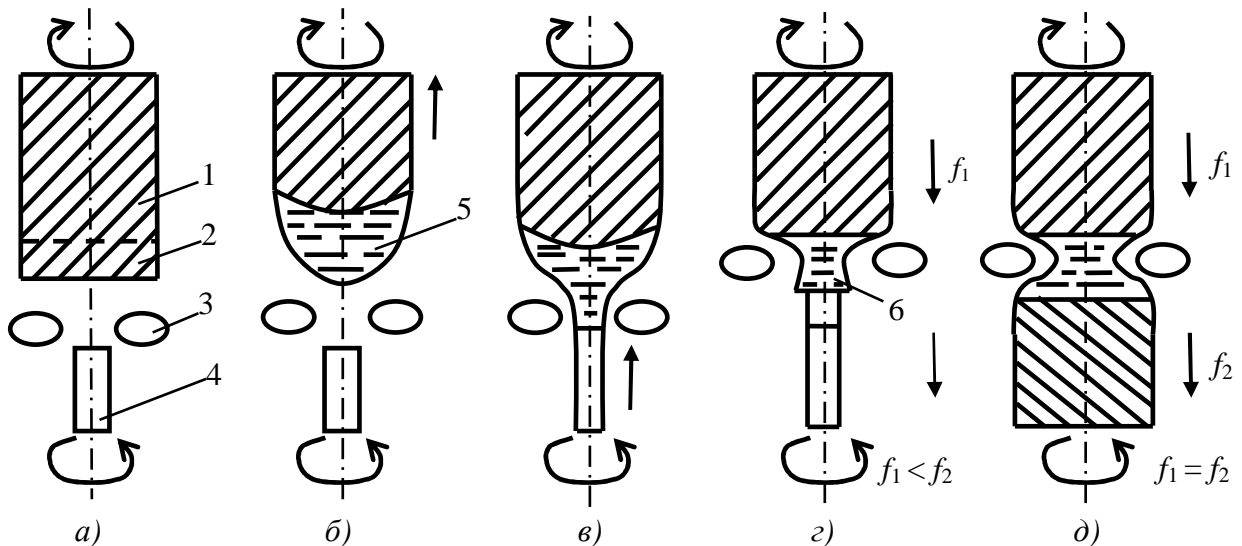


Рис. 1.5. Этапы процесса бестигельной зонной плавки кремния с высокочастотным индуктором, диаметр которого меньше диаметра расплавляемого стержня (f_1 и f_2 – скорости движения стержня и затравки соответственно):
а – разогрев торца кремниевого стержня; б – образование висячей капли расплавленного кремния; в – момент затравливания; г – начальная стадия образования расплавленной зоны; д – проведение процесса в установившемся режиме;
1 – стержень; 2 – разогретая зона стержня; 3 – высокочастотный индуктор;
4 – монокристаллическая затравка; 5 – капля расплава; 6 – расплавленная зона

Основным условием успешного проведения БЗП является создание и поддержание стабильной расплавленной зоны. Во всех современных системах зонной плавки используется стационарное положение катушки, а поликристаллический стержень и растущий кристалл перемещаются.

Следует, однако, отметить, что очистка кремния от примесей бора, влияние которого на свойства кремния велико, методом БЗП малоэффективна.

Вытягивание монокристалла из расплава было впервые использовано Нансеном в 1915 г. Для выращивания монокристалла он использовал монокристаллическую затравку, которая укреплялась на охлаждаемом вертикальном штоке, с малой скоростью перемещающемся вверх.

Метод Чохральского (1918 г.) – один из наиболее распространенных методов выращивания полупроводниковых кристаллов (см. рис. 1.1, *з*). Он является дальнейшим совершенствованием метода Нансена. В этом методе может использоваться как готовая монокристаллическая затравка, так и затравка, выращенная в капилляре, укрепленном на конце охлаждаемого вертикального пальца, который еще и вращается вокруг оси. Вращение кристалла при вытягивании из расплава улучшает условия кристаллизации и очистки монокристалла от примесей за счет лучшего перемешивания расплава вблизи фронта кристаллизации. Для разлагающихся соединений, например полупроводников группы $A^{III}B^V$, процесс проводят в запаянной ампуле. Вытягивание монокристалла осуществляют перемещением внешнего магнита вдоль камеры выращивания. Такой процесс требует использования повышенного давления легколетучего компонента и используется сравнительно редко.

Выращивание монокристаллов на «пьедестале» по методу Хорна (1952 г.) (см. рис. 1.1, *д*) осуществляется следующим образом. Поликристаллическая заготовка, выполняемая чаще всего обычным прессованием порошкообразного исходного сырья, помещается в печь с перемещающейся (плавающей) зоной. В расплавленную часть (зону) вводится монокристаллическая затравка. Готовый монокристалл образуется посредством медленного перемещения расплавленной зоны вдоль прессованной заготовки. Иногда его просто вытягивают из расплавленной части, которая медленно перемещается в обратном направлении. По сути, это комбинация методов вытягивания из расплава и зонной плавки.

По методу Вернейля (1902 г.) исходный порошкообразный материал подается в пламя горелки с температурой выше его температуры плавления, например, водородной, где расплавляется. Расплав кристаллизуется на готовой затравке, которая помещается на тугоплавкий пьедестал и враща-

ется (см. рис. 1.1, *e*). Пламя горелки регулируют так, что в верхней части вещество остается в расплавленном состоянии и сцепляется с остальной частью благодаря поверхностному натяжению. Этот метод используется для выращивания монокристаллов оксидов с высокой температурой плавления, например, Al_2O_3 , ZrO_2 и др. Его существенным недостатком является трудность получения монокристалла большого диаметра и постоянного сечения.

1.1.2. Подготовка и разрезание полупроводникового слитка на пластины

Рассмотрим схему подготовки к разрезанию полупроводникового слитка на пластины.

Слитки калибруют (шлифуют) по диаметру в связи с тем, что после выращивания они могут иметь конусность и волнистость цилиндрической поверхности, а также отклонения диаметра, превышающие допустимые значения (для диаметра 100 мм $\pm 0,5$ мм).

Перед шлифованием к торцу слитка 4 наклеивают мастику 3 и приклеивают центры 2 (рис. 1.6). При этом необходимо выдерживать соосность слитка и линии центров 1, чтобы припуск на обработку был равномерно распределен по окружности сечения слитка.

Шлифование выполняют по наружному диаметру на универсальных круглошлифовальных станках, снабженных алмазным шлифовальным кругом с зернистостью 50/40 (основная фракция 40 мкм, а количество крупной, размером 50 мкм, не более 15 %). Режимы обработки слитка: частота вращения шлифовального круга – 2500 ± 500 об/мин, частота вращения шпинделя передней бабки – 350 ± 50 об/мин, скорость перемещения стола – 2 – 4 м/мин, радиальная подача шлифовального круга – 0,005 – 0,02 мм/дв. ход.

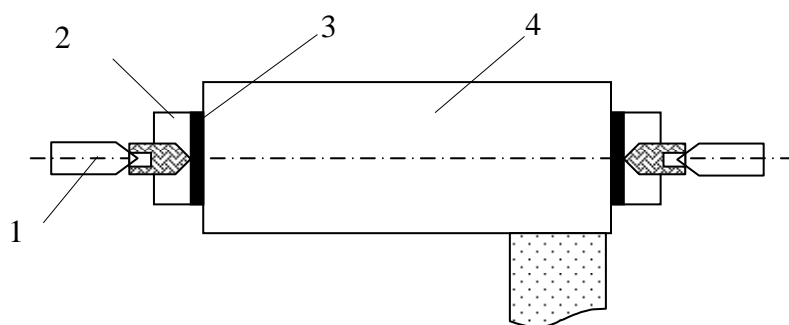


Рис. 1.6. Шлифование слитков:
1 – линия центров; 2 – центры; 3 – мастика; 4 – слиток

При шлифовании по диаметру слиток охлаждают водой или специальной жидкостью для отвода тепла из зоны шлифования.

После калибрования слитка центры отклеивают и подшлифовывают торцы слитка, подготавливая его для ориентации.

Для определения кристаллографического направления, вдоль которого должен быть расположен базовый срез, а также значения и направления отклонения плоскости торца слитка от заданной кристаллографической плоскости используют либо рентгеновский дифрактометрический метод, либо оптический метод ориентации.

Рентгеновский метод основан на особенности отражения падающих рентгеновских лучей плоскостями кристаллической решетки: угол падения пучка параллельных монохроматических рентгеновских лучей равен углу отражения их от любой кристаллографической плоскости (условие Вульфа – Брэгга):

$$n\lambda = 2d \sin\beta, \quad (1.1)$$

где λ – длина волны; n – целое число, равное 1, 2, ... и т.д. (обычно $n = 1$); d – межплоскостное расстояние; β – угол отражения.

При ориентировании слитков, торец которого перпендикулярен к продольной оси, помещают на предметный столик рентгеновской установки (рис. 1.7).

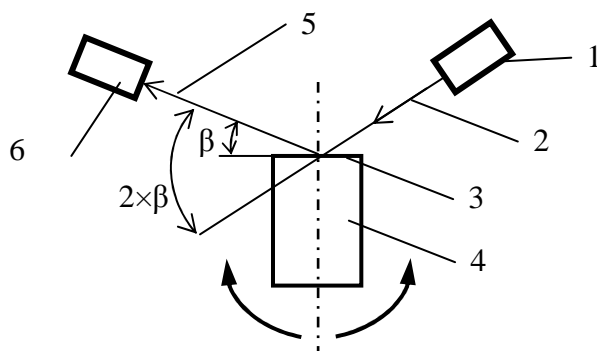


Рис. 1.7. Ориентация слитка рентгеновским методом:
1 – рентгеновская трубка; 2, 5 – падающий и отраженный рентгеновские лучи;
3 – торец слитка; 4 – слиток; 6 – приемник излучения

Пучок рентгеновских лучей 2, выходящих из трубки 1, должен быть направлен к торцу 3 слитка 4 под углом β , равным углу отражения от соответствующей кристаллографической плоскости (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Углы отражения рентгеновских лучей при ориентировании слитков кремния и германия

Полупроводниковый материал	Угол отражения для плоскостей		
	(111)	(110)	(100)
Кремний	17°56'	30°12'	45°23'
Германий	17°14'	28°56'	43°10'

Приемник 6 (счетчик Гейгера), фиксирующий отраженные лучи 5, устанавливают под углом 2β к плоскости падения рентгеновских лучей. Развернув предметный столик со слитком относительно вертикальной оси, находят такое положение, при котором приемник 6 фиксирует максимальную интенсивность отраженных лучей (рентгеновские установки УРС-50И, ДРОН-2, ДРОН-3). Угол между новым и исходным положениями торца 3 слитка является углом его ориентации, его указывают в сопроводительном листе на слиток.

Оптический метод ориентации состоит в следующем. Торцы слитка полупроводника полируют, затем обрабатывают в селективном травителе. Вследствие различных скоростей травления в разных кристаллографических направлениях на его поверхности появляются фигуры травления (рис. 1.8), которые можно наблюдать на специальных оптических установках.

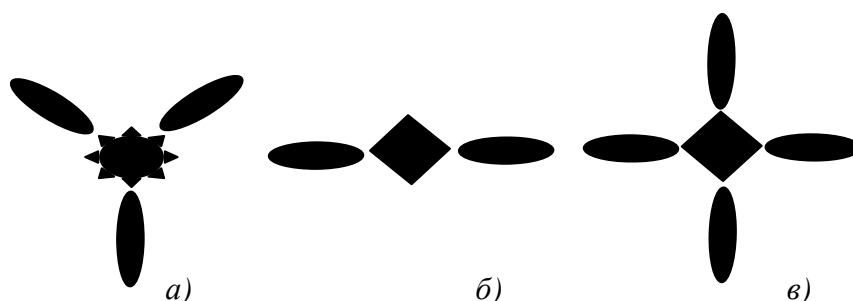


Рис. 1.8. Фигуры, получаемые при отражении светового луча от кристаллографических плоскостей: *a* – (111); *б* – (110); *в* – (100)

В зависимости от степени отклонения кристаллографической плоскости торца фигура будет находиться дальше от центра экрана или ближе к нему. По положению световой фигуры – рефлексограмме – определяют ориентацию заданной плоскости по формуле

$$\operatorname{tg} 2\alpha = d/l, \quad (1.2)$$

где 2α – угол ориентации; d – смещение центра световой фигуры относительно центра экрана; l – расстояние от экрана до образца.

Изготовление базового среза осуществляют путем шлифования по всей длине слитка на плоскошлифовальных станках алмазным шлифовальным кругом зернистостью АСМ50/40. Слиток закрепляют в специальном зажимном приспособлении, чтобы отметка ориентации среза располагалась параллельно базовой плоскости приспособления. Приспособление устанавливают на металлическом столе станка (тип 9927 или ЗГ71).

В зону шлифования подают охлаждающую жидкость. Ширину среза контролируют миллиметровой линейкой.

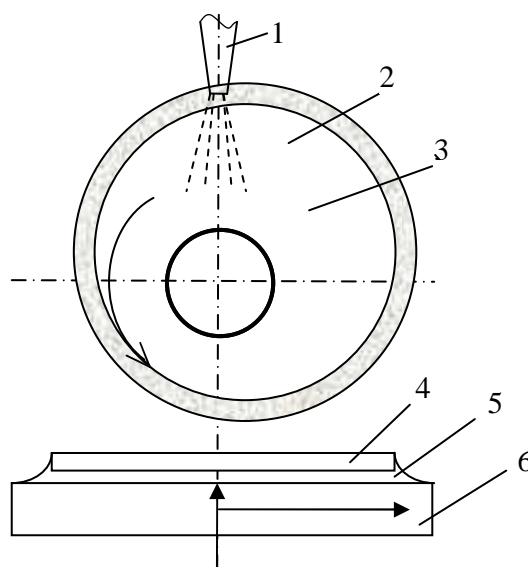
Перед разрезанием слитка на пластины производят его ориентированное наклеивание. Монокристаллический слиток торцевой или цилиндрической поверхностью приклеивают наклейной мастикой к основанию или подложке в специальной оправке и вместе с ней устанавливают на держатель, расположенный на станке. При резке слитков больших диаметров их наклеивают торцевой и цилиндрической поверхностями одновременно.

Для ориентированной резки поворачивают оправу со слитком в горизонтальной и вертикальной плоскостях на угол разориентации.

Рассмотрим процесс разрезания слитка на пластины. Его сущность заключается в механическом воздействии более твердого и менее хрупкого абразива на менее твердый и более хрупкий материал. С помощью абразивной резки можно разделять пластины и подложки практически из любых материалов.

Резка дисками с внешней (рис. 1.9) и внутренней (рис. 1.10) режущими кромками широко применяется в промышленном производстве для сквозного разделения пластин и для получения рисок.

Рис. 1.9. Схема резки диском с внешней алмазосодержащей режущей кромкой:
 1 – сопло подачи ОЖ;
 2 – режущая кромка диска;
 3 – основа диска; 4 – разрезаемая пластина;
 5 – клеящий материал;
 6 – оправка для закрепления пластины



Инструмент представляет собой тонкий (от 0,1 до 0,15 мм) металлический диск (основа) с центральным отверстием, на кромку которого гальваническим способом нанесен алмазный слой с никелевой связкой. Алмазные зерна имеют размеры 40 – 60 мкм при резке кремния и 20 – 40 мкм при резке арсенида галлия.

Диск закрепляется на шпинделе станка своей центральной частью, что не обеспечивает его высокой жесткости. Жесткость режущей кромки обеспечивается конструкцией диска. Режущая кромка выступает за наруж-

ный диаметр прижимных фланцев не более чем на 1,5 глубины резания. Минимальная толщина кромки при резке пластин кремния – 36 мкм, а минимальная ширина реза кремния составляет 40 мкм. Глубина рисок выполняется не менее $\frac{2}{3}$ от толщины пластины, что обеспечивает оптимальное разламывание.

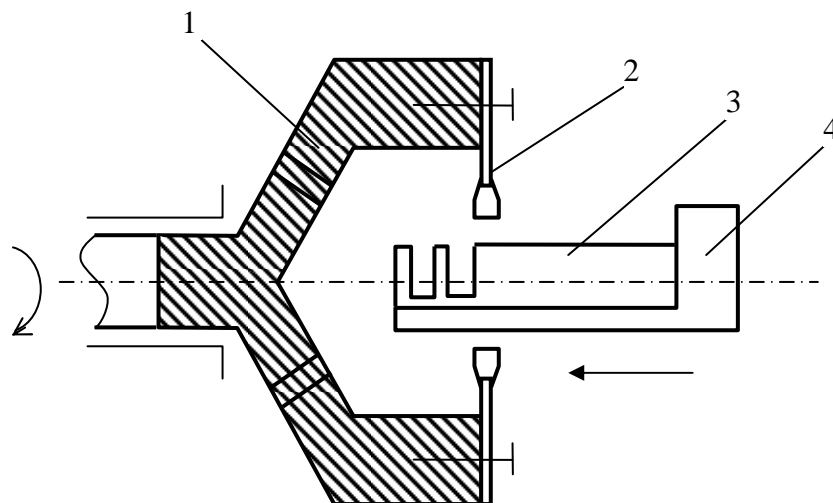


Рис. 1.10. Схема резки слитка на пластины алмазным диском с внутренней режущей кромкой: 1 – шпиндель; 2 – диск с алмазной кромкой; 3 – слиток; 4 – держатель слитка

Для разделения пластины на кристаллы применяют автоматические станки, например, ЭМ-225 с быстровращающимися дисками (рис. 1.11) – до 45000 об/мин. Наружный диаметр диска и диаметр его центрального отверстия зависят от диаметра разрезаемого слитка и для слитков диаметром 200 мм могут быть, соответственно, 685 и 254 мм. Зона разрушенного слоя за линией реза – около 10 мкм.

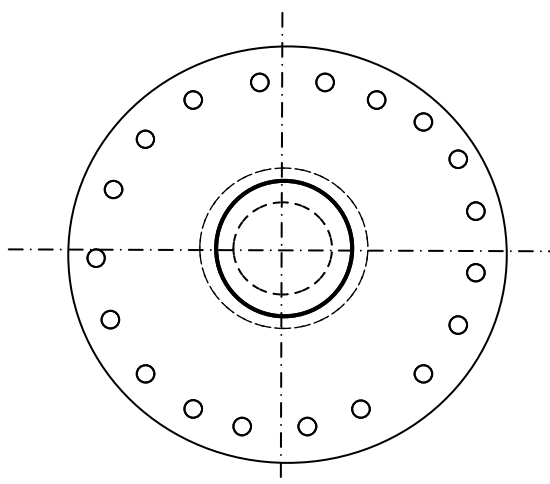


Рис. 1.11. Диск для резки слитков на пластины

Пластину помещают на вакуумный столик с продольным перемещением. Шпиндель с диском перемещается поперечно после каждого продольного разрезания пластины на шаг, равный ширине кристалла. Глубина резания обеспечивается вертикальным перемещением стола с помощью шагового двигателя. После получения линий реза по всей пластине столик поворачивается на 90° с фиксацией положения и производится резка до образования сетки рисок по всей площади пластины. Для сохранения ориентации кристаллов после сквозного разрезания пластин применяют ленты с липким слоем толщиной 80 – 100 мкм.

Отрезанные пластины попадают в сборник, заполненный водой, остаются на оправке или удаляются вакуумным съемником. При резке разрезаемый материал деформируется, алмазные зерна трутся об него и выделяется большое количество теплоты. Поэтому алмазный диск постоянно охлаждают водой или специальной охлаждающей жидкостью.

Резка дисками с внешней или внутренней режущей кромкой высокопроизводительна, позволяет разделять толстые, а, следовательно, большого диаметра пластины, а также диэлектрические подложки, обеспечивает воспроизводимые размеры и форму кристаллов и плат со строго вертикальными боковыми гранями, а также большой выход годных структур (достигающий 38...100 %).

Резка стальными полотнами или наборами полотен с использованием абразивной суспензии применяется в лабораторных условиях для сквозного разделения пластин и подложек. Метод резки слитков на пластины стальными полотнами имеет ряд преимуществ, которые заключаются в следующем. Во-первых, для резки полупроводниковых материалов могут быть использованы металлические полотна достаточно малой толщины (менее 0,05 мм), которые позволяют получать очень тонкий рез. Во-вторых, качество резки значительно выше, чем при алмазной обработке. Это объясняется рядом особенностей процесса резки полотнами. Здесь режущим веществом является абразивный порошок, подаваемый в виде суспензии в рабочую зону резки, а металлическое полотно или набор полотен служит только средством переноса абразивного порошка по плоскости реза полупроводникового материала. Абразивные частицы, двигаясь под действием металлических полотен, одной стороной своей грани вминаются в полотно, а другой стороной воздействуют на поверхность обрабатываемого полупроводникового материала.

Взаимодействие абразивных зерен с полупроводниковым материалом приводит к появлению микротрещин и выколов в нем и послойному удалению обрабатываемого материала.

Резка полотнами состоит в следующем. Металлические полотна набирают в обойму от нескольких единиц до нескольких сотен штук. Прокладки, расположенные между полотнами, дают возможность устанавливать нужный размер отрезаемых от слитка пластин. Набранную обойму устанавливают на рабочей скобе станка. Обойма может совершать возвратно-поступательные движения в горизонтальном направлении со скоростью 200 – 600 дв. ход/мин. Разрезаемый слиток, предварительно приклеенный к рабочему столику станка, подводят к движущимся полотнам снизу до соприкосновения и устанавливают определенную скорость подачи слитка. В зону резания подают абразивную суспензию (рис. 1.12).

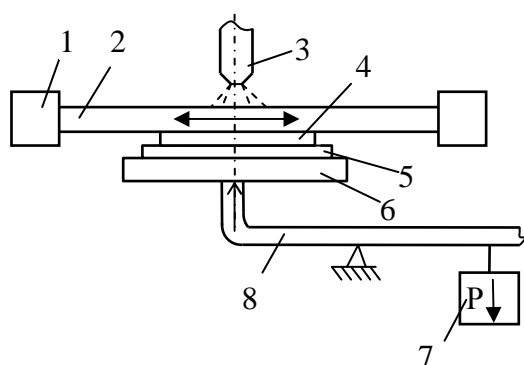


Рис. 1.12. Схема резки стальными полотнами:
1 – обойма; 2 – стальное полотно; 3 – сопло подачи суспензии; 4 –разделяемая пластина; 5 – прокладка; 6 – столик; 7 – груз; 8 – рычаг

К недостаткам этого метода резки следует отнести, в первую очередь, невысокую по сравнению с резкой алмазным диском с внутренней режущей кромкой точность обработки. Это объясняется тем, что у диска бóльшая жесткость конструкции, чем у полотен. Полотна в пакете не удастся равномерно и сильно натянуть. Кроме того, в процессе резки полотна неравномерно изнашиваются и натяжение их неравномерно ослабевает.

Резка проволокой обычно применяется в лабораториях для сквозного разделения пластин. Стальная или вольфрамовая проволока наматывается на вращающиеся ролики с канавками, расположенными с шагом, равным ширине кристалла. Ролики закреплены в кассете, совершающей возвратно-поступательные движения (700...1000 двойных ходов в минуту). Натяжение проволоки обеспечивается подтормаживанием подающей катушки при перематке на приемную катушку.

Основными недостатками метода являются:

- возможность неисправимого брака пластин из-за обрывов проволоки;
- невысокая производительность процесса.

Преимущества:

- лучшее, чем при резке полотнами, качество резки;
- возможность резки без повреждения пленок, нанесенных на пластины и подложки;
- небольшая ширина реза;
- возможность быстрой замены изношенной проволоки.

После резки контролируют геометрические параметры пластин (рис. 1.13): толщину h , разброс толщины в партии пластин и в пределах площади пластин – разнотолщинность.

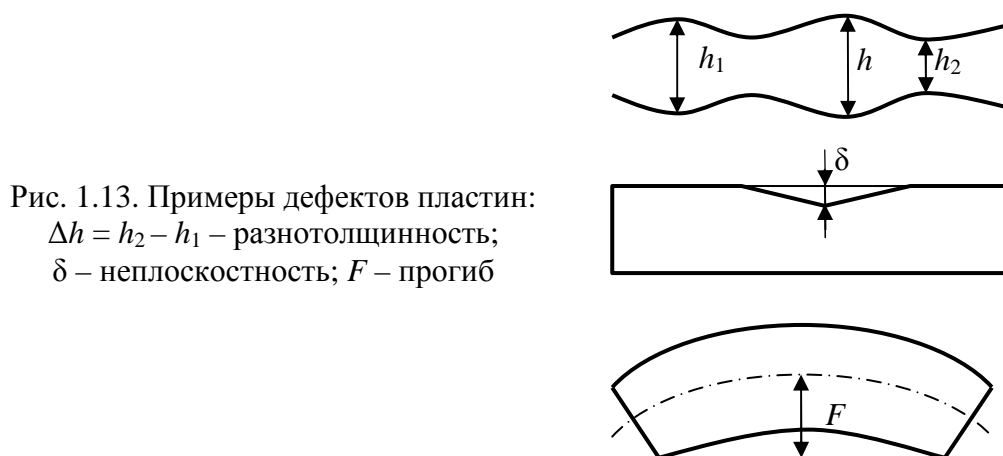


Рис. 1.13. Примеры дефектов пластин:
 $\Delta h = h_2 - h_1$ – разнотолщинность;
 δ – неплоскость; F – прогиб

Качество поверхности характеризуется шероховатостью и глубиной нарушенного слоя. Шероховатость – это среднее арифметическое отклонение профиля R_a , высота микронеровностей R_z . После резки параметры шероховатости должны находиться в пределах $R_z = 1 \dots 1,5$ мкм, $R_a = 0,2 \dots 0,3$ мкм.

Нарушенный слой после резки состоит из трех зон – рис. 1.14.

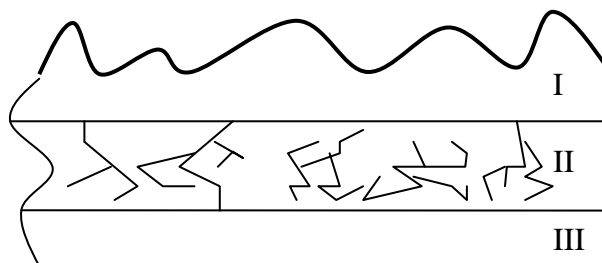


Рис. 1.14. Структура поверхности пластины после резки: I – зона рельефа с поликристаллической структурой, толщина которой 0,2 – 0,5 высоты микронеровностей; II – зона трещин и дислокационных скоплений, которые являются главным дефектом резки (слой II в 3 – 6 раз толще слоя I); III – зона с остаточными упругими напряжениями

Знать глубину нарушенного слоя необходимо для того, чтобы правильно назначить припуск на последующую сборку, при которой должна быть полностью удалена зона трещин и дислокаций.

Оперативно контролировать глубину нарушенного слоя можно, селективно протравливая поверхность косого или сферического шлифа и анализируя его с помощью оптического микроскопа.

Глубина зоны трещин после резки обычно не превышает 15 – 20 мкм.

1.1.3. Шлифование полупроводниковых пластин

Полученные после разрезания слитка полупроводниковые пластины обладают рядом нарушений, к которым относятся наличие механически нарушенного слоя, неплоскостность и неплоскопараллельность сторон, изгиб и большой разброс по толщине. Поэтому после проведения процесса резки обязательной технологической операцией является шлифование.

Для получения хороших результатов шлифования необходимо выполнять следующие требования: процесс следует проводить в чистых, свободных от пыли помещениях и под защитными кожухами с избыточным давлением воздуха; все установки для проведения процессов шлифования должны быть разделены по виду обработки и типу используемого абразива; все материалы (шлифовальники, абразивные порошки) должны быть тщательно рассортированы и храниться в отдельных герметичных скафандрах.

Под процессом шлифования понимают обработку полупроводниковых пластин на твердых доводочных дисках-шлифовальниках абразивными микропорошками. Шлифовальники обычно изготавливают из чугуна, стекла, стали, меди или латуни. Зернистость микропорошков для шлифования полупроводниковых пластин выбирают от M14 до M5.

Процесс шлифования позволяет получать 9 – 12-й классы чистоты обработки.

Процесс шлифования классифицируют по технологическим и конструктивным признакам, а также по виду используемого абразивного материала.

Термин «абразив» получил название от латинского *abrasio* – соскабливание.

В производстве микросхем находят применение следующие синтетические абразивные материалы: алмазы, карбид кремния, электрокорунд, окислы кремния, хрома, циркония, цеолиты.

Алмазы синтетические по механическим свойствам не уступают природным. Алмаз – самый твердый из всех известных материалов. Твердость алмаза по шкале Мооса равна 10. Среди абразивных материалов алмаз выделяют в особый класс.

Карбид кремния (карборунд SiC) в зависимости от количества примесей имеет различный цвет – от светло-зеленого до черного. В производстве наиболее часто применяется зеленый карбид кремния. Твердость карбида кремния по шкале Мооса равна 9,5...9,7.

Электрокорунд белый – кристаллический оксид алюминия Al_2O_3 с различными примесями (0,5...1,5 %). По твердости электрокорунд уступает карбиду кремния, но прочность электрокорунда выше. Твердость по шкале Мооса 9...9,2.

Абразивные материалы используются в виде порошков. В зависимости от размеров зерен абразивные порошки делятся на четыре группы: шлифзерно, шлифпорошки, микропорошки и тонкие порошки. В производстве ИМС применяются порошки трех последних групп. Алмазные порошки по размеру зерен делятся на шлифзерно и микропорошки, в производстве ИМС применяются микропорошки.

В обозначение абразивного или алмазного порошка входит марка материала и номер зернистости. Например, ЭБМ14 – электрокорунд белый, микропорошок с размером зерна основной фракции от 14 до 10 мкм; АСМ10/7 – алмаз синтетический, микропорошок с размером зерна основной фракции от 10 до 7 мкм.

По технологическим признакам шлифование подразделяют на предварительное и окончательное, по конструктивным признакам – на одностороннее и двустороннее, по виду используемого материала – на шлифование свободным и связанным абразивом.

Предварительная и окончательная обработка (шлифование) представляют собой два процесса, отличающиеся друг от друга целями, режимами и применяемыми материалами.

Цель *предварительного шлифования* – быстро выровнять плоскости пластин и удалить припуск. Режимы проведения этого процесса отличаются более высокими частотой вращения шлифовальников и давлениями абразивного порошка на поверхность полупроводниковой пластины. Кроме того, для предварительного шлифования выбирают абразивные порошки с более крупным зерном (М14, М10).

Окончательное шлифование (тонкое) характеризуется более мягкими режимами обработки и применением абразивных порошков с более мелким зерном (М7, М5). Целью окончательного шлифования является даль-

нейшее улучшение геометрических параметров и качества поверхности обрабатываемых пластин.

Принцип снятия полупроводникового материала с поверхности пластин при *одностороннем* и *двустороннем* шлифовании одинаков. Разница между этими процессами заключается лишь в конструктивных особенностях шлифовальных станков, которые дают возможность проводить процесс шлифования либо с одной стороны пластины, либо сразу с двух сторон. Для шлифования пластины с двух сторон с использованием оборудования для одностороннего шлифования процесс повторяют, а пластину переворачивают на другую сторону.

При *одностороннем* шлифовании полупроводниковые пластины наклеивают на специальные приспособления – головки, которые располагают на рабочей поверхности шлифовального круга так, чтобы полупроводниковые пластины соприкасались с поверхностью шлифовальника. На шлифовальнике, как правило, располагают три головки с наклеенными пластинами. При вращении шлифовальника головки самоустанавливаются и поверхности шлифовальника и полупроводниковых пластин плотно прилегают друг к другу. В зону шлифования подают абразивную суспензию.

Двустороннее шлифование проводят на станках, которые имеют два шлифовальника. Обрабатываемые полупроводниковые пластины располагаются в специальных гнездах сепараторов, которые вместе с пластинами размещают между двумя шлифовальниками. Нижний шлифовальник обычно неподвижен, а верхний свободно самоустанавливается при вращении. Пластины, загруженные в гнезда сепаратора, совершают сложное движение, которое складывается из вращения шлифовального круга, вращения сепаратора и вращения самой пластины внутри гнезда сепаратора. Такое движение дает возможность снимать слой материала равномерно со всей поверхности пластины с высокой точностью. Абразивная суспензия подается через верхний шлифовальник и равномерно обволакивает полупроводниковую пластину со всех сторон. При работе станка абразивные зерна перекачиваются по верхней и нижней поверхностям пластины, создавая определенное давление, которое приводит к выкалыванию микрочастиц полупроводникового материала. Шлифованная поверхность обрабатываемых пластин имеет матовую фактуру и состоит из большого числа кратерообразных выколов. Размеры выколов находятся в прямой зависимости от размера зерен абразива, давления на них шлифовальника и скорости шлифования.

Шлифование *свободным абразивом* выполняют на станках односторонней и двусторонней обработки полупроводниковых пластин с использованием различных суспензий и паст. В процессе обработки зерна абрази-

ва находятся в свободном состоянии, т.е. не связаны жестко друг с другом. Абразивная суспензия создает тонкую прослойку между шлифовальником и обрабатываемой полупроводниковой пластиной, в которой абразивные зерна свободно перекатываются. Отсюда и появилось название «свободный абразив».

Шлифование *связанным абразивом* существенно отличается от шлифования свободным абразивом как по физическому принципу удаления полупроводникового материала в процессе обработки, так и по кинематике процесса. Шлифование связанным абразивом выполняют на станках с жесткими осями, особенностью которых является неизменность положения осей вращения шлифовальника и обрабатываемых пластин. Главной особенностью этого процесса является конструкция шлифовального круга, который представляет собой металлический диск с нанесенным на его поверхность алмазным слоем. Алмазные зерна прочно соединены с поверхностью шлифовального диска специальной крепящей связкой.

Обрабатываемые полупроводниковые пластины наклеивают на головку станка, которая в процессе шлифования вращается вокруг своей оси. Шпиндель шлифовального круга, вращаясь с частотой 15000 – 18000 об/мин, приходит в контакт с поверхностью пластин. Алмазные зерна шлифовальника, ударяясь с высокой скоростью о пластины, снимают с поверхности полупроводникового материала микростружку. Обработанная этим способом полупроводниковая пластина имеет специфический рисунок поверхности, который представляет собой сетку из множества пересекающихся рисок. Процесс шлифования связанным абразивом характеризуется выделением большого количества теплоты. Поэтому для предотвращения перегрева шлифовальника и обрабатываемых пластин в зону шлифования подают охлаждающую жидкость. Уменьшение частоты вращения шлифовального круга приводит к снижению качества обработки поверхности пластин.

Точность обработки связанным абразивом зависит, прежде всего, от настройки станка и жесткости крепления его элементов (предметной головки, шпинделя шлифовальника). Погрешности геометрических размеров и форм обрабатываемых пластин возникают вследствие непараллельности осей шпинделя шлифовального круга и предметной головки станка.

1.1.4. Полирование полупроводниковых пластин

Для улучшения качества обработки поверхности полупроводниковых пластин и уменьшения глубины механически нарушенного слоя проводят процесс полирования.

Процесс полирования отличается от процесса шлифования технологическим режимом, размером зерна и видом абразива, а также материалом полировальника. Общим у этих процессов является вид обработки – односторонняя, с использованием свободного абразива.

Процесс полирования проводят, как правило, на мягких полировальниках, которые представляют собой жесткие диски, обтянутые мягким материалом – фланелью, замшей, батистом, фетром, велюром, сукном, шелком. В качестве абразива используют микропорошки (с зернистостью не выше 3 мкм) синтетического алмаза, оксида алюминия, оксида хрома, диоксида кремния или диоксида циркония.

Выбор полировочной ткани зависит от ее совместимости с используемой абразивной средой. Полировочная ткань должна удерживать своим ворсом частицы абразивного материала в процессе обработки полупроводниковых пластин, а также ткань должна быть стойка к истиранию. Обычно для предварительного полирования используют безворсовые тканевые материалы с более крупными алмазными зёрнами. Ворсистые материалы применяются для окончательной обработки с использованием алмазных зёрен менее 1 мкм.

К качеству полировальников также предъявляют ряд требований: они не должны иметь складок, порезов, утолщений, разорванных нитей, бугров и впадин, посторонних включений и других дефектов поверхности. Стойкость мягких полировальников невелика. Например, батистовый полировальник пригоден для обработки 20 – 30 пластин, сатиновый – для 50 – 70, замшевый – для 100 – 120, велюровый – для 500 – 600 пластин.

Процесс полирования полупроводниковых пластин состоит из трех основных этапов.

Первый этап (предварительное полирование) состоит в приготовлении абразивной суспензии и подготовке полировального круга. На стеклянный диск натягивают мягкий материал (батист) с помощью металлических палец. Поверхность батиста смачивают спиртом или приборным маслом для равномерного распределения абразивных зёрен. На поверхность вспомогательного стеклянного диска наносят алмазный порошок АСМ 3, общий вес которого не превышает одного карата, и несколько капель приборного масла. Полученную смесь растирают другим таким же стеклянным диском до равномерного распределения алмазного порошка по всей поверхности стеклянных дисков. После этого поочередно каждый диск переносят на приготовленный батистовый полировальник и проводят втирание алмазного порошка в батист. Втирание ведут до тех пор, пока весь алмазный порошок не перейдет на поверхность батиста.

На подготовленный таким образом полировальник помещают рабочие головки с наклеенными на них полупроводниковыми пластинами. Так как процесс алмазной обработки связан с тепловыделением, то не рекомендуется устанавливать интенсивный режим полирования. Повышение температуры процесса полирования может привести к отклеиванию полупроводниковых пластин, отрыву их от рабочей головки и их механическому повреждению. Поэтому частота вращения полировальника не должна превышать 30 – 40 об/мин.

Второй этап (промежуточное полирование) характеризуется сменой материала полировальника и использованием алмазного порошка АСМ1. Для этого на стеклянный диск натягивают другой мягкий материал (велюр), смоченный горячей водой или спиртом. На поверхность велюра наносят алмазный порошок с приборным маслом. После проведенных операций очищенные от следов предыдущей обработки головки с полупроводниковыми пластинами располагают на вновь подготовленном полировальнике, и процесс полировки продолжается. На втором этапе нагрузка на полупроводниковые пластины несколько увеличивается, а частота вращения полировальника снижается до 25 – 30 об/мин.

Третий этап (окончательное тонкое полирование) включает в себя смену полировальника и абразивного материала. В качестве материала полировальника используют батист, а абразивным материалом могут служить оксид хрома, диоксид кремния и диоксид циркония.

Наиболее часто тонкое полирование полупроводниковых пластин проводят с использованием оксида хрома с величиной зерна менее 1 мкм. Обычно применяют оксид хрома двух сортов: грубый с размером зерна 0,6 – 0,8 мкм, получаемый путем восстановления бихромата калия серой, и тонкий с размером зерна 0,2 – 0,4 мкм, получаемый термическим разложением бихромата аммония. Следует отметить, что полирование оксидом хрома является малопродуктивным процессом, продолжающимся несколько часов.

Более производительным является процесс полирования с использованием на последнем этапе в качестве абразивного материала диоксидов кремния или циркония.

Обычно используют диоксид кремния с размером зерна не более 0,1 мкм. Водную суспензию диоксида кремния составляют в соотношении: 1 ч. порошка диоксида кремния и 5 ч. воды. Суспензия в течение всего процесса полирования должна тщательно перемешиваться. Процесс полирования с использованием суспензии из диоксида кремния проводят на полировальнике из замши с частотой вращения до 100 об/мин.

Диоксид циркония в виде водной суспензии с соотношением компонентов 1:10 и величиной зерна не более 0,1 мкм с успехом используется на окончательном этапе процесса полирования.

Последний этап полирования имеет большое значение. Он дает возможность удалить так называемый алмазный фон с поверхности полупроводниковых пластин, возникающий на первых двух этапах, и значительно уменьшить глубину механически нарушенного слоя. Последний этап полирования позволяет получить поверхности полупроводниковых пластин с чистотой обработки, соответствующей 13 – 14-му классу.

К новым перспективным методам полировки следует отнести химико-механические способы, которые отличаются высокой химической активностью по отношению к обрабатываемому полупроводниковому материалу.

1.1.5. Контроль качества механической обработки

Электрические параметры готовых полупроводниковых приборов и ИМС существенно зависят от степени совершенства поверхности, качества обработки и геометрической формы обработанных полупроводниковых пластин, так как эти несовершенства механической резки, шлифования и полирования неблагоприятно сказываются на последующих технологических процессах. Поэтому после проведения процессов механической обработки полупроводниковые пластины подвергаются контролю. Оценка качества производят по следующим основным критериям годности:

- 1) геометрические размеры и форма полупроводниковых пластин;
- 2) чистота обработки поверхности пластин;
- 3) глубина механически нарушенного слоя.

Контроль геометрических размеров и форм пластин предусматривает определение толщины, стрелы прогиба, клиновидности и плоскостности пластин после каждого вида механической обработки.

Толщину пластин определяют путем измерения ее в нескольких точках поверхности с помощью индикатора часового типа с ценой деления 1 мкм.

Стрелу прогиба пластин определяют как разность значений толщины пластины в двух точках, расположенных в центре пластины на противоположных ее сторонах, т.е. измеряют толщину пластины в центральной точке, а затем пластину переворачивают на другую сторону и снова измеряют толщину в центральной точке. Разность полученных значений толщины даст стрелу прогиба.

Клиновидность определяют как разность значений толщины пластины в двух точках, но расположенных не в центре пластины, а по ее краям на противоположных концах пластины, отнесенную к диаметру пластины. Для более полной картины рекомендуется повторить измерения для двух точек, расположенных на концах диаметра, перпендикулярного к диаметру, который был выбран для первого измерения.

Плоскостность определяют измерением толщины пластины в нескольких точках, расположенных по диаметру пластины.

Контроль чистоты обработки поверхности пластин включает в себя определение шероховатости, наличия на поверхности сколов, рисок, впадин и выступов.

Шероховатость оценивают высотой микровыступов и микровпадин на поверхности полупроводниковой пластины. Оценку шероховатости проводят либо сравнением поверхности контролируемой пластины с эталонной поверхностью, либо измерением высоты микронеровностей на микроинтерферометре Линника МИИ-4.

Наличие на поверхности пластин сколов, рисок, впадин и выступов контролируется визуально с помощью микроскопа.

Контроль глубины механически нарушенного слоя. Глубина механически нарушенного слоя является основной характеристикой качества обработки полупроводниковых пластин. несовершенства кристаллической решетки приповерхностного слоя полупроводниковой пластины после резки, шлифования и полирования принято называть механически нарушенным слоем. Этот слой распространяется от обработанной поверхности вглубь объема полупроводникового материала. Наибольшая глубина залегания нарушенного слоя получается при резке слитка на пластины. Процессы шлифования и полирования приводят к уменьшению толщины нарушенного слоя.

Структура механически нарушенного слоя имеет сложное строение и может быть разделена по толщине на три зоны (см. рис. 1.14). *Первая зона* представляет собой нарушенный рельефный слой, состоящий из хаотически расположенных выступов и впадин. Под этой зоной расположена *вторая* (самая большая) *зона*, которая характеризуется одиночными выколками и идущими от поверхности зоны в ее глубь трещинами. Эти трещины начинаются от неровностей рельефной зоны и простираются по всей глубине второй зоны. В связи с этим слой полупроводникового материала, образованный второй зоной, получил название «трещиноватый». *Третья зона* представляет собой монокристаллический слой без механических повреждений, но имеющий упругие деформации (напряженный слой).

Толщина нарушенного слоя пропорциональна размеру зерна абразива и может быть определена по формуле

$$H = k\delta, \quad (1.3)$$

где $k = 1,7$ для кремния и $k = 2,2$ для германия; δ – размер зерна абразива.

Для определения глубины механически нарушенного слоя используют три способа.

Первый способ заключается в последовательном стравливании тонких слоев нарушенной области и контроле поверхности полупроводниковой пластины на электронографе. Операцию стравливания проводят до того момента, когда вновь полученная поверхность полупроводниковой пластины обретет совершенную монокристаллическую структуру. Разрешающая способность данного метода лежит в пределах ± 1 мкм. Для увеличения разрешающей способности необходимо каждый раз уменьшать толщину снимаемых слоев. Процесс химического травления не может обеспечить снятие сверхтонких слоев, поэтому такие слои снимают травлением не самого полупроводникового материала, а предварительно окисленного слоя. Метод окисления поверхности с последующим стравливанием слоя оксида дает возможность получить разрешающую способность менее 1 мкм.

Второй способ основан на зависимости предельного тока анодного растворения полупроводниковой пластины от наличия дефектов на ее поверхности. Так как скорость растворения слоя с дефектами структуры значительно выше, чем монокристаллического материала, то значение анодного тока при растворении пропорционально этой скорости. Поэтому при переходе от растворения нарушенного слоя к растворению монокристаллического материала будет наблюдаться резкое изменение как скорости растворения, так и значения анодного тока. По моменту резкого изменения анодного тока судят о глубине нарушенного слоя.

Третий способ основан на том, что скорость химического травления полупроводникового материала нарушенного слоя значительно выше скорости химического травления исходного ненарушенного монокристаллического материала. Поэтому толщину механически нарушенного слоя можно определить по моменту скачкообразного изменения скорости травления.

Критериями годности полупроводниковой пластины после определенного вида механической обработки являются следующие основные параметры.

После резки слитков на пластины диаметром 60 мм поверхность не должна иметь сколов, больших рисков; класс чистоты обработки должен

быть не хуже 7 – 8; разброс по толщине пластины не должен превышать $\pm 0,03$ мм; прогиб – не более 0,015 мм; клиновидность – не более 0,02 мм.

После процесса шлифования поверхность должна иметь матовый однородный оттенок, не иметь сколов и царапин; клиновидность – не выше 0,005 мм; разброс по толщине – не выше 0,015 мм; чистота обработки должна соответствовать 11 – 12-му классу.

После процесса полирования чистота поверхности должна соответствовать 14-му классу, поверхность не должна иметь алмазного фона, сколов, рисок, царапин; прогиб должен быть не больше 0,01 мм; отклонение от номинала толщины не должно превышать $\pm 0,010$ мм.

Необходимо отметить, что контроль качества полупроводниковых пластин (подложек) имеет огромное значение для всего последующего комплекса технологических операций изготовления полупроводникового прибора или сложной интегральной микросхемы. Это объясняется тем, что механическая обработка подложек является, по существу, первой из цикла операций всего процесса производства приборов и поэтому позволяет исправить отклонение от нормы параметров забракованных при контроле пластин (подложек). При некачественном проведении контроля пластины, имеющие какие-либо дефекты или несоответствие требуемым критериям годности, попадают на последующие технологические операции, что приводит, как правило, к неисправимому браку и резкому снижению такого важного экономического параметра, как процент выхода годных изделий на этапе их изготовления.

1.1.6. Виды загрязнений полупроводниковых подложек

Наличие на поверхности полупроводниковой подложки различного рода загрязнений приводит к резкому снижению процента выхода годных изделий на последующих технологических операциях.

Загрязнение подложек обычно происходит при механической обработке полупроводниковых слитков и пластин (резке, шлифовании и полировании), а также за счет адсорбции различных веществ из технологических сред.

Все виды загрязнений можно классифицировать по двум признакам: *их физико-химическим свойствам и характеру их взаимодействия с основными полупроводниковыми материалами*, на которых они находятся.

По физико-химическим свойствам загрязнения могут быть органические, неорганические, солевые, ионные, механические и др.

По характеру взаимодействия с материалом подложки загрязнения делят на *физически* и *химически адсорбированные*.

К *физически адсорбированным загрязнениям* относятся все виды механических частиц (пыль, волокна, абразив, металлические включения и пр.), а также все виды органических материалов, связанных с поверхностью подложки силами физической адсорбции. Механические частицы достаточно легко удаляются различными технологическими промывками в водных проточных и ультразвуковых ваннах. Для удаления органических загрязнений требуется более сложный процесс отмытки подложек.

Среди всех видов загрязнений особое внимание следует уделять органическим загрязнениям, так как они при нагревании разлагаются и выделяют газообразные вещества (кислород, оксид и диоксид углерода, пары воды), которые в значительной степени ухудшают последующие технологические процессы (диффузии, эпитаксии, осаждения защитных диэлектрических пленок).

Органические загрязнения, в свою очередь, могут быть *полярными* и *неполярными*. К полярным органическим загрязнениям относятся, главным образом, олеиновая и стеариновая кислоты, канифоль, синтетические вещества и смолы. К неполярным органическим загрязнениям относятся минеральные масла, вазелин, нефтяные парафины и воск.

К *химически адсорбированным загрязнениям* следует отнести различные виды оксидных и сульфидных пленок на поверхности полупроводниковых подложек, а также катионы и анионы химических веществ. Наиболее трудноудаляемыми химическими загрязнениями являются электроосажденные в порах подложки металлы и труднорастворимые оксиды. Такие виды загрязнений удалить с помощью даже самого сложного процесса промывки подложки невозможно. Их удаляют проведением комплекса химических реакций с использованием определенных типов и составов травильных растворов.

Таким образом, для полной очистки подложки от загрязнений необходимо выбрать технологический процесс, который включал бы в себя ряд последовательных операций, каждая из которых позволяла бы удалять с поверхности один или несколько видов загрязнений. При этом необходимо руководствоваться общими закономерностями:

- механические загрязнения удаляют промывкой в водных ваннах с использованием ультразвука или гидродинамической обработкой;
- органические загрязнения – обработкой в кипящих растворителях;
- химические загрязнения – путем химического травления в щелочных или кислотных травителях;
- соляные и ионные загрязнения – ионным обменом или промывкой в особо чистой высокоомной деионизованной воде.

Следует отметить, что всегда следует исходить из требований по чистоте поверхности подложки, диктуемых той технологической операцией, на которую поступают эти подложки. Например, требования по чистоте к подложкам, поступающим с механической на химическую обработку, резко отличаются от требований по чистоте к подложкам, поступающим с химической обработки на эпитаксиальное наращивание.

Все многообразие процессов удаления загрязнений с поверхности полупроводниковых подложек можно свести к двум основным процессам – удаление физических и химических загрязнений.

1.1.7. Отмывка полупроводниковых подложек

Одной из ответственных операций в общем цикле подготовки полупроводниковых подложек для изготовления полупроводниковых приборов и ИМС является операция отмывки. Эта операция состоит из двух этапов – обезжиривание подложек в органических растворителях и промывка в особо чистой воде.

Обезжиривание подложек проводят для удаления органических физических загрязнений. Для удаления неполярных органических загрязнений используют такие растворители, как толуол, четыреххлористый углерод, фреоны, а для удаления полярных органических загрязнений используют ацетон, спирты и трихлорэтилен. В промышленном производстве для процесса отмывки подложки часто используют различные смеси растворителей, которые позволяют проводить отмывку полярных и неполярных органических загрязнений в одном технологическом цикле обезжиривания. К таким смесям относятся фреон – хлористый метилен, фреон – изопропиловый спирт, фреон – ацетон.

Процесс обезжиривания в органических растворителях в сильной степени зависит от режима его проведения (температуры, длительности и скорости смены отработанного растворителя). Так, с повышением температуры процесса скорость растворения органических загрязнений возрастает. На качество обезжиривания оказывает влияние время проведения процесса, которое необходимо для полного растворения определенного вида загрязнения в растворителе. По мере прохождения процесса обезжиривания подложек сам растворитель постепенно загрязняется за счет перехода в него продуктов растворяемого вещества, что приводит к снижению эффективности процесса растворения и, в конечном счете, к некачественному обезжириванию подложек. Поэтому своевременное и быстрое удаление загрязненного растворителя очень важно для качественного обезжиривания.

Для интенсификации процесса обезжиривания и улучшения качества отмывки широко используют ультразвуковые ванны.

При проведении процессов обезжиривания необходимо соблюдать правила техники безопасности, так как используемые растворители являются ядовитыми веществами и отрицательно действуют на организм и здоровье человека. Все работы по обезжириванию необходимо проводить в помещениях, оборудованных приточно-вытяжной вентиляцией, с использованием специальных скафандров или герметичных установок.

Технологический процесс обезжиривания включает в себя загрузку полупроводниковых подложек во фторопластовые кассеты, которые последовательно опускаются в несколько ванн (от двух до четырех) с растворителем или смесью растворителей. В первой ванне происходит удаление наиболее грубых жировых загрязнений, во второй ванне снимаются оставшиеся нерастворенными при первой обработке участки жировых покрытий, а в последующих ваннах происходит окончательная более тщательная отмывка подложек.

Наиболее перспективным способом обезжиривания является способ, в котором в качестве реагентов используются не жидкие растворители, а пары кипящих растворителей. Суть способа заключается в том, что пары растворителя более активно взаимодействуют с загрязнениями на поверхности полупроводниковой подложки и более эффективно их растворяют. Кроме того, в процессе обезжиривания в больших пределах и с большой скоростью можно проводить смену отработанного пара на новую свежую порцию пара. Важным преимуществом этого способа является то, что весь процесс проводится в герметичной камере и может быть полностью автоматизирован.

В процессе обезжиривания происходит взаимодействие растворителя с различными видами загрязнений, и в результате десорбции молекулы этих загрязнений переходят с поверхности полупроводниковой подложки в приповерхностный слой растворителя (жидкости или пара), а молекулы растворителя оседают на поверхности подложки. Происходит как бы замещение адсорбированных молекул загрязнений молекулами растворителя.

Таким образом, в процессе обезжиривания на поверхности полупроводниковой подложки создаются слои растворителя, которые необходимо удалить. Поэтому вторым этапом в процессе отмывки подложек после их обезжиривания является процесс промывки их в особо чистой воде.

Процесс промывки в особо чистой воде служит для удаления с поверхности подложек остатков растворителя и частиц продуктов растворения. В зависимости от требований последующих технологических процес-

сов промывку полупроводниковых подложек проводят в деионизованной воде, удельное сопротивление которой выбирают равным 1 – 20 МОм·см. Промывку подложек проводят в ультразвуковых ваннах с подогревом и без подогрева воды.

Для повышения эффективности процесса промывки подложек наряду с ультразвуковыми ваннами часто используют гидромеханические приспособления в виде кистей и щеток, а также гидродинамические устройства с интенсивной подачей струи проточной воды.

О качестве промывки подложек судят по значению удельного сопротивления воды на входе и выходе промывочной камеры. Сопротивление воды на выходе тем выше, чем меньше в ней загрязнений. Обычно промывку ведут до тех пор, пока сопротивление воды на выходе не сравняется с сопротивлением воды на входе промывочной камеры.

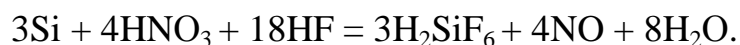
1.1.8. Химическая обработка полупроводниковых подложек

Процесс химической обработки полупроводниковых подложек состоит в растворении их поверхностного слоя под действием кислотных или щелочных травителей. Данный процесс является гетерогенным, так как взаимодействие полупроводникового материала с травителем осуществляется на границе раздела двух различных сред – твердой (подложка) и жидкой (травитель). Другая особенность химического взаимодействия подложки с травителем состоит в том, что процесс травления подложки не является равновесным: объем удаляемого полупроводникового материала меньше, чем травителя. Избыток травителя и фиксация его температуры позволяют производить процесс химической обработки с постоянной скоростью и таким образом точно рассчитать толщину удаляемого слоя полупроводникового материала.

Однако следует учитывать тот факт, что скорость травления слоя, нарушенного при механической обработке, и исходного (ненарушенного) материала неодинакова. Скорость травления механически нарушенного слоя значительно выше. Это объясняется наличием в механически нарушенном слое большого количества структурных нарушений – дислокаций, что приводит к возрастанию скорости травления.

1.1.8.1. Травление кремния. Химическая инертность кремния объясняется наличием на исходной пластине оксидной пленки, которая растворима только в водных растворах щелочей и плавиковой кислоты. Поэтому для химической обработки кремния используют два вида травителей – кислотный и щелочной. В качестве кислотных травителей применяют раз-

личные смеси азотной и плавиковой кислот. Максимальная скорость травления кремния достигается при соотношении $\text{HNO}_3:\text{HF} = 1:4,5$ в молярных долях. Растворение кремния в этом составе травителя происходит по следующей реакции:



За счет разницы в концентрации травителя у выступов и впадин, которые имеют место на поверхности кремния, происходит более быстрое растворение выступов. Это приводит к сглаживанию поверхности полупроводниковой подложки.

В качестве щелочных травителей используют водные (10 – 20 %) растворы КОН и NaOH. Травление кремния в щелочных составах проводят при температуре 90 – 100 °С. Обработка в щелочных травителях не дает желаемой зеркальной поверхности кремния, поэтому этот вид травителя в качестве полирующего не нашел широкого практического применения в промышленности. Однако щелочной травитель часто используют для так называемого анизотропного травления, т.е. в тех случаях, когда требуется вытравить на поверхности подложки лунку определенной формы. Особый интерес представляют лунки V-образной формы, широко используемые для изоляции отдельных областей ИМС.

Селективным травителем для кремния является смесь N_2H_4 с водой. Этот травитель обеспечивает высокую скорость травления кремния (около 0,05 мкм/с при температуре 120 °С) в направлении, перпендикулярном к плоскости подложки и совпадающем с кристаллографической плоскостью (100).

В технологии изготовления ИМС в настоящее время используют анизотропное травление кремниевых подложек, ориентированных по плоскостям (100) и (110), так как другие ориентации не позволяют получать нужных углублений.

1.1.8.2. Травление арсенида галлия. Арсенид галлия травят как в щелочных, так и в кислотных травителях. Щелочной травитель, состоящий из 5 %-го водного раствора NaOH и 30 %-й перекиси водорода, взятых в соотношении 5:1, используют для химической обработки подложек при температуре 40 – 60 °С. Кислотный травитель, состоящий из смеси азотной, соляной кислот и воды, взятых в соотношении 1:2:2, используют главным образом для травления подложек из арсенида галлия, ориентированных по плоскости (111), при температуре 25 – 30 °С.

Полирующим травителем для подложек из арсенида галлия является состав на основе азотной, плавиковой кислот и воды, взятых в соотношении 3:1:2.

1.1.9. Химико-динамическая обработка полупроводниковых подложек

Если проводить процесс химической обработки таким образом, что исходная полупроводниковая подложка будет находиться в статическом (неподвижном) положении, то процесс растворения полупроводникового материала будет проходить неравномерно по всей поверхности подложки. Неравномерность травливания полупроводникового материала объясняется следующими факторами. Во-первых, в статическом положении подложки концентрация травильного раствора различна для различных участков поверхности. Во-вторых, за счет неровностей (выступы и впадины) поверхности подложки в разных ее частях выделяется неодинаковое количество теплоты, что приводит к локальному перегреву отдельных участков подложки и резкому увеличению скорости растворения полупроводникового материала. В-третьих, периферийные области подложки (ее краевые части), к которым быстрее поступает свежий травитель, находятся в неодинаковых термодинамических условиях и в результате этого подвергаются более интенсивному травлению.

Указанные факторы приводят к тому, что в результате химической обработки подложки, находящейся в статическом положении, резко ухудшается ее плоскопараллельность и возникают завалы на ее краевых участках.

Для устранения этих нежелательных эффектов в полупроводниковой технологии применяют так называемую химико-динамическую обработку полупроводниковых подложек. Принцип химико-динамической обработки заключается в активном перемешивании травителя непосредственно у поверхности подложки и постоянном вращении подложки в объеме травителя.

Скорость травливания полупроводникового материала зависит от скорости удаления продуктов реакции от поверхности подложки и скорости доставки новых порций травильного раствора к границе раздела подложка – травитель. Перемешивание травителя способствует быстрейшему выравниванию состава травителя по всему объему травильной камеры и, как следствие, приводит к равномерности процесса химической обработки полупроводниковой подложки.

Химико-динамический процесс обработки подложек позволяет получать поверхность с высокой однородностью по плоскопараллельности, требует меньших затрат времени и реактивов, легко поддается автоматизации. В полупроводниковой технологии применяют установки химико-динамической обработки, позволяющие добиваться гладкой зеркальной поверхности полупроводниковых подложек, соответствующей 14-му классу чистоты обработки.

Установка химико-динамического травления полупроводниковых подложек включает фторопластовый барабан-стакан, в который помещены кассеты с подложками. Барабан-стакан наклонен к плоскости нормали под углом $20 - 40^\circ$ и соединен через редуктор с валом двигателя. При включении двигателя барабан-стакан начинает вращаться с заданной скоростью, а помещенные внутрь него кассеты с подложками перекатываются по его внутренней поверхности.

Установка снабжена автоматическим устройством для загрузки и выгрузки кассет с подложками, а также для плавной регулировки скорости перемещения подложек в процессе травления.

1.1.10. Парогазовая обработка кремниевых подложек

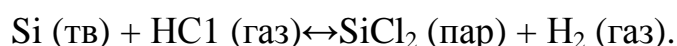
Парогазовая обработка кремниевых подложек находит все более широкое применение в технологических процессах изготовления полупроводниковых приборов и ИМС. Особое практическое значение этот процесс имеет для подготовки подложек перед эпитаксиальным наращиванием кремниевых слоев, так как исключается возможность промежуточного загрязнения.

Этот процесс может проводиться после механической полировки, химического травления и других видов теххимической обработки. Воздействию парогазовых смесей подвергаются поверхностные слои кремниевых подложек, которые в процессе обработки удаляются вместе с имеющимися на них загрязнениями и нарушениями.

Рассмотрим несколько способов парогазовой обработки, которые находят применение в полупроводниковой технологии.

1.1.10.1. Обработка в смеси ($\text{HCl} + \text{H}_2$). Процесс проводят в герметичной камере при температуре 1200°C . Кремниевые подложки располагают в реакторе рабочей камеры и прогревают в течение нескольких минут в потоке очищенного водорода. После этого в поток водорода добавляют небольшое количество ($0,5 - 2\%$ по объему) безводного хлористого водорода.

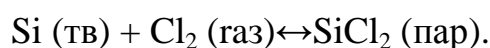
Реакция взаимодействия кремния с парогазовой смесью идет с образованием продуктов реакции в виде легколетучих соединений SiCl_2 или SiCl_4 :



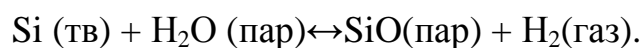
Наряду с рассмотренным процессом с использованием смеси ($\text{HCl} + \text{H}_2$) аналогичные результаты по качеству обработки можно получить с использованием смесей ($\text{HBr} + \text{H}_2$) и ($\text{NI} + \text{H}_2$). Если обработку в этих смесях прово-

диль при температурах и концентрациях таких же, как и в смеси ($\text{HCl} + \text{H}_2$), то скорости удаления кремния будут одного порядка.

1.1.10.2. Обработка в смесях ($\text{Cl}_2 + \text{H}_2$), ($\text{Br}_2 + \text{H}_2$) и ($\text{I}_2 + \text{H}_2$). Основным преимуществом данного способа обработки перед предыдущими является снижение температуры рабочего процесса с 1200°C для смеси ($\text{HCl} + \text{H}_2$) до 1100°C . Процесс обработки кремниевых подложек проводят в аналогичных установках. Реакция взаимодействия кремния с хлором имеет вид:



1.1.10.3. Обработка в смеси ($\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$). Обработку кремния парами воды проводят при высокой температуре ($1250 - 1270^\circ\text{C}$). В рабочую камеру поступает поток водорода, в который добавляются пары воды в количестве, не превышающем $0,02 - 0,1\%$. Реакция взаимодействия кремния с парами воды имеет вид:



Для всех рассмотренных процессов обработки кремния (кроме обработки в парах воды) наличие примесей в рабочих смесях приводит к образованию нежелательных посторонних включений на поверхности обрабатываемой подложки.

При попадании в рабочую камеру кислорода на поверхности кремния могут образовываться включения SiO или SiO_2 , а при попадании в камеру азота наблюдаются отдельные включения из нитрида кремния (Si_3N_4) размером в несколько ангстрем.

Глубина стравленных слоев кремния при парогазовой обработке обычно не превышает $10 - 15$ мкм.

Для снижения рабочей температуры процессов парогазовой обработки можно использовать газовые смеси хлора с гелием, а также более сложные составы газовых смесей, например, водорода, гелия, йодистого водорода и фтористого водорода, взятых в соотношении $80:20:0,5:0,001$.

1.1.11. Ионно-плазменная обработка подложек

Ионно-плазменная обработка подложек является одним из специфических процессов в полупроводниковой микроэлектронике, который не требует использования жидких травителей. Сущность процесса состоит во взаимодействии ускоренного потока ионов инертного газа с поверхностью обрабатываемой подложки.

Для осуществления этого процесса исходную полупроводниковую подложку помещают в рабочую камеру, где создается определенное давление инертного газа. С помощью расположенных внутри камеры электродов добиваются стабильного тлеющего разряда. Пространство тлеющего разряда заполнено нейтральной электронно-ионной плазмой. На обрабатываемую полупроводниковую подложку относительно плазмы подается достаточно большое отрицательное напряжение – (2 ... 3) кВ. В результате положительно заряженные ионы плазмы бомбардируют поверхность подложки и слой за слоем выбивают атомы с поверхности, т.е. обрабатывают (травят) ее.

Ионно-плазменная обработка, как и химическая, может быть общей и локальной. Преимуществом локальной ионно-плазменной обработки является отсутствие «подтравливания» под маску: стенки вытравленного рельефа практически перпендикулярны к поверхности обрабатываемой подложки, а площади углублений (лунок) равны площади окон в защитной маске. Кроме того, процесс ионно-плазменной обработки является универсальным, т.е. с его помощью можно обрабатывать подложки из любого полупроводникового материала.

Рассмотрим механизм ионно-плазменного удаления материала с поверхности полупроводниковой подложки заряженными ионами инертных газов.

При соударении заряженного иона с атомом полупроводниковой подложки происходит передача момента количества движения бомбардирующего иона атомам подложки. Другими словами, ускоренный до определенной энергии положительно заряженный ион инертного газа из ионной плазмы ударяется о поверхность подложки. При этом заряженный ион, сталкиваясь с атомами решетки, передает им свою энергию. Так как начальная энергия иона велика, то первый атом, столкнувшийся с ионом (если энергия иона больше энергии связи атома в решетке), покидает свое место и в свою очередь соударяется с другим атомом кристаллической решетки, который после соударения тоже может покинуть свое место. Таким образом, может создаться ситуация, когда серия последовательных столкновений ион – атом и атом – атом приведет к тому, что последний из соударившихся атомов окажется расположенным на поверхности подложки. Если энергия, переданная приповерхностному атому, больше его работы выхода, то он покидает поверхность подложки и переходит в объем рабочей камеры.

Техника проведения процессов ионно-плазменной обработки связана с методом образования ионной плазмы инертного газа. Существует три ос-

новых метода образования плазмы. В первом методе источником плазмы служит самостоятельный тлеющий разряд, возникающий при определенном давлении инертного газа в рабочей камере при приложении напряжения между анодом и катодом. Во втором методе плазма возбуждается за счет дугового разряда, стимулированного током термоэлектронной эмиссии. Третий метод создания плазмы основан на использовании систем с высокочастотным (ВЧ) возбуждением.

Для поддержания плазмы тлеющего разряда используют эффекты автоэлектронной и ионно-электронной эмиссии за счет высокого межэлектродного поля и бомбардировки поверхности катода положительными ионами плазмы. Основным преимуществом этого метода является его простота и возможность создания равномерной плотности плазмы в большом объеме прикатодного пространства.

Для поддержания плазмы дугового разряда используют специальный источник электронов в виде накаливаемого термоэмиссионного катода. Эмитируемые этим катодом электроны ускоряются по направлению к аноду и ионизируют по пути молекулы инертного газа. Плотность такой плазмы может быть намного большей, чем плотность плазмы тлеющего разряда. Для увеличения плотности плазмы дугового разряда используют магнитные линзы.

Системы с ВЧ возбуждением плазмы применяются для ионно-плазменной обработки подложек из диэлектрических материалов.

Процесс ионно-плазменной обработки состоит в следующем. Из рабочей камеры откачивают воздух и заполняют ее инертным газом. Наиболее часто для этих целей используют аргон. Предварительно обработанную подложку закрепляют внутри камеры на электроде. Давление инертного газа в камере устанавливают в диапазоне 0,13 – 1,3 Па. Между анодом и катодом прикладывают напряжение, не превышающее нескольких десятков вольт. Процесс обработки подложки начинается с момента подачи на нее высокого отрицательного напряжения (порядка 1 – 3 кВ), достаточного для интенсивной бомбардировки ее положительными ионами инертного газа плазмы. Выбиваемые атомы подложки переходят в объем рабочей камеры и осаждаются на ее стенках или на специальных защитных экранах.

1.1.12. Плазмохимическая обработка подложек

Плазмохимическая обработка используется в процессах удаления поверхностного слоя материала подложки, находящейся в твердой фазе, при взаимодействии этой подложки с плазмой активных газов или смесей газов. В этом случае протекает процесс реактивного травления материала подложки.

Процесс плазмохимической обработки подложек отличается от ионно-плазменного процесса тем, что удаление вещества с поверхности подложки происходит не только в результате бомбардировки ее положительно заряженными ионами плазмы, но и вследствие химического взаимодействия подложки с активными реагентами плазмы. Таким образом, при плазмохимической обработке подложек большое значение имеет высокая химическая реакционная способность плазмы.

Способ плазмохимической обработки подложек обладает рядом преимуществ. Во-первых, он легко управляем и позволяет проводить регулировку режима на всех стадиях его проведения. Во-вторых, он имеет незначительную инерционность. В-третьих, это процесс «сухой», не требующий жидких травителей. В-четвертых, плазмохимический способ обладает высокой разрешающей способностью и точностью обработки поверхности подложки.

При плазмохимической обработке можно совместить в одной камере несколько различных технологических операций: очистку поверхности, травление и осаждение новых слоев. Это позволяет резко снизить возможность загрязнения подложек, а также исключить такие трудоемкие технологические операции, как промывка и сушка подложек.

Для обработки кремниевых подложек в качестве реактивных плазмообразующих составов используются смеси кислорода с фторсодержащими и хлорсодержащими газами.

Изотропное травление кремния проводят в газовой смеси $\text{CF}_4 + \text{O}_2 + \text{N}_2$. В низкотемпературной плазме происходит разложение CF_4 с выделением иона фтора. Молекулы кислорода, заполняющие рабочую камеру, ионизируются и легко взаимодействуют с поверхностью кремния до ее окисления. Ионы фтора взаимодействуют со слоем окисла с образованием легколетучего соединения SiF_4 , которое быстро удаляется с поверхности подложки. Так происходит плазмохимическое травление кремния. Наличие азота в данной смеси способствует ионизации кислорода в условиях низкотемпературной плазмы.

Анизотропное травление кремния проводят в различных газовых смесях, которые позволяют выбрать нужный коэффициент анизотропии. Если в качестве коэффициента анизотропии K взять отношение скорости травления кремния по плоскости (100) к скорости травления кремния по плоскости (111), то использование газовой смеси с реактивным составом $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ дает $K = 30$, с составом $(\text{C}_2\text{F}_6 + \text{O}_2)$ $K = 1,1$, с составом $(\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4 + \text{O}_2)$ $K = 0,8$.

Наиболее широкое распространение метод плазмохимической обработки находит в технологическом процессе фотолитографии для удаления фоторезиста с поверхности подложек.

В качестве активного газа для удаления фоторезистов используют смесь кислорода, азота и водорода. Активными частицами, вступающими в химическую реакцию с фоторезистом, являются атомарный кислород и озон, возникающие благодаря диссоциации молекул кислорода в плазме газового разряда. Добавление небольшого количества азота и водорода (около 1 %) приводит к увеличению скорости удаления фоторезистивной пленки с поверхности подложки.

Для осуществления плазмохимического метода обработки подложек обычно используют ВЧ газоразрядную плазму низкого давления. Газовый разряд в реакционной камере возбуждается либо индуктором, либо электродами, которые находятся вне реакционной камеры. Это обеспечивает чистоту химических процессов плазменной обработки материалов подложки, так как в этом случае не происходит взаимодействие плазмы с материалами электродов.

1.1.13. Контроль качества очистки

Существует много методов количественного и качественного контроля загрязнений поверхности. Большинство из них применяется в лабораторных условиях при отработке технологии. Для оценки качества очистки в промышленном производстве наиболее широко применяются легковыполнимые и не требующие сложного оборудования методы.

Метод светящихся точек основан на использовании явления рассеяния света на находящихся на контролируемой поверхности механических загрязнениях, островках оксидов, конгломератных образованиях, а также на дефектах (выколах, царапинах). Конгломератные образования возникают в результате коагуляции кремниевой кислоты под действием ионов металла Na^+ , Ag^+ , Ca^+ , Ba^+ , Zn^+ или ряда органических загрязнений. Наличие кремниевой кислоты объясняется тем, что на чистой поверхности кремния всегда имеются собственные оксидные слои и адсорбированная влага.

Контроль состоит в наблюдении поверхности пластин в темном поле оптического микроскопа (МБИ-11, ММУ-3) и подсчете числа светящихся точек. Косое освещение исключает попадание в поле зрения наблюдателя отраженных от чистой поверхности пластин лучей. Количество светящихся точек в поле зрения при определенном увеличении микроскопа является критерием оценки качества очистки.

Метод капли, или измерения краевого угла смачивания, основан на способности воды смачивать поверхности чистых или загрязненных высокополярными веществами пластин или подложек и не смачивать поверхность, загрязненную жирами.

На поверхность пластины с помощью дозирующего устройства наносится капля воды или часового масла. С помощью оптической системы установки УКУС-1 увеличенное изображение капли проецируется на экран, где и измеряется линейкой с отсчетом в градусах краевой угол смачивания поверхности. Для чистых поверхностей пластин и подложек краевой угол смачивания маслом не должен превышать $1...3^\circ$.

1.1.14 Осаждение гальванических покрытий

На различных этапах технологического процесса изготовления многих типов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на исходные полупроводниковые пластины (подложки) осаждают различные по толщине и форме металлические слои. Эти слои образуются в результате протекания электрического тока через два электрода (одним из электродов обычно является исходная подложка) и электролит определенного состава. В основе процесса осаждения металлов электролитическим способом лежит реакция катодного восстановления.

В полупроводниковой технологии осаждение гальванических покрытий применяют для получения омических контактов к исходной полупроводниковой подложке, создания электродных выводов, контактных площадок и токоведущих дорожек, нанесения многослойных металлических композиций, изготовления шариковых и консольных элементов.

На электролитический процесс осаждения металла на полупроводниковую подложку оказывают влияние многие факторы: состав электролита, химический состав материалов электродов, электродный потенциал в данном электролите, значение и направление электрического тока, проходящего через электролит, температура электролита и др.

Особое внимание при проведении процессов гальванического осаждения металлов следует обращать на чистоту используемых электролитов. В готовом электролите не должно быть примесей, изменяющих состав осаждаемых пленок и их электрофизические свойства. Так, присутствие в электролите донорных примесей приводит к тому, что на полупроводниковом материале с дырочной электропроводностью нельзя получить хорошие омические контакты. Присутствие в электролите побочных примесей мо-

жет привести к отслаиванию, шелушению или вздутию металлической пленки, а также к неравномерности толщины осаждаемого слоя. Примеси могут попадать в электролит из стальной, медной, бронзовой, никелевой, алюминиевой и другой посуды, в которой он временно находится. Поэтому в производстве полупроводниковых приборов и ИМС электролиты необходимо готовить и содержать только в керамической, стеклянной, винилпластовой, кварцевой или фторопластовой посуде.

Примеси в электролит могут попадать и из воды, которая является их составной частью. Обычная водопроводная и даже дистиллированная вода содержит большое количество различных ионов металлов. Поэтому в полупроводниковом производстве для приготовления электролитов используют только деионизованную воду.

Кроме того, нежелательные примеси могут попадать в электролит из материала анода, который необходимо контролировать по чистоте и составу входящих компонентов. Для устранения примесей, попадающих на материал анода в процессе его механической обработки (прокатки, штамповки,ковки, токарной обработки), готовые аноды подвергают специальному травлению и тщательной промывке в деионизованной воде.

К исходным материалам, используемым для приготовления электролитов, предъявляются специфические требования, связанные с технологическим процессом осаждения: нагревостойкость, растворимость в кислотах, щелочах и воде, стойкость к дневному свету, стойкость к длительному хранению, неизменяемость состава во времени и безвредность. Материалы, из которых готовят электролит, не должны выпадать в осадок при взаимодействии с другими составными частями электролита. При изменении режима электролитического осаждения (температуры, плотности тока, скорости перемешивания) электролит не должен образовывать пузырей, твердых осадков и газовых выделений.

Электрический ток, проходящий через электролит в процессе осаждения, может быть постоянным (не меняющимся во времени) и переменным (изменяющимся во времени). Вид электрического тока выбирают в зависимости от требований, которые предъявляют к свойствам осаждаемых пленок.

Процесс осаждения гальванических покрытий можно разделить на четыре стадии. Первая стадия включает в себя образование заряженных ионов металла в объеме электролита под действием электрического тока.

Вторая стадия состоит в переносе заряженных ионов металла из объема электролита к поверхности полупроводниковой подложки (катода). Третья стадия представляет собой собственно электрохимическую реакцию, в ходе которой заряженные ионы превращаются в адсорбированные ионы – атомы на поверхности полупроводниковой подложки. На четвертой стадии идет процесс диффузии адсорбированных на поверхности подложки ионов к местам роста металлической пленки.

В промышленном производстве полупроводниковых приборов и ИМС используются гальванические покрытия из меди, никеля, серебра, золота, олова, цинка, кадмия, хрома и индия.

Одним из наиболее распространенных в полупроводниковой технологии является *процесс осаждения золотых пленок* на поверхности полупроводниковых подложек. Этот процесс позволяет получать покрытия, способные выдерживать любую химико-техническую обработку в самых агрессивных средах, содержащих плавиковую, азотную и уксусную кислоты.

Для осаждения *золотых покрытий* используется четыре типа электролитов: щелочные, слабощелочные, нейтральные и кислотные. Наиболее часто применяют щелочные электролиты. Кроме основных компонентов (комплексной золотой соли и свободного цианида) в электролиты могут входить различные добавки, улучшающие качество золотого покрытия и его электрофизические свойства.

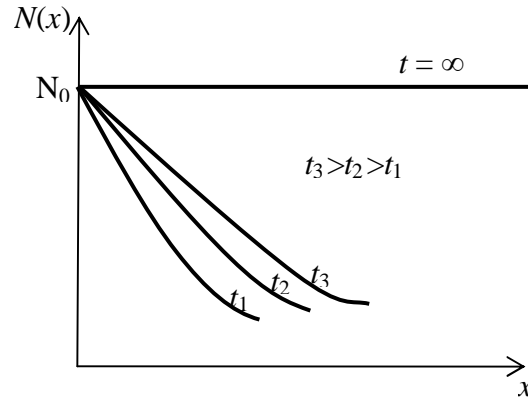
1.2. Легирование полупроводниковых пластин

1.2.1. Диффузия примесей

1.2.1.1. Распределение примесей при диффузии. При формировании полупроводниковых ИМС встречаются два случая диффузии: из бесконечного и ограниченного источников. Под диффузией из бесконечного (постоянного) источника понимают такое состояние системы, когда количество примеси, уходящее из приповерхностного слоя полупроводникового материала, восполняется равным количеством, поступающим извне. При этом поверхностная концентрация примеси остается постоянной, но резко убывает по глубине перехода (рис. 1.15).

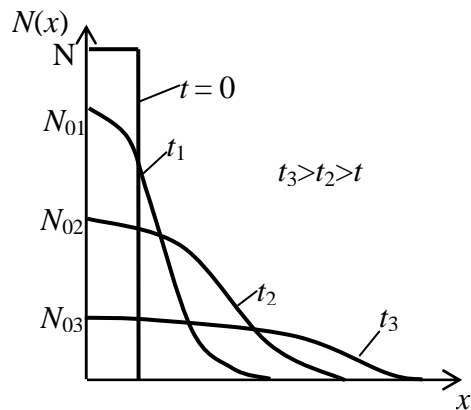
При использовании ограниченного источника (рис. 1.16) в приповерхностном слое имеется конечное количество атомов примеси, уходящие атомы не восполняются и поверхностная концентрация примеси со временем уменьшается.

Рис. 1.15. Распределение примеси $N(x)$ при диффузии из бесконечного (постоянного) источника по толщине пластины x ; N_0 – поверхностная концентрация



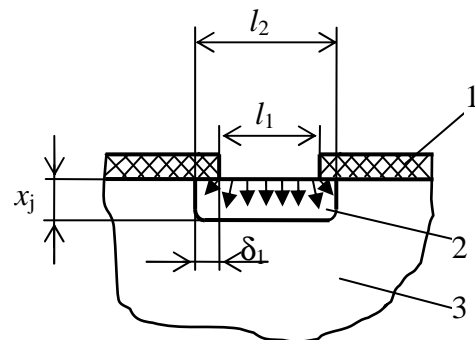
Показанное на рис. 1.16 распределение $N(x)$ соответствует гауссовскому распределению. Реальное распределение значительно сложнее за счет влияния диффузии, протекающей в других направлениях, отличных от нормали к поверхности пластины, и наличия примесей, ранее введенных в материал.

Рис. 1.16. Распределение примеси $N(x)$ при диффузии из ограниченного источника по толщине пластины x : N_{01}, N_{02}, N_{03} – поверхностные концентрации в момент времени t_1, t_2, t_3 соответственно; N_0 – исходная поверхностная концентрация



1.2.1.2. Способы проведения диффузии. При локальной диффузии следует учитывать искривление ее фронта у края окна в маскирующем оксиде (рис. 1.17), которое увеличивает размеры диффузионной области на $2\delta_1$ и влияет на форму р-п-перехода. В структурах с малыми размерами окон глубина р-п-переходов может быть завышена и неоднородна по пластине. Значения δ_1 могут достигать $0,8x_j$.

Рис. 1.17. Схема локальной диффузии: 1 – маскирующий оксид; 2 – диффузионная область; 3 – пластина; l_1 – размер окна в оксиде; l_2 – размер полученной диффузионной области; $\delta_1 = (l_2 - l_1)/2$ – уширение диффузионной области за счет искривления фронта диффузии; x_j – глубина р-п-перехода



При создании активных и изолирующих областей ИМС часто используют двухстадийную диффузию (рис. 1.18). Для этого вначале в поверхность полупроводникового материала 2 с нанесенным на нее маскирующим слоем оксида 1 вводят определенное количество легирующей примеси из бесконечной источника, создавая ее высокую поверхностную концентрацию при небольшой глубине диффузионной области («загонка» примеси) (рис. 18, а, б).

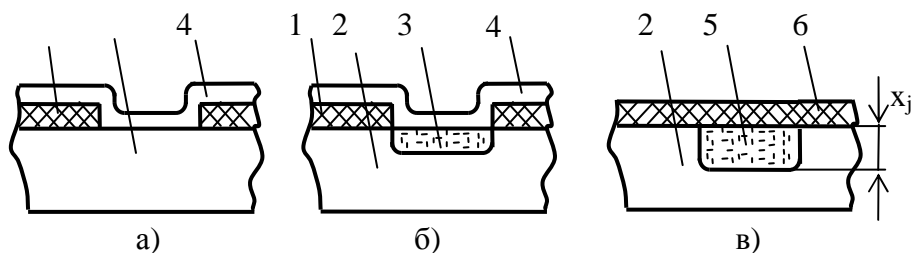


Рис. 1.18. Стадии «загонки» (а, б) и «разгонки» (в) примеси при проведении двухстадийной диффузии: 1 – маскирующий оксид; 2 – пластина; 3 – объемный источник; 4 – примесно-силикатное стекло; 5 – диффузионная область после разгонки; 6 – маскирующая пленка для последующей литографии

Первую стадию проводят при сравнительно невысоких температурах (950 – 1050 °С) в окислительной атмосфере. На поверхность наносят слой примесно-силикатного стекла 4 (поверхностный источник), под которым формируется высоколегированный объемный источник 3 (см. рис. 1.18, б).

Вторую стадию – диффузионный отжиг, называемую «разгонкой» (см. рис. 1.18, в), проводят, предварительно удалив примесно-силикатное стекло. Температура второй стадии выше и составляет 1050 – 1230 °С. Примеси, введенные на первой стадии, перераспределяются, их поверхностная концентрация уменьшается, а глубина проникновения в полупроводниковый материал увеличивается до заданной x_j . Создается требуемая диффузионная область 5. Температура и длительность второй стадии диффузии определяются заданными параметрами р-п-перехода. Процесс ведут в окислительной среде, одновременно формируя маскирующую пленку 6 для последующей фотолитографии.

1.2.1.3. Многостадийная диффузия. Необходимость проведения двухстадийной диффузии при легировании бором связана с тем, что требуется получить распределение со сравнительно невысокой поверхностной концентрацией, а с помощью одностадийной диффузии это трудно выполнимо. Для других примесей двухстадийная диффузия обеспечивает задан-

ные параметры р-n-переходов и возможность получения маскирующего оксида. Двухстадийную диффузию проводят различными способами. Наиболее широко в технологии производства ИМС используют способ диффузии в открытой трубе (рис. 1.19). Он является основным для первой стадии.

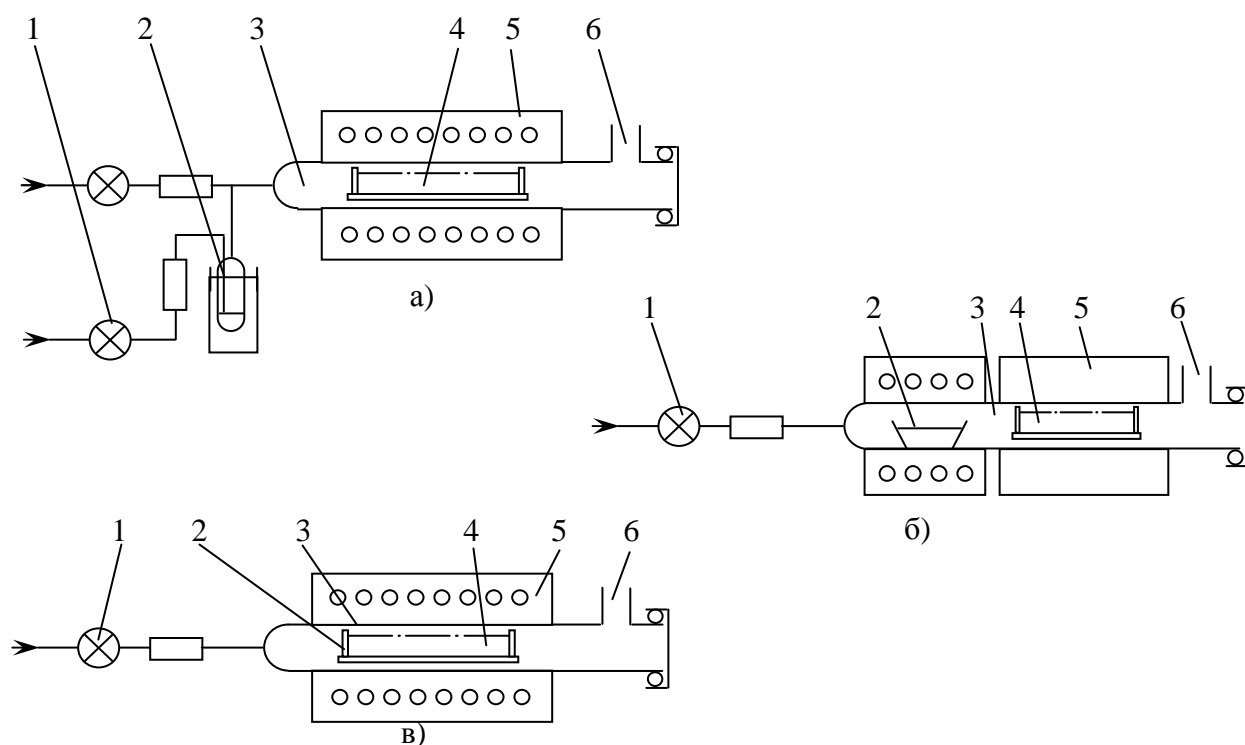
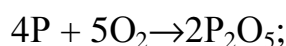
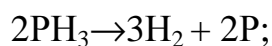


Рис. 1.19. Схема процесса диффузии в открытой трубе из газообразного или жидкого (а), твердого (б) и поверхностного (в) источников: 1 – газовая система; 2 – источник примеси; 3 – кварцевая труба; 4 – кремниевые пластины; 5 – нагреватель; 6 – выходное отверстие

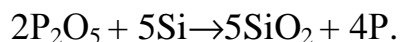
Кремниевые пластины 4 (от 50 до 200 шт.) загружают в кассете в кварцевую трубу 3 через ее выходной конец, сообщающийся с атмосферой. Входной конец трубы соединен с газовой системой 1 подачи газаносителя.

Газообразные диффузаны подаются из баллона и перед входом в реактор смешиваются с азотом и кислородом. В зоне реакции образуется оксид легирующего элемента, а на поверхности кремниевых пластин выделяется элементарная примесь. Например, процесс диффузии фосфора сопровождается реакциями:

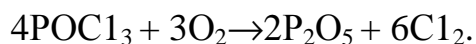
– в трубе



– на поверхности Si:



Пары жидких диффузантов из дозатора разбавляются газом-носителем и также образуют оксиды соответствующих элементов, например:



Диффузия из газообразных и жидких источников проводится в одноступенчатой диффузионной печи с резистивными нагревателями 5 (см. рис. 1.19, *а, в*).

При проведении диффузии из твердого источника в ряде случаев используют двухзональные печи с нагревателем 5 (см. рис. 1.19, *б*). При этом в низкотемпературной зоне помещают источник примеси 2, а в высокотемпературной – кассету с пластинами 4. Газ-носитель, поступающий из системы подачи 1, вытесняет из кварцевой трубы воздух, который удаляется через отверстие 6. Проходя через зону источника примеси, газ-носитель захватывает атомы примеси и переносит их в зону расположения пластин. Атомы адсорбируются на поверхности и диффундируют вглубь кремниевых пластин.

В качестве поверхностного источника используют легированные оксиды, примесно-силикатные стекла, пленки металлов, (например, золота), слои легированного поликристаллического кремния. Диффузию проводят в слабоокислительной среде.

Способ диффузии в открытой трубе позволяет легко управлять составом парогазовой смеси, скоростью потока газа и обеспечивает требуемый профиль распределения примесей. Воспроизводимость параметров диффузии от пластины к пластине и по площади каждой пластины зависит от распределения температуры в рабочей зоне печи, числа пластин, их расположения относительно газового потока, типа диффузанта, чистоты проведения процесса.

Диффузию в замкнутом объеме (ампульный способ) проводят в кварцевой ампуле 2, в которую помещают пластины 4 и источник примеси 5, откачивают ее до остаточного давления $10^{-2} - 10^{-3}$ Па или заполняют инертным газом и запаивают (рис. 1.20). Перед использованием ампулу тщательно очищают и прокаливают в вакууме при температуре 1200 °С в течение двух часов. Ампулу вводят в кварцевую трубу 1 диффузионной печи с нагревателем 3. При нагревании источника пары примеси осаждаются на поверхности полупроводниковых пластин и диффундируют вглубь.

Ампульным способом можно проводить диффузию мышьяка, бора, сурьмы, фосфора с однородностью легирования до $\pm 2,5\%$. Его достоинством является минимальная токсичность, так как процесс происходит в замкнутом объеме.

После проведения процесса ампулу разрушают (вскрывают). То, что она применяется для одноразового использования, сильно удорожает процесс. В настоящее время ампульный способ применяют преимущественно при диффузии мышьяка.

Диффузия в полугерметичном объеме (бокс-метод) является промежуточным способом между диффузией в открытой трубе и в ампуле. Так же, как в последнем случае, пластины 4 и источник примеси 5 помещают в кварцевую ампулу (бокс) 2, но не запаивают ее, а закрывают пришлифованной кварцевой крышкой 7, обеспечивающей небольшой зазор (рис. 1.21). Ампулу помещают у выходного отверстия 6 кварцевой трубы 1 диффузионной печи с нагревателем 3, через которую продувают инертный газ. Газ уносит следы кислорода и влаги из ампулы, после чего ее закрывают крышкой и проводят диффузионный процесс.

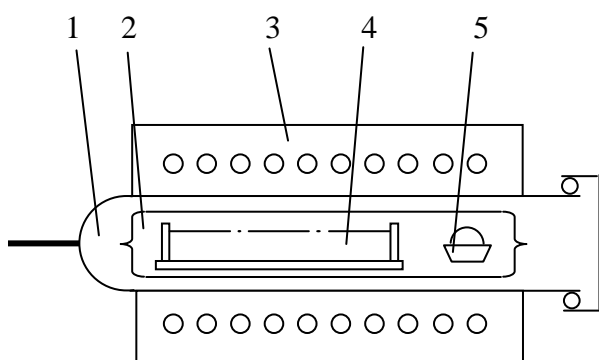


Рис. 1.20. Схема процесса диффузии в замкнутом объеме: 1 – кварцевая труба; 2 – ампула; 3 – нагреватель; 4 – кремниевые пластины; 5 – источник примеси

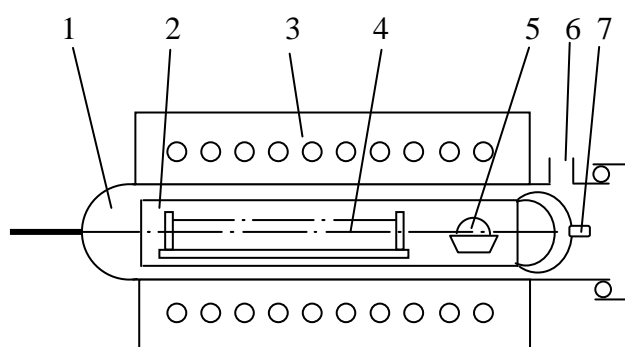


Рис. 1.21. Схема процесса диффузии бокс-методом: 1 – кварцевая труба; 2 – ампула; 3 – нагреватель; 4 – кремниевые пластины; 5 – источник примеси; 6 – выходное отверстие; 7 – пришлифованная крышка

По сравнению с диффузией в открытой трубе бокс-метод менее чувствителен к скорости потока газа-носителя и позволяет в более широких пределах регулировать поверхностную концентрацию примеси. Преимуществом перед ампульным способом является возможность многократного применения кварцевой ампулы.

1.2.2. Ионное легирование полупроводников

1.2.2.1. Особенности ионного легирования. Ионная имплантация позволяет не только существенно повысить эффективность, снизить себестоимость и процент брака при производстве некоторых существующих типов полупроводниковых приборов, но и создавать принципиально новые приборы. Например, при создании высокоомных резисторов обычной технологией возникали трудности из-за больших размеров этих резисторов. Если же использовать ионное легирование, то можно довольно легко получить высокоомные слои с небольшими размерами. При применении ионной технологии были получены, а затем качественно улучшены варакторы, IMPATT-диоды, МОП-транзисторы.

Наряду с легированием полупроводников ионные лучи находят применение и для травления материалов. В основу положен факт приблизительного равенства объемов веществ различной природы, распыляемых частицами малых энергий. Следовательно, распыление пленки фоторезиста и материала в окнах этой пленки происходит примерно с одной скоростью. В данном процессе полностью отсутствует подтрав фигур травления и поэтому очень точно воспроизводится рисунок фоторезиста.

Новые возможности применения ионного луча, такие, как ионолитография, селективное осаждение пленок из ионных пучков и др., открывают широкие перспективы ионно-лучевой технологии для создания полупроводниковых приборов и ИМС.

Технологическое оборудование, использующее ионные лучи, различается по своему конструктивному решению, мощности, степени автоматизации. Однако все оно основано на одинаковом принципе действия. Сущность метода ионного легирования заключается в том, что ионы элементов, сепарированные в электромагнитном поле и ускоренные до высоких энергий ионным ускорителем, бомбардируют пластину полупроводника (мишень), в результате чего внедряются в нее, создавая определенное распределение концентрации примеси (до $10^{11} - 10^{16}$ ион/см²) в приповерхностном слое.

Достоинствами метода являются:

- 1) полная совместимость с процессами планарной технологии;
- 2) однородность и равномерность области легирования;
- 3) особо чистые условия процесса;
- 4) контролируемое введение примесей.

Основной недостаток метода: нарушение кристаллической структуры кремния и SiO₂.

В настоящее время ионная имплантация применяется:

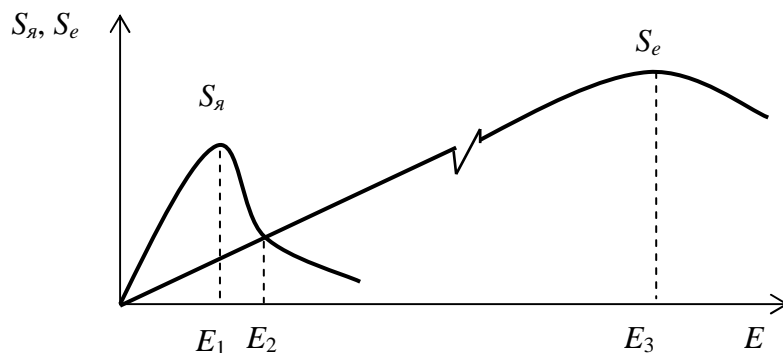
- 1) в биполярной технологии для формирования скрытых низкоомных слоев, эмиттерных областей и контактов к базе;
- 2) в СВЧ приборах (методами ионной имплантации формируют активные области транзисторов);
- 3) в быстродействующих биполярных транзисторах (отдельные области транзисторов изолируются друг от друга с помощью участков, полученных ионной имплантацией);
- 4) в технологии МОП-приборов (приборы с самосовмещенными затворами).

Рассмотрим параметры полупроводниковых структур, получаемых при ионном легировании: концентрацию легирующей примеси, глубину проникновения ионов, степень нарушения кристаллической решетки.

Глубина проникновения легирующей примеси зависит от энергии и типа бомбардирующих ионов, а также атомной и кристаллической структуры мишени-подложки. Концентрация внедренной примеси зависит от дозы имплантации (число ионов на 1 см^2 облучаемой поверхности). Глубина проникновения обычно не превышает $0,5 - 0,9 \text{ мкм}$.

Рассмотрим явления, протекающие при ионной имплантации. Ускоренные ионы, внедряясь в твердое тело, начинают тормозить. При этом возможны либо эффект каналирования и упругие соударения с ядрами атомов мишени или связанными электронами мишени, либо выбивание ядер атомов из узлов кристаллической решетки. При этом имплантированный ион может либо выбить ядро решетки, либо застрять в междоузлии. Необходимо, чтобы ион занял место в узле кристаллической решетки, т.е. чтобы он был активным, а не точечным дефектом. Потери энергии имплантируемого иона складываются из потерь энергии при рассеянии на ядрах и электронах. Характер зависимостей электронной S_e и ядерной S_j тормозных способностей от энергии имплантируемого иона приведен на рис. 1.22.

Рис. 1.22. Зависимости электронной S_e и ядерной S_j тормозных способностей от энергии имплантируемого иона



Численные значения энергий E_1, E_2, E_3 (в кэВ) для имплантированных ионов фосфора и бора в кремний приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения энергий E_1, E_2, E_3 (в кэВ) для имплантированных ионов фосфора и бора в кремний

Элемент	E_1	E_2	E_3
В	3	17	$3 \cdot 10^3$
Р	17	140	$3 \cdot 10^4$

Для технологии ионного легирования интересна область энергий от S_y до S_e . Под действием ионной бомбардировки в приповерхностном слое пластины накапливаются дефекты, и каждая последующая порция ионов движется в иных условиях (по сравнению с предыдущей). Поэтому конечный профиль распределения примесей представляет собой суперпозицию многих элементарных профилей. Теоретическое описание эффекта торможения ионов в твердых телах является весьма сложным и описывается выражением

$$dx = \frac{dE}{N_a(S_y + S_e)}, \quad (1.4)$$

где x – глубина проникновения иона в мишень; E – начальная энергия иона; N_a – число атомов в единице объема мишени.

Торможение в монокристаллах дает «хвосты» распределения, главным образом, в конце пути движения ионов. Это обусловлено эффектом каналирования. В настоящее время рассчитаны и табулированы значения пробегов для многих используемых на практике систем ион – мишень.

Распределение имплантированных ионов определяется их средним пробегом \bar{R} , стандартным отклонением ΔR и дозой имплантации D_u по формуле Гаусса

$$N_v(x) = \frac{D_u}{\Delta R \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{R})^2}{2 \cdot \Delta R^2} \right]. \quad (1.5)$$

При этом максимальная концентрация внедренной примеси

$$N_{v \max} = \frac{D_u}{\Delta R \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}. \quad (1.6)$$

Приведем пример (рис. 1.23) теоретических кривых распределения ионов бора в кремнии при дозе имплантации $D_u = 10^{15}$ ион/см².

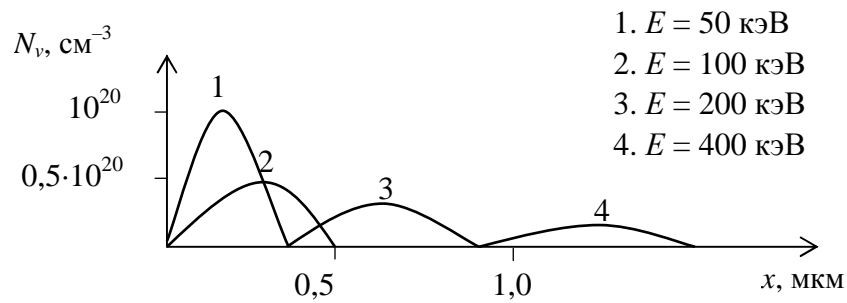


Рис. 1.23. Распределение ионов бора в кремнии

1.2.2.2. Дефектообразование. Рассмотрим механизм образования дефектов при ионном легировании. Ион при бомбардировке мишени передает часть своей кинетической энергии атомам мишени. Если эта энергия превышает пороговую энергию, близкую к значению энергии связи в кристалле, то атом мишени выбивается из узла решетки и движется произвольным образом в кристалле. При этом он может выбивать соседние атомы из узлов, а те – другие, и т.д., т.е. возникает каскад атомных столкновений. Тяжелые и легкие атомы ведут себя по-разному, и дефекты, образуемые ими, выглядят также по-разному.

Кластер дефектов – это пространство, занимаемое сложным древовидным рисунком этих дефектов. При увеличении дозы имплантации отдельные кластеры перекрываются и образуется аморфный слой определенной толщины.

Число дефектов зависит от атомного номера, энергии, дозы, степени каналирования имплантируемых ионов и температуры мишени.

Рассмотрим кривые распределения примесных атомов и дефектов при бомбардировке кремния ионами бора с различной энергией – рис. 1.24.

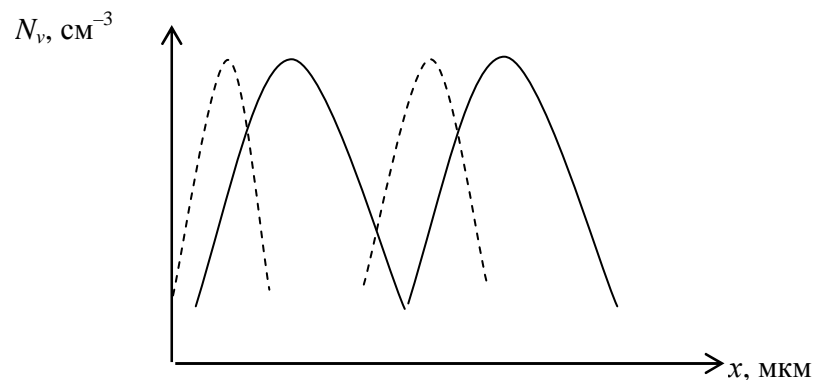


Рис. 1.24. Кривые распределения примесных атомов (пунктирная линия) и дефектов (сплошная линия) в кремнии при ионном легировании бором

Характерно, что кривые распределения дефектов запаздывают по отношению к кривым распределения примесных атомов в области малых глубин проникновения внедряемых ионов. Это объясняется тем, что энергии внедряемого атома в конце его движения еще достаточно для некоторого продвижения вглубь кристаллической решетки, однако уже может быть недостаточно для генерирования дефектов. Данный эффект необходимо учитывать, т.к. аморфизация происходит в приповерхностном слое и сопротивление глубинных легированных слоев значительно меньше сопротивления верхних аморфных слоев. Следует отметить также, что концентрация дефектов увеличивается при увеличении масс имплантируемых ионов. При каналировании профиль распределения дефектов сдвигается вглубь мишени-подложки.

Рассмотрим процессы, оказывающие влияние на подложку при увеличении температуры мишени. В этом случае уменьшается эффект каналирования и, следовательно, увеличивается число дефектов. Однако в этом случае происходит отжиг дефектов и, следовательно, уменьшается их количество. Поэтому следует стремиться к выбору оптимальной температуры при проведении процесса.

Количество дефектов связано с аморфизацией материала. Различают поверхностную, внутреннюю и сплошную аморфизацию. Достаточно 1/25 часть атомов сместить из узлов решетки, чтобы произошла аморфизация слоя. Характерным признаком аморфизации является изменение окраски полупроводниковой пластины, например, кремний становится светлее и приобретает молочную окраску. Аморфная область легко «запотевает» при помещении холодной пластины во влажную атмосферу. При высоких температурах мишени, например, для кремния при температуре выше 600 °С аморфные слои вообще не образуются, хотя и образуются дефекты.

1.2.2.3. Отжиг дефектов. Образование дефектов ведет к изменению свойств материала. Это изменение может быть вредным, незаметным или полезным. Для полупроводниковых материалов оно нежелательно, поскольку радиационные дефекты уменьшают подвижность и время жизни носителей заряда. Наиболее чувствительны к радиационным дефектам такие характеристики полупроводников, как время жизни неосновных носителей заряда τ_s , поверхностное сопротивление ρ_s , поверхностная N_s и объемная N_v концентрации носителей, подвижность μ_v неосновных носителей заряда в легированном слое, распределение μ_v и N_v по глубине слоя.

Эффективность легирования принято оценивать отношением объемной концентрации носителей заряда N_v к поверхностной N_s .

Отжиг, проводящийся при температурах 800 – 1000 °С, повышает скорость диффузии атомов. Легирующие примеси занимают преимущественно узлы решетки и становятся электрически активными, играя роль доноров или акцепторов. При этом вероятность занять место в решетке для различных атомов различна. Так, тяжелому атому III группы (Ga, In, Te) труднее занять место в узле решетки, чем легкому бору. Поэтому при легировании наиболее часто применяют бор.

При термической обработке структуры протекают одновременно несколько процессов: диффузия примесей, отжиг дефектов, ассоциация или диссоциация ранее образованных дефектных комплексов. Влияние температуры на концентрацию атомов внедренной примеси в узлах кристаллической решетки носит довольно сложный характер – рис. 1.25.

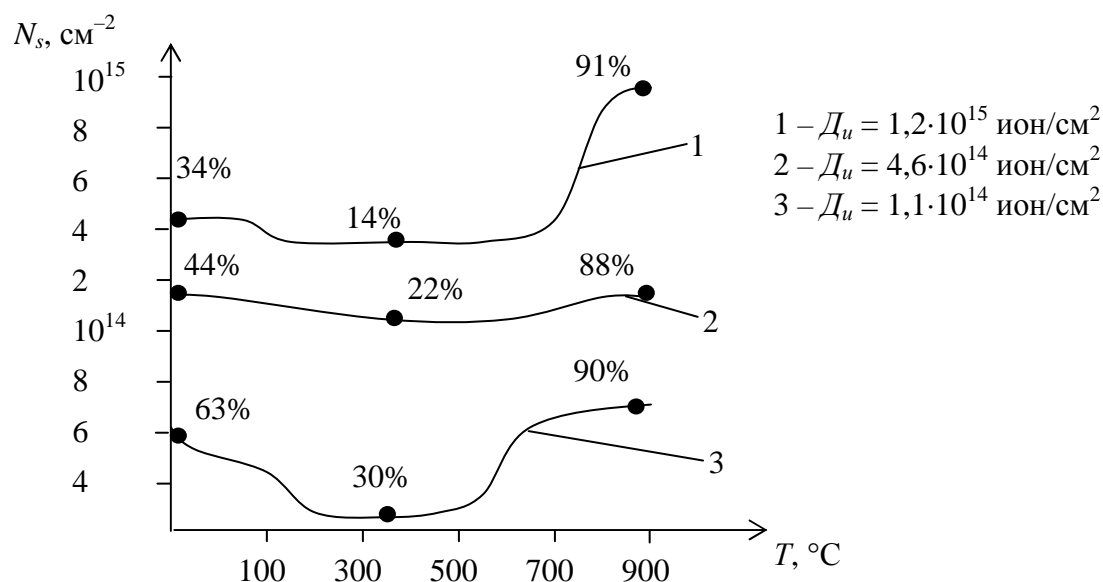


Рис. 1.25. График зависимости концентрации атомов бора в узлах решетки кремния и процента замещения от температуры

Уменьшение степени замещения при 200 – 600 °С объясняется тем, что при этих температурах вследствие отжига дефектов из междоузлий освобождаются атомы кремния, вытесняющие бор из занятых им узлов решетки. При повышении температуры степень замещения вновь увеличивается. При увеличении степени замещения увеличивается концентрация носителей заряда, а, следовательно, и электропроводность. Уже при 500 °С максимум кривой распределения сдвигается к поверхности из-за преимущественной активации бора в области, где концентрация дефектов велика. При температурах выше 900 °С профили распределения заметно расширяются за счет аномальной диффузии.

Следует отметить, что при высоких дозах ($D_u \geq 10^{17}$ ион/см²) такая деформация кривой распределения происходит уже при 800 °С.

Исторически первым методом термического отжига было выдерживание обрабатываемых пластин в печи при температуре порядка 1000 °С в течение 30 мин и более. Это позволяло лишь частично достичь требуемой цели и при этом приводило к значительной разгонке примесей, что отрицательно влияло на характеристики полупроводниковых компонентов и ограничивало степень их миниатюризации, а также приводило к появлению загрязнений поверхности и дополнительных деформаций пластин, связанных с достаточно длительной термообработкой. По мере сокращения минимальных размеров структур и повышения степени интеграции перечисленные недостатки стали приводить к значительному снижению выхода годных кристаллов. Поэтому в современной технологии СБИС широко используются методы быстрого термического отжига (БТО) с помощью импульсных газоразрядных ламп, обработки поверхности пластины электронным пучком и обработки лучом лазера.

Суть методов БТО состоит в мощной термической обработке поверхности пластины в течение очень короткого времени. При этом активация атомов примесей и устранение дефектов происходят практически без заметной разгонки, то есть профиль концентрации примесей сохраняется, что очень важно при производстве СБИС.

Метод лазерного отжига обладает рядом важных достоинств:

- возможность строго контролировать обрабатываемую область пластины;
- возможность управлять глубиной залегания легирующей примеси посредством изменения длительности и интенсивности импульсов лазерного излучения;
- отсутствие дополнительных нарушений кристаллической структуры в объеме пластины, так как локально нагреваются лишь приповерхностные области;
- вследствие большой скорости лазерного отжига устраняется необходимость его проведения в вакууме или специальной инертной среде для предотвращения окисления или загрязнений.

В зависимости от типа используемой лазерной установки различают импульсный и непрерывный режимы обработки.

Твердотельные лазеры используются в импульсном режиме. Длительность импульсов находится в пределах 10 – 100 нс, плотность падающей на поверхность энергии составляет 0,5 – 10 Дж/см². При этом проис-

ходит локальное расплавление поверхностного слоя и последующая рекристаллизация. Время существования расплава составляет около 700 нс. Коэффициент диффузии типичных примесей в расплаве возрастает с $10^{-13} - 10^{-14}$ см²/с до $10^{-4} - 10^{-3}$ см²/с. Диффузионная длина примесей в данном случае не превышает десятков нм, т.е. профиль концентрации примеси при лазерной обработке изменяется незначительно.

Короткое время существования расплава обуславливает еще одно важное качество лазерного отжига: не происходит выпадения примеси в том случае, когда ее концентрация превышает предел растворимости.

В промышленных установках, работающих в импульсном режиме, используют рубиновые или стеклонеодимовые лазеры.

При использовании лазерного отжига в непрерывном режиме (аргоновый лазер или СО₂-лазер) лазерный луч непрерывно сканирует поверхность пластины со скоростью, достаточной для нагрева поверхности до температуры несколько ниже точки плавления. В этом случае, так же как и в импульсном режиме, происходит полное восстановление кристаллической структуры и активация атомов примесей. Но поскольку плавления не происходит, перераспределение легирующих примесей практически отсутствует и кристалл сохраняет профиль и высокий уровень легирования, что также важно при формировании структур СБИС.

Скорость сканирования в непрерывном режиме находится в интервале 0,5 – 10 см/с. Типовая величина потока энергии составляет 200 Дж/см². В данном режиме подложку обычно подогревают до 200 – 400 °С для уменьшения термических напряжений.

Поскольку лазерный отжиг осуществляется при помощи сканирования сфокусированного луча, для обработки всей пластины требуется определенное время.

При использовании дуговых и мощных газоразрядных импульсных ламп можно сразу осветить большую площадь, что позволяет существенно сократить время отжига. Однако в этом случае плотность мощности излучения значительно меньше, чем при использовании лазера. Требуется более продолжительное импульсное воздействие излучения на пластину, в результате чего глубина проникновения тепла уже не является пренебрежимо малой по сравнению с толщиной пластины. Поэтому в случае отжига при помощи ламп диффузию примесей нельзя считать пренебрежимо малой, что составляет основной недостаток метода.

Отжиг при помощи электронного луча используется либо в импульсном режиме, когда облучается вся пластина одновременно, что повышает производительность, либо в непрерывном – сканированием сфокусированным лучом.

Существенными преимуществами электронно-лучевых установок по сравнению с лазерными является их простота и более высокое быстродействие в непрерывном и, особенно, в импульсном режиме. Глубина проникновения в пластину электронного луча практически не отличается от глубины проникновения лазерного излучения, но существенно зависит от ускоряющего напряжения. Дополнительным достоинством импульсного электронного отжига является возможность проводить термообработку через окна в пленке окисла. Свойства изолирующего покрытия практически не изменяются при средних дозах облучения.

К основным недостаткам отжига электронным лучом следует отнести изменение электрических свойств пленок при использовании больших доз облучения, вызванное захватом электронов ловушками, а также повышение плотности дефектов при обработке пучком электронов. Для ликвидации этих отрицательных последствий после интенсивного электронного облучения проводят низкотемпературный отжиг при температуре порядка 500 °С.

При ионном легировании используют маскирование, т.е. на определенную часть полупроводниковой пластины наносят пленку маскирующего материала с последующим вытравливанием в ней окон (процесс фотолитографии). В качестве масок применяют SiO_2 , Si_3N_4 , фоторезисты, металлические пленки. Последние должны быть достаточно толстыми, плохо распыляться и хорошо тормозить ионы.

1.2.2.4. Принцип действия установки ионного легирования. Различают следующие типы установок ионного легирования: малых и средних доз, больших доз с интенсивными ионными пучками и высокоэнергетические. Интенсивность тока ионного пучка в установках малых и средних доз составляет 500 – 800 мкА, а в установках больших доз – 1 – 200 мА. Энергии ионов в вакуумных установках составляют 30 – 200 кэВ.

Установки ионного легирования отличаются потенциалом приемной камеры относительно земли, взаимным расположением приемной камеры, масс-сепаратора и источника ионов.

В установке малых и средних доз (энергия ионов до 200 кэВ) приемная камера находится под потенциалом земли – рис. 1.26.

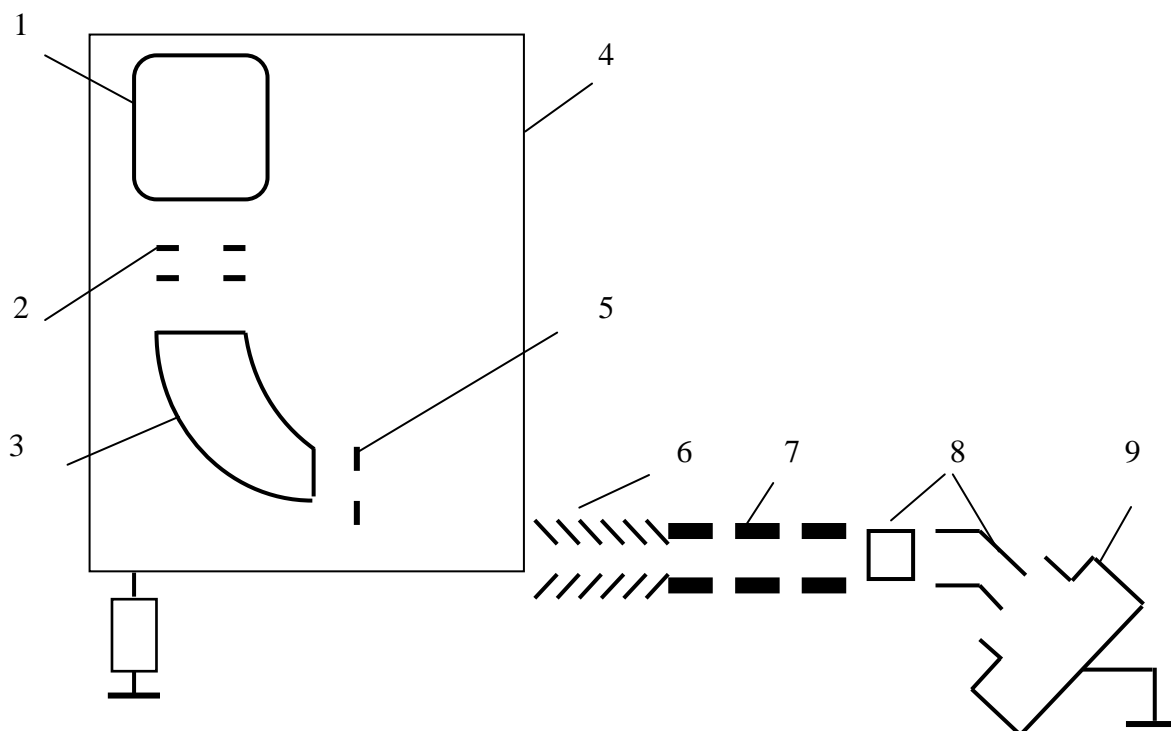


Рис. 1.26. Установка ионного легирования: 1 – источник ионов; 2 – система вытягивания и первичного формирования пучка; 3 – магнитный масс-сепаратор; 4 – высоковольтный модуль; 5 – регулируемая диафрагма; 6 – система ускорения; 7 – фокусирующая линза; 8 – пластины электростатического сканирования и отклонения пучка; 9 – приемная камера

Магнитная сепарация ионов проводится до ускорения. Их энергия в сепараторе низка, что оказывает существенное влияние на уменьшение габаритов установки (можно применять малые магниты, маломощные источники питания электромагнитного сепаратора и ускорительной системы).

Рассмотрим основные элементы установки. Источник ионов предназначен для возбуждения атомов рабочего вещества до энергии, как минимум, большей потенциала его ионизации. В результате получают пучок положительных ионов. Для ионизации используется электрический разряд (рис. 1.27). В данном случае получают пучок ионов конической формы.

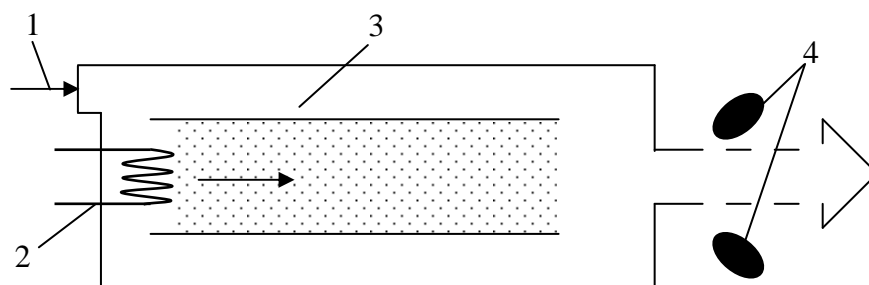


Рис. 1.27. Источник ионов с термокатодом прямого накала: 1 – подача газа; 2 – катод; 3 – анод; 4 – экстрактор (электрод для вытягивания пучка ионов)

Рабочими газами в системе являются водород, гелий, аргон, азот или газообразные соединения – BF_3 , PH_3 . Если используют источники ионов твердого вещества с $T_{\text{парообр.}} < 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, то их предварительно нагревают, ионизируют пары и подают в источник ионов через натекаТЕЛЬ, регулируя скорость испарения изменением температуры нагрева. Если температура парообразования твердых веществ выше $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, то вещества сначала распыляют в атмосфере аргона или ксенона, а затем ионизируют в плазме этого газа.

Масс-сепараторы служат для выделения из общего ионного пучка ионов необходимой массы и заряда, удаления нейтральных атомов и молекул. Масс-сепараторы представляют собой секторные электромагниты. Наиболее часто используются секторные электромагниты с углом поворота 60° и 90° и неоднородным магнитным полем. Они позволяют фокусировать пучок ионов в двух плоскостях и изменять его фокусное расстояние. Фокусировка пучков независимо от массы ионов проводится электростатическими квадрупольными (сдвоенными или строенными) или трехэлектродными линзами.

Система ускорения и формирования пучка представляет собой трубку, состоящую из кольцевых (стеклянных или керамических) изоляторов и металлических электродов, спаянных, склеенных или стянутых между собой. Ускоритель может располагаться как до фокусировки, так и после нее. На рис. 1.26 он расположен до фокусировки, что ведет к снижению мощности источника питания электромагнита и размеров самого магнита (так как энергия ионов после масс-сепаратора низка).

Системы сканирования обеспечивают равномерное облучение пучком ионов всей поверхности мишени в приемной камере. Сканирование может быть электростатическим, электромагнитным, механическим, комбинированным.

Приемная камера служит для размещения, подачи и легирования полупроводниковых подложек. Подложки могут подаваться поштучно или в кассетах.

1.2.2.5. Конструкция автомата ионно-лучевого легирования «Иолла-2». Автомат ионно-лучевого легирования «Иолла-2» имеет следующие основные технические характеристики:

- энергия ионов – $10 - 75 \text{ кэВ}$;
- максимальная температура мишени – плюс $600 \text{ }^\circ\text{C}$;
- предельное давление в рабочей камере – $1 - 10 \text{ мм. рт. ст.}$;
- угол отклонения ионного пучка – 60° ;
- точность измерения введенной дозы – 5% ;
- плотность тока пучка ионов – до 10 мкА/мм .

Принципиальная схема автомата представлена на рис. 1.28.

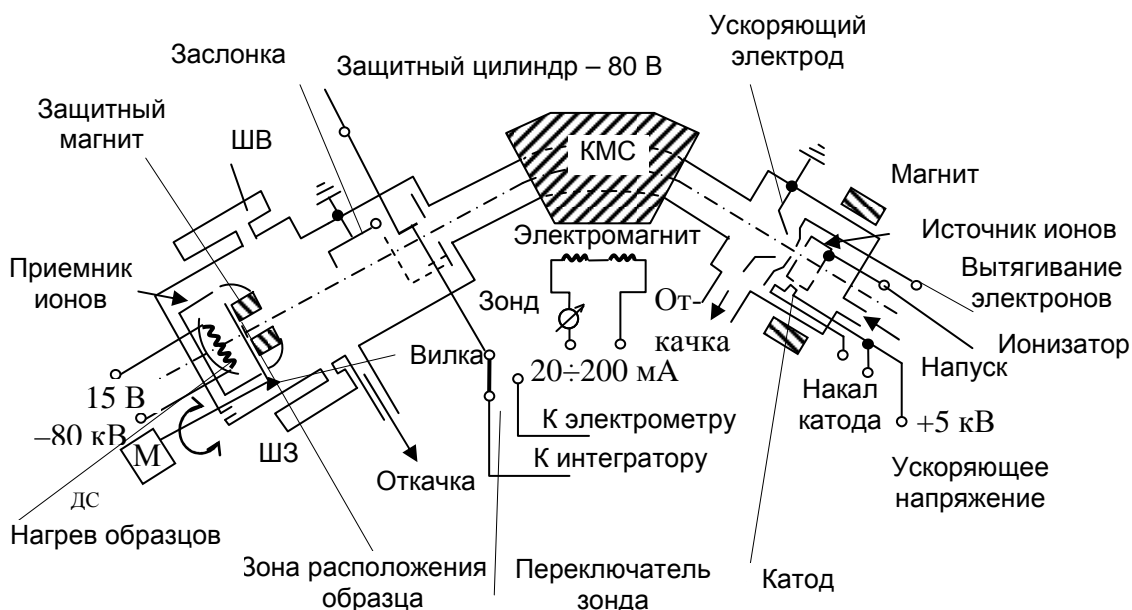


Рис. 1.28. Принципиальная схема ионно-лучевого автомата «Иолла-2»

Схема полностью соответствует рассмотренному принципу построения ионно-лучевых установок. Смесь газа, содержащая легирующий элемент, вводится от источника ионов в ионизационную камеру, где молекулы газа ионизируются электронами, эмитируемыми катодом. Магнитное поле постоянного магнита обеспечивает большую степень ионизации. Образовавшиеся положительно заряженные ионы вытягиваются из щели ионизатора напряжением 1 – 5 кВ и, предварительно ускоренные, поступают в камеру масс-сепаратора (КМС), а оттуда – в рабочую камеру. Щелевая диафрагма, которая располагается перед входом в камеру, пропускает отсепарированный пучок ионов на образец. Контроль тока пучка осуществляется тонким зондом, помещенным на его пути, а весь ток можно определить с помощью заслонки, которая препятствует пучку попадать на образец. Зонд регистрирует порядка 1 % полного тока.

Рабочая камера спроектирована таким образом, чтобы обеспечить автоматическую работу установки. Предусмотрена загрузка и выгрузка образцов без разгерметизации объема рабочей камеры. Для этого служат шлюзовые устройства загрузки (ШЗ), выгрузки (ШВ) и механизм захвата образца для последующей его обработки. Для равномерной обработки по всей площади образца предусмотрено сканирование, которое осуществля-

ется механической разверткой обрабатываемого предмета с помощью механизма сканирования (М). Поскольку обрабатываемая подложка находится под высоким потенциалом (до 80 кВ), весь механизм должен быть надежно изолирован от корпуса. Поэтому он крепится на высоковольтном керамическом держателе-вводе, а привод механизмов от двигателя осуществляется через диэлектрические оси. Ведомый вал приводит в движение вилку, которая совершает колебательное движение вместе с валом и поступательное относительно направляющих, жестко связанных с валом, что обеспечивает равномерную обработку подложки ионным лучом.

После окончания легирования вилка поворачивается и выгружает оправку с образцом в кассету шлюза выгрузки и переходит к шлюзу загрузки для приемки нового образца. Загруженный образец поворачивается в положение для прогрева и легирования. Так повторяется цикл, пока вся серия загруженных заготовок не будет пролегирована. Автомат останавливается и производится смена кассет в шлюзах.

1.3. Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых слоев

1.3.1. Особенности эпитаксиального роста. Стадии процесса

Для создания полупроводниковых приборов и элементов ИМС широко применяют метод эпитаксиального наращивания, или эпитаксию. Ориентированное наращивание слоев вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки называют *эпитаксией*. При этом поступающие извне атомы осаждаемого вещества должны обладать достаточной энергией и способностью мигрировать по поверхности подложки, чтобы формирование кристаллической решетки происходило равномерно и по всей поверхности без образования дефектов. С повышением температуры подложек миграция атомов увеличивается. При низких температурах растущие слои получают поликристаллическими.

Если наращиваемые эпитаксиальные слои по химическому составу не отличаются (или незначительно отличаются) от вещества подложек, то в результате получают гомогенные (от греч. *homogenes* – однородный) p-n-переходы, такой процесс называют *гомоэпитаксией* или *автоэпитаксией* (от греч. *autos* – само).

Процесс ориентированного наращивания эпитаксиальных слоев, существенно отличающихся по химическому составу от вещества подложек и не вступающих с ним в химическое взаимодействие, называют *гетероэпитаксией* (от греч. *heteros* – другой). При этом образуются гетерогенные

(неоднородные) p-n-переходы. Примером может служить эпитаксиальное наращивание слоя арсенида галлия на монокристаллическую подложку из кремния. Гетероэпитаксия существенно расширяет функциональные возможности микроэлектронных устройств. При выборе пары материалов подложка – слой необходимо учитывать параметры их кристаллических решеток, ТКЛР, температуры плавления, коэффициенты взаимной диффузии, упругость пара при температуре процесса и др. При большом несоответствии указанных параметров на границе слой – подложка возникают механические напряжения и дислокации. Переходная область по своим свойствам отличается от свойств объемов по обе стороны границы подложка – слой, что влияет и на процесс роста слоя, и на параметры микросхем.

В производстве микросхем гетероэпитаксия развивается в двух основных направлениях: выращивание полупроводниковых гетеропереходов и наращивание полупроводниковых слоев на диэлектрических подложках.

Выращивание гетеропереходов применяют для создания выпрямителей, работающих на основных носителях (CdSe – Se), туннельных диодов (GaAs – InP, CdS – ZnTe, GaAs – Ga_{1-x}In_xAs), транзисторов с широкозонным эмиттером (GaAs – Ge), инжекционных лазеров (GaAs – Ga_{1-x}Al_xAs), источников спонтанного излучения (GaAs – GaP, CdSe – ZnTe, GaAs – InAs) и соответствующих микросхем. Для получения гетеропереходов применяют эпитаксию из газовой и жидкой фазы.

Гетероэпитаксия на диэлектрических подложках при изготовлении микросхем решает проблему изоляции элементов, обеспечивает улучшение параметров, повышает степень интеграции и процент выхода годных изделий. В настоящее время наиболее освоена производством эпитаксия кремния на сапфировых подложках (КНС), а также ведутся исследования процессов наращивания кремниевых слоев на других изоляторах (КНИ), в том числе аморфных, что по существу не является эпитаксией, так как исключено ориентирующее влияние подложек. КНС-структуры получают аналогично автоэпитаксиальным слоям кремния.

В отличие от кубической симметрии кремния сапфир имеет ромбоэдрическую симметрию. Кремний с ориентацией (111) выращивают на (0001) и (1010) поверхностях сапфира. Кремний с ориентацией (100) выращивают на сапфире с ориентацией (1102). Температурные коэффициенты линейного расширения кремния и сапфира различаются почти в два раза. Эти несоответствия кремния и сапфира усложняют получение качественных слоев. Кроме этого, в процессе роста происходит автолегирование алюминием, повышающее дефектность слоев. Автолегирование огра-

ничивает уровень возможного легирования слоев донорными или акцепторными примесями. Слои кремния характеризуются сравнительно высокой плотностью дефектов, которая возрастает по направлению к подложке. Молекулярно-лучевая эпитаксия благодаря более низким температурам уменьшает автолегирование и также снижает дефекты несоответствия. Дополнительная обработка слоев кремния лазерным лучом улучшает их качество. Основным недостатком структур КНС пока остается высокая плотность дефектов и, как следствие, малое время жизни неосновных носителей. Поэтому они применяются для ИМС с МОП-активными элементами, работающими на основных носителях.

КНИ-структуры изготавливают путем нанесения слоя аморфного или поликристаллического кремния на изолирующие подложки и его последующей перекристаллизации. Технология изготовления КНИ появилась сравнительно недавно. Первые структуры изготавливали на термически оксидированных пластинах кремния. Затем начали применять более дешевые подложки из ситаллов, кварца. Перекристаллизацию кремния для формирования монокристаллического слоя выполняют подвижной полоской – нагревателем, сканированием лазерным или электронным лучом.

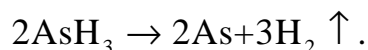
Ориентированное наращивание эпитаксиальных слоев, сопровождающееся их химическим взаимодействием с веществом подложек, называют *хемоэпитаксией*. Образующийся при этом промежуточный слой отличается по химическому составу как от вещества подложек, так и от осаждаемого вещества, но имеет такую же кристаллическую структуру, как исходная подложка. Наиболее часто эпитаксиальные слои осаждают из газовой фазы (газофазная эпитаксия) или кристаллизацией из жидкой фазы (жидкофазная эпитаксия).

В процессе роста эпитаксиальных слоев их легируют введением донорной или акцепторной примеси, путем введения в парогазовую смесь соединений, содержащих легирующие элементы, что позволяет, соответственно, создавать слои n- или p-типа электропроводности.

Газообразные источники – гидриды, диборан B_2H_6 , арсин AsH_3 , фосфин PH_3 отличаются высокой токсичностью и поэтому поставляются на производство в баллонах в смеси с водородом или инертными газами в концентрациях $(2 - 20) \cdot 10^{-3} \%$.

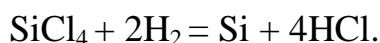
При использовании диборана трудно получить его смесь с содержанием менее 10 %, смеси нестабильны при хранении, сложно установить и точно измерить малые расходы смеси, поэтому трудно получать кремниевые слои, слаболегированные бором с удельным сопротивлением, большим 1 Ом·см. В связи с этим применяют жидкие и твердые источники.

Из газообразных источников наиболее часто применяют арсин. Газ доставляется к подложкам, адсорбируется их поверхностью, диссоциирует:



Освободившийся мышьяк встраивается в решетку растущего слоя кремния.

При газофазной эпитаксии используют различные химические реакции, происходящие в газовой (паровой) фазе при высокой температуре. При эпитаксии кремния широко применяют восстановление его тетрахлорида водородом:



Процесс эпитаксиального роста можно рассматривать как гетерогенную реакцию, состоящую из следующих стадий:

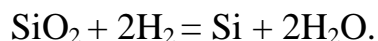
- перенос реагирующих веществ через газовую фазу к поверхности исходной подложки и их адсорбция;
- реакция или серия реакций на поверхности;
- присоединение атомов кремния, образующихся в результате реакций, к ступенькам роста на поверхности;
- десорбция (перенос) газообразных продуктов реакции к основному потоку газа и удаление.

1.3.2. Установки эпитаксиального наращивания

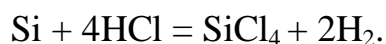
Процесс эпитаксиального наращивания выполняют на специальных установках, имеющих системы подачи, очистки и осушки газов (присутствие посторонних примесей и влаги в газах недопустимо). Рассмотрим процесс эпитаксии на основе получения кремниевых эпитаксиальных структур. Основным элементом рабочей камеры является кварцевая труба, в которую на подставке помещают монокристаллические подложки из кремния и нагревают их с помощью индуктора до 1200 – 1275 °С.

Предварительно камеру продувают аргоном, который вытесняет из системы воздух, так как при соединении его с водородом при нагревании образуется взрывоопасная смесь. Как и другие газы, аргон подают по отдельной магистрали, оснащенной вентилем, приборами для измерения давления (манометр) и расхода газа (ротаметр), а также клапаном с электромагнитным управлением. После продувки системы аргоном подложки обрабатывают 5 – 20 мин при 1200 – 1290 °С в потоке водорода. При этом

всегда имеющийся на поверхности диоксид кремния восстанавливается до кремния по следующей реакции:

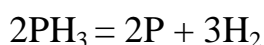
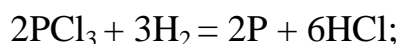


Затем в поток водорода добавляют 1 – 5 % сухого хлористого водорода HCl и при той же температуре за 5 – 10 мин стравливают образовавшийся в результате механических операций нарушенный слой:

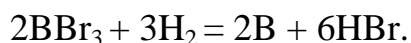


Закончив травление в хлористом водороде, прекращают его подачу, продувают систему водородом и начинают пропускать водород через основной и легирующий источники. Если необходимо получить слой n-типа, используют жидкие (PCl₃, PBr₃) или газообразные (PH₃) легирующие вещества, содержащие фосфор или другие элементы этой группы. Слой p-типа получают легированием кремния, например, бором, из его соединений, находящихся в жидком (BBr₃) или газообразном (B₂H₆) состояниях.

В результате реакции восстановления из тетрахлорида кремния SiCl₄ выделяется кремний, идущий на «строительство» эпитаксиальной пленки. Легирование этой пленки происходит в результате одной из следующих реакций:



или



Необходимо отметить, что реакция восстановления тетрахлорида кремния водородом аналогична реакции травления кремния хлористым водородом, но происходит в обратном направлении. Это закономерно, так как протеканию реакции в определенном направлении способствует изменение не только температуры процесса (в данном случае она одинакова), но и концентрации реагирующих веществ. Избыток HCl приводит к травлению кремния, а недостаток HCl и избыток H₂ – к эпитаксиальному наращиванию.

Скорость роста эпитаксиального слоя зависит от температуры и при 1100 °С, 1200 °С и 1270 °С ее оптимальные значения, соответственно, составляют 0,10 мкм/мин; 1,0 мкм/мин и 5,0 мкм/мин. Кристаллографическая ориентация также влияет на скорость наращивания. Например, в направлении [100] слои растут медленнее, чем в направлении [110].

Недостаток автолегирования – проникновение примесей через газовую фазу в растущий эпитаксиальный слой с обратной стороны подложек или их боковых поверхностей.

При жидкофазной эпитаксии атомы растущего слоя оседают на подложку из расплава или раствора. При этом подложки покрывают насыщенным полупроводниковым материалом (расплавом), из которого необходимо вырастить соответствующий слой, а затем их охлаждают. При уменьшении температуры растворимость полупроводникового материала в расплаве (обычно в легкоплавком металле) понижается и избыточное количество полупроводника оседает на подложке.

Применительно к элементарным полупроводникам (Si, Ge) этот метод не нашел широкого применения из-за отсутствия легкоплавких металлов, способных растворять полупроводниковые материалы в больших концентрациях, не загрязняя их эпитаксиальные слои. Наиболее благоприятны для жидкофазной эпитаксии соединения типа $A^{III}B^V$ (например, алюминия, галлия и индия с фосфором, мышьяком, сурьмой), а также твердые растворы на их основе.

Жидкофазную эпитаксию выполняют на следующих установках:

- с поворотным реактором, при наклоне которого расплав покрывает подложку;
- с вертикальным реактором, в котором подложка окунается в расплав;
- с многокамерным горизонтальным реактором, предназначенным для наращивания различных слоев последовательным созданием контакта с разными расплавами.

Жидкофазной эпитаксией можно получать слои полупроводников большой площади толщиной от долей микрометра до сотен микрометров, легировать с заданным распределением примесей по толщине, а также изготавливать многослойные структуры из трех- и четырехкомпонентных твердых растворов. Качество р-п-переходов, изготавливаемых жидкофазной эпитаксией, в большинстве случаев выше, чем получаемых другими методами.

Метод жидкофазной эпитаксии широко применяют при изготовлении оптоэлектронных и СВЧ-устройств, люминесцентных и фотоэлектрических приборов.

Рассмотрим *хлоридный* метод проведения эпитаксии.

Процесс наращивания слоев кремния выполняют способом проточной трубы при атмосферном давлении (рис. 1.29).

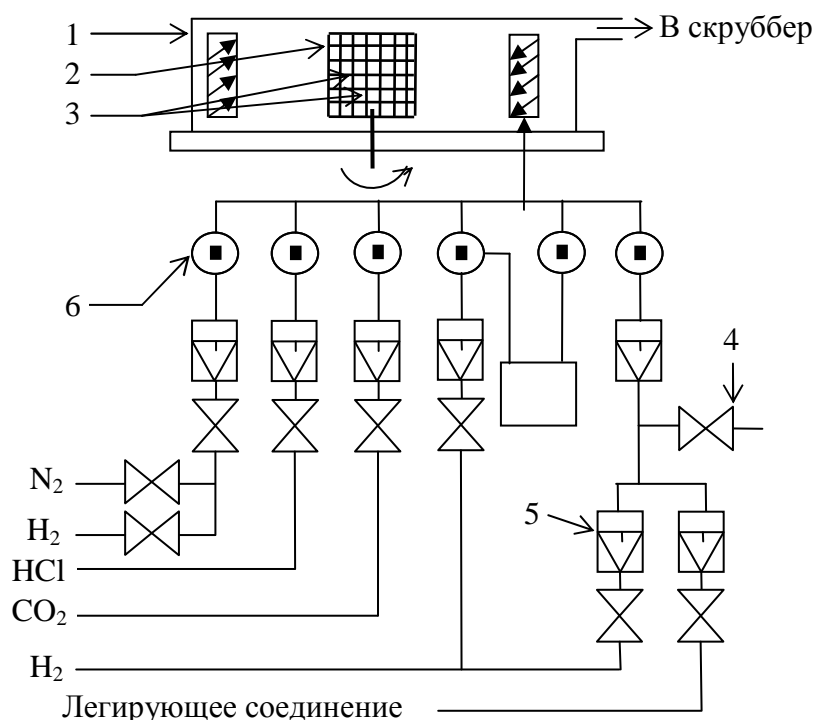


Рис. 1.29. Схема установки эпитаксиального наращивания:
 1 – реакционная камера; 2 – подложкодержатель; 3 – подложки;
 4 – запорные вентили; 5 – ротаметры; 6 – игольчатые вентили

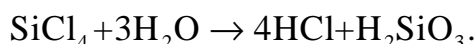
В данной схеме используется камера-реактор вертикального типа. Подложкодержатель одновременно играет роль нагревателя. Подложкодержатель при высоких температурах не должен выделять загрязнения и вступать в химическое взаимодействие с пластинами, поэтому его изготавливают из высококачественных сортов стеклографита или графита и покрывают слоем карбида кремния или кремния. В случае индукционного нагрева можно применять подложкодержатели из высокоомного кремния, покрытого слоем диоксида кремния. Чтобы слои кремния осаждались только на пластинах и загрязнения не попадали на пластины с внутренних стенок камеры установки, последние охлаждаются.

Парогазовая смесь поступает в зону реакции через множество отверстий в кварцевых трубках, расположенных вдоль образующих цилиндрического подложкодержателя.

Тетрахлорид кремния представляет собой жидкость, кипящую при температуре $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ и имеющую высокое давление паров, сильно зависящее от температуры. Для обеспечения подачи в реакционную камеру точного количества тетрахлорида кремния его испарение ведут в дозаторе при строго установленном режиме. Чистота исходного тетрахлорида кремния определяет максимальное удельное сопротивление слоев.

Современный уровень очистки позволяет получать тетрахлорид кремния, обеспечивающий удельное сопротивление до сотен Ом·см.

Участвующий в реакции восстановления водород является одновременно и газом-носителем. Регулировку степени насыщения водорода парами тетрахлорида кремния можно осуществлять изменением скорости потока водорода и температуры жидкого тетрахлорида кремния. Водород должен быть хорошо осушен, так как влага разлагает тетрахлорид кремния с образованием кремниевой и соляной кислот:



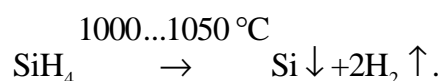
Процесс эпитаксии включает следующие технологические переходы:

- загрузка пластин в гнезда подложкодержателя;
- продувка реактора азотом для вытеснения воздуха;
- напуск в реактор водорода и отключение азота, продувка водородом;
- нагрев пластин до температуры 1200 °С и выдержка около 10 мин до восстановительного отжига;
- газовое травление в обезвоженном хлористом водороде, по окончании продувка водородом, охлаждение подложкодержателя до температуры эпитаксиального наращивания 1150 °С;
- осаждение эпитаксиального слоя, для чего в камеру подают пары тетрахлорида кремния, легирующее соединение в концентрациях, обеспечивающих оптимальную скорость роста 0,2 – 3,0 мкм/мин и требуемый уровень легирования слоя;
- продувка водородом;
- защита поверхности эпитаксиального слоя пленкой диоксида кремния, что необходимо для транспортировки эпитаксиальных структур или для межоперационного хранения;
- медленное охлаждение пластин до комнатной температуры в потоке водорода;
- продувка реактора азотом, разгерметизация реактора, выгрузка эпитаксиальных структур.

В современных промышленных установках, например УНЭС-2П-КА, управление процессом осуществляется в основном ЭВМ, оператор выполняет только загрузку и выгрузку пластин. Отходы химических реакций на выходе реактора поступают в скруббер, где сжигаются в пламени водорода. При выполнении процесса необходимо соблюдать правила безопасной работы с токсичными веществами и водородом.

Основной недостаток хлоридного метода – высокие температуры процесса, приводящие к диффузии примесей из пластин в растущий слой, а также к автолегированию.

Силановый метод основан на использовании необратимой реакции термического разложения силана:



Установки для выращивания эпитаксиальных слоев силановым методом близки по устройству к установкам, используемым в хлоридном методе. Для предосторожности при работе с взрывоопасным моносиланом она снабжается системой для откачки воздуха и следов влаги. Совершенные монокристаллические слои получаются при температурах разложения моносилана 1000 – 1050 °С, что на 200 – 150 °С ниже, чем при восстановлении тетрахлорида кремния. Это уменьшает нежелательные диффузию и автолегирование и позволяет изготавливать эпитаксиальные структуры с более резкими границами переходов. Необратимость реакции разложения моносилана также способствует получению более резкого распределения концентрации легирующей примеси на границе пластина – слой. Отсутствие среди продуктов разложения хлористого водорода или других вредных продуктов, в частности хлора, относится также к достоинству силанового метода. Скорость роста слоев выше, чем при восстановлении тетрахлорида кремния.

Как было отмечено выше, в зависимости от конструкции реактора бывают установки горизонтального и вертикального типов. В горизонтальных реакторах используют плоские подложкодержатели, в вертикальных – бочкообразные. Наиболее широко используются реакторы вертикального типа. По способу нагрева подложкодержателя установки подразделяют на индукционные и с радиационным нагревом. Индукционный нагрев осуществляют с помощью машинных генераторов частотой 10 кГц или самовозбуждающимися ВЧ-генераторами частотой 500 кГц. При этом выходная мощность генераторов достигает 100 – 120 кВт. Такая мощность позволяет нагревать подложкодержатель с тридцатью пластинами диаметром 100 мм до температуры 1200 – 1280 °С. Следует отметить, что центр пластины 2 при индукционном нагреве подложкодержателя 1 горячее, чем края (рис. 1.30).

Градиент температуры приводит к возникновению скользящих дислокаций, которые группируются в виде линий скольжения в определенных направлениях и приводят к снижению выхода годных изделий.

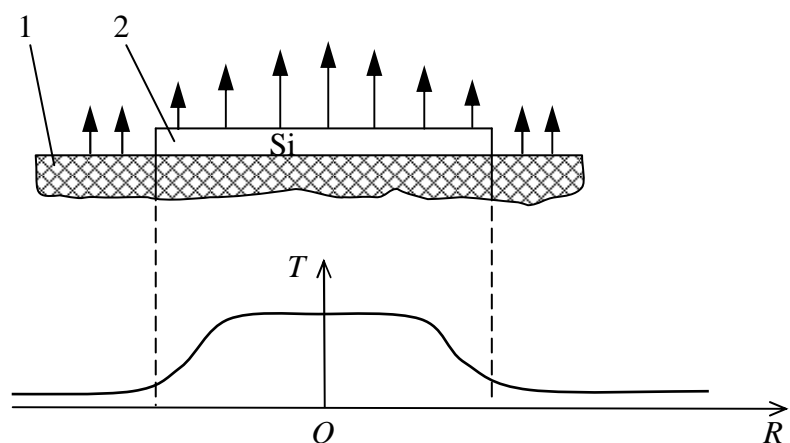


Рис. 1.30. Распределение температуры по радиусу R пластины при индукционном нагреве в эпитаксиальном реакторе: 1 – подложкодержатель; 2 – пластина

Для уменьшения температурных градиентов используют радиационный нагрев (ИК-нагрев) – рис. 1.31, при котором энергия, необходимая для разогрева подложкодержателя 2, помещенного в кварцевый реактор 1, создается набором кварцевых галогенных ламп 4 с отражателями 5.

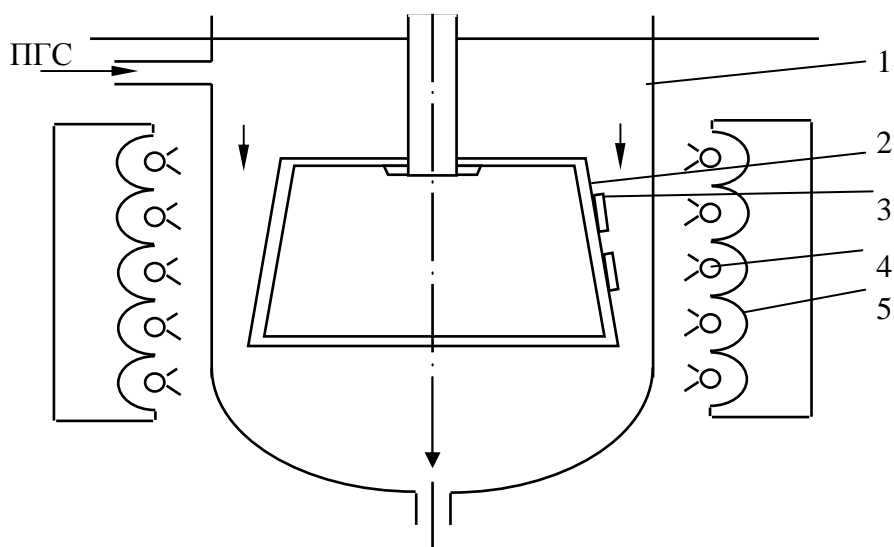


Рис. 1.31. Конструкция кварцевого реактора вертикального типа с ИК-нагревом и воздушным охлаждением реактора: 1 – кварцевый реактор; 2 – подложкодержатель; 3 – пластина; 4 – галогенная лампа; 5 – отражатель

При радиационном нагреве удастся устранить также градиент температуры по толщине пластины 3. Это позволяет существенно уменьшить количество дефектов на поверхности пленки (линий скольжения). Температуру в реакторе с радиационным нагревом измеряют температурночувствительными элементами (термопарами), размещенными внутри подложкодержателей. Точность поддержания рабочей температуры $\pm 3^\circ\text{C}$.

В реакторах 1 с ВЧ-нагревом (рис. 1.32) пластины нагреваются ВЧ-индукторами 5, размещенными в кварцевом стакане 4, а при определении температуры используют оптический пирометр 6, наведенный на пластину 3, установленную на подложкодержателе 2. Так как температуру измеряют через кварцевый реактор или специальное кварцевое окно, то пирометр показывает оптически эквивалентную температуру, которая на 50 – 100 °С ниже фактической. Это нужно учитывать при определении температуры процесса.

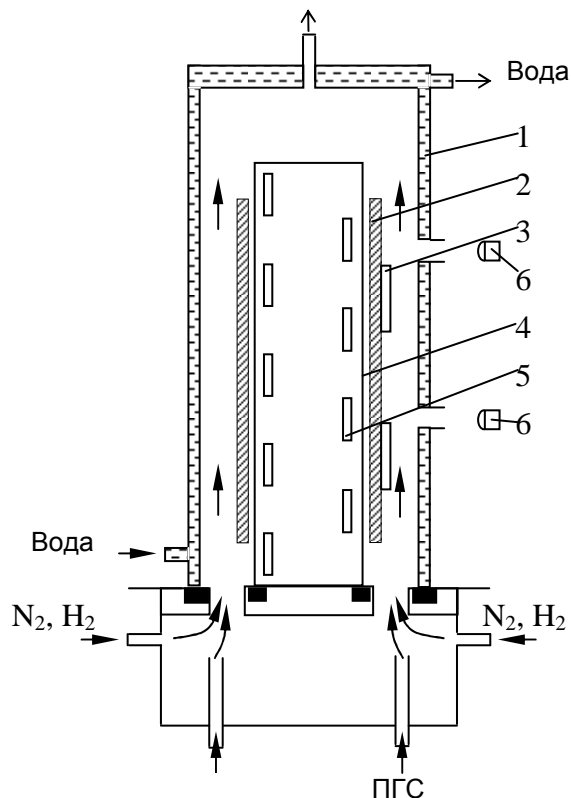


Рис. 1.32. Конструкция реактора вертикального типа с ВЧ-нагревом и водяным охлаждением:
 1 – реактор из нержавеющей стали;
 2 – подложкодержатель;
 3 – пластина;
 4 – кварцевый стакан;
 5 – ВЧ-индуктор; 6 – пирометр

1.3.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия

Особенно важную роль эпитаксия играет в технологических процессах производства СБИС, элементной базой которых являются сверхбыстродействующие гетеропереходные транзисторы, имеющие сложную слоистую структуру с толщиной монокристаллических полупроводниковых слоев до 2 – 25 нм. Для обеспечения стабильности характеристик и малого разброса параметров интегральных транзисторов по пластине, определяющего выход годных кристаллов СБИС, предъявляются очень высокие требования к качеству наращиваемых полупроводниковых слоев, обеспечить выполнение которых в современной микронной технологии способна только молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ).

Молекулярно-лучевая эпитаксия представляет собой эпитаксию посредством испарения в сверхглубоком вакууме. В отличие от обычной эпитаксии, использующей такой механизм, в установках МЛЭ поддерживается вакуум порядка 10^{-8} Па при относительно низких температурах (менее 600 °С), что позволяет формировать слоистые монокристаллические структуры, имеющие сложный профиль концентрации примесей. Принцип МЛЭ состоит в непосредственном управлении пучками атомов требуемых веществ, испускаемых нагревателями, которые могут быть перекрыты при изменении типа выращиваемого кристалла.

Важной особенностью МЛЭ является низкая скорость роста пленки (6 – 60 нм/мин), что снижает производительность процесса, но позволяет повысить качество и точно контролировать толщину эпитаксиальных слоев. Типичный пример установки МЛЭ приведен на рис. 1.33.

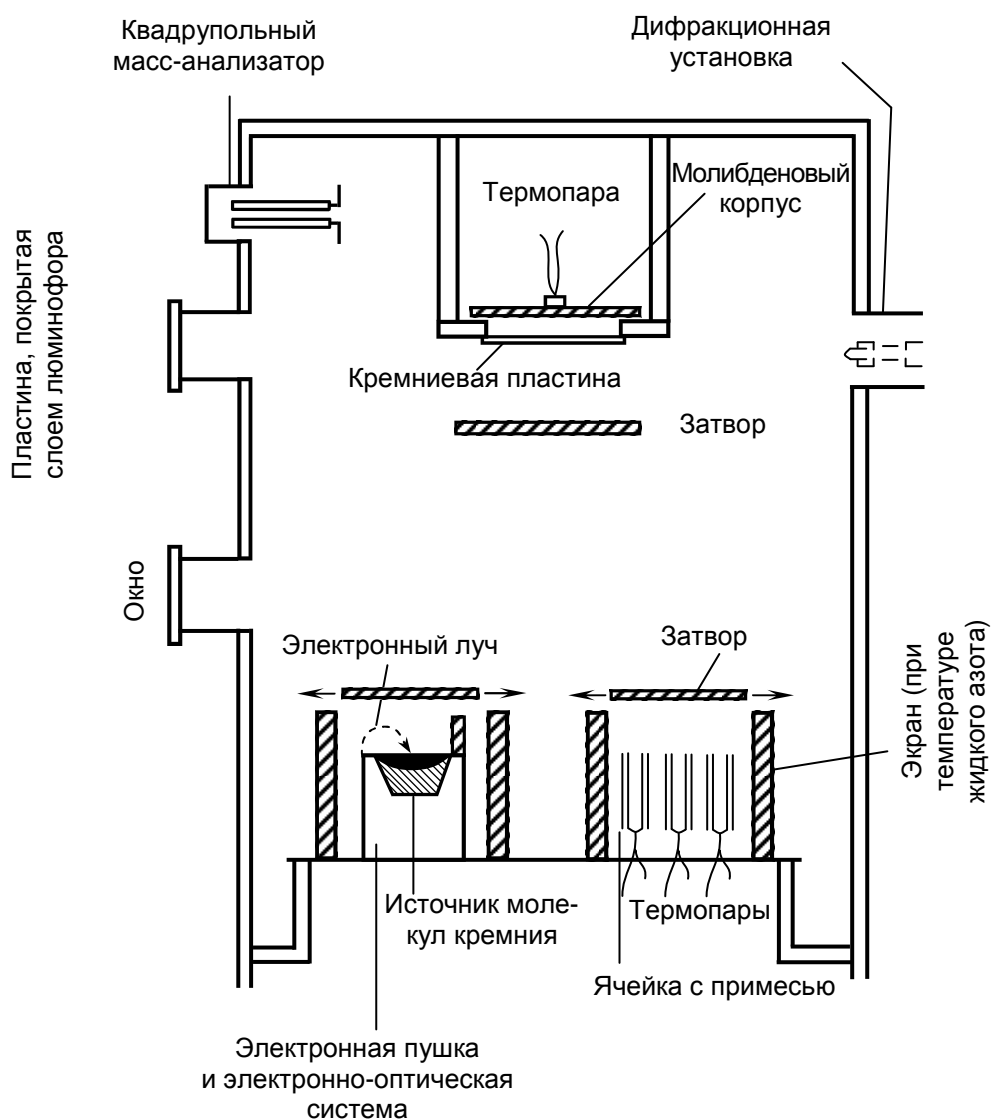


Рис. 1.33. Установка молекулярно-лучевой эпитаксии

Пучок молекул кремния формируется при помощи источника с нагревом электронным лучом. Для наращивания легированных слоев используются ячейки, содержащие примеси и снабженные резистивными нагревателями. Поскольку процесс наращивания происходит в сверхвысоком вакууме, испарительные элементы окружены охлаждающими устройствами с жидким азотом во избежание загрязнения объема реактора молекулами нагреваемых конструкций.

Установка испарения кремния электронным пучком, схематически показанная на рис. 1.34, состоит из одной или несколько пушек, электростатического экрана, источника магнитного поля, источника испаряемого вещества, основания с водяным охлаждением.

Электронный луч с током 100 – 500 мА эмитируется электронными пушками, находящимися вне поля прямого видения со стороны испаряемого вещества, и ускоряется высоким напряжением 3 – 10 кВ.

При помощи электрического или магнитного полей лучи направляются на маленький участок испаряемого вещества, в результате чего оно локально плавится и интенсивно испаряется. При этом само испаряемое вещество образует тигель. Разогретый до температуры плавления испаряющийся материал не контактирует непосредственно с элементами конструкции установки, что значительно снижает загрязнения и является важным преимуществом данного метода нагрева (см. рис. 1.34).

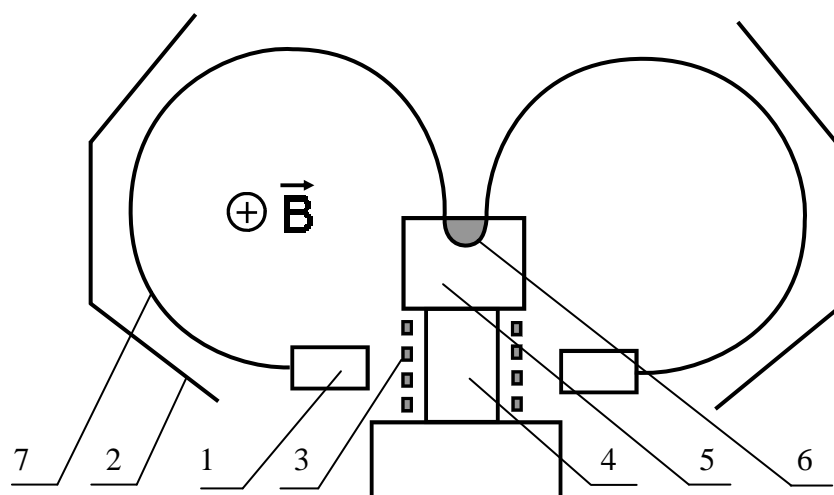


Рис. 1.34. Установка испарения кремния электронным пучком:

- 1 – электронная пушка; 2 – электростатический экран;
- 3, 4 – основание с водяным охлаждением; 5 – источник испаряемого вещества; 6 – расплав испаряемого вещества;
- 7 – электронный луч

1.4. Формирование диэлектрических и поликристаллических кремниевых пленок

1.4.1. Применение диэлектрических и поликремниевых пленок в полупроводниковой технологии

В технологии изготовления полупроводниковых ИМС используют диэлектрические пленки оксида кремния SiO_2 , нитрида кремния Si_3N_4 , карбида кремния SiC , примесно-силикатных стекол (ФСС, БСС), а также поликристаллического кремния Si^* . Такие пленки выполняют функции маскирующих, изолирующих или пассивирующих слоев и могут служить конструктивными элементами ИМС.

Основное назначение пленок SiO_2 толщиной более 0,2 мкм – создание маски, необходимой при локальной обработке поверхности полупроводниковых пластин (диффузии, ионном легировании, травлении) для предохранения (маскирования) части поверхности пластин от диффузии основных легирующих примесей (бора, фосфора, сурьмы, мышьяка). Однако при длительной диффузии или ионной имплантации такая толщина пленки недостаточна.

Лучшие маскирующие свойства имеют пленки Si_3N_4 толщиной более 0,1 мкм. Они препятствуют диффузии в пластину не только перечисленных примесей, но также индия, галлия, алюминия. Нитрид кремния применяют для создания маски при травлении поверхности кремния и пленок SiO_2 , а также в качестве защитного слоя (при защите ИМС от механических повреждений и воздействия окружающей среды).

Для электрической изоляции элементов микросхем и разделения металлизированных слоев многослойных соединений используют главным образом пленки SiO_2 .

Пассивирующие слои предохраняют поверхность полупроводниковых пластин с элементами интегральной микросхемы от химической и электрохимической коррозии, окисления, нитрирования, сульфатации, гидратации и других воздействий окружающей среды, обеспечивая стабильность свойств ИМС во времени. Хорошие пассивирующие свойства имеют фосфорносиликатные стекла (ФСС), которые препятствуют диффузии щелочных металлов (Na, K).

При температурах 1000 – 1100 °С ФСС растекается по поверхности пластины, сглаживая ее рельеф (планаризация поверхности). Примесно-

силикатные стекла могут также служить источниками легирующих примесей при диффузии. Слои SiO_2 и Si_3N_4 используют в качестве подзатворного диэлектрика в МДП-транзисторах.

Поликристаллический кремний применяют:

- в МОП-приборах для формирования электрода затвора;
- в качестве проводящего материала при многоуровневой металлизации;
- как материал контактов для приборов с неглубокими p-n-переходами;
- для изоляции активных элементов микросхем (путем прокисления поликремния).

Пленки поликремния служат также для стабилизации поверхности оснастки. Например, им покрывают поверхность графитовых подложкодержателей (карбидизация подложкодержателей).

В зависимости от назначения к диэлектрическим и поликремниевым пленкам предъявляют различные требования. Маскирующие пленки не должны быть пористыми, так как они являются барьером для диффундирующих легирующих примесей, должны хорошо тормозить ионы при ионном легировании, а также обеспечивать получение минимального клина травления (вертикальные стенки протравленных окон) при локальном травлении. Изолирующие пленки также не должны иметь пор, чтобы не происходило замыкание металлизированных слоев. Они должны обладать высокими диэлектрическими свойствами.

Пассивирующие слои должны иметь высокую стойкость к влажным и агрессивным средам, стабильную во времени. Подзатворный диэлектрик должен иметь минимальный положительный заряд, высокие защитные и диэлектрические свойства.

Если пленки поликремния использовать в качестве затворов и межсоединений, то они должны иметь низкое собственное сопротивление, а если в качестве контактов – минимальное сопротивление на границе с кремнием. Размер зерен поликремния должен находиться в интервале 500 – 1000 Å.

Все пленки не должны иметь и не должны создавать в приповерхностном слое полупроводникового материала больших механических напряжений, которые могут привести к дефектообразованию и короблению пластин.

Рассмотрим методы получения диэлектрических пленок (табл. 1.3).

Особенности методов получения диэлектрических пленок

Метод	Материал пленок	Область применения пленок	Особенности метода
Термическое окисление	SiO ₂	Маскирование, подзатворный ди-электрик	Высокие температуры и механические напряжения (дефектообразование, коробление), низкая пористость пленок
Термическое озонирование	Si ₃ N ₄	Геттер с нерабочей стороны	Высокие температуры, низкие толщина и качество пленок
Пиролитическое осаждение	SiO ₂ ФСС	Изолирующие и пассивирующие слои	Более низкие температуры и механические напряжения, высокая равномерность толщины и структуры, более высокая пористость пленок
	Si ₃ N ₄	Маскирование, подзатворный ди-электрик, «жесткая маска», геттер с нерабочей стороны	Более низкие температуры, высокая равномерность структуры, большие механические напряжения, низкая пористость пленок
	SiC	Пассивирование эпитаксиального оборудования	Высокие температуры
Плазмохимическое осаждение (ПХО)	SiO ₂ Si ₃ N ₄	Пассивирующие слои	

1.4.2. Термическое окисление

1.4.2.1. Основы метода. Процесс окисления, интенсифицируемый нагревом до высоких температур, принято называть *термическим окислением*. Метод термического окисления является основным в планарной технологии для получения маскирующих пленок на кремнии и пленок подзатворного оксида для МОП-структур.

Кремний обладает большим сродством к кислороду. На тщательно очищенной поверхности кремния уже при комнатной температуре образуется пленка диоксида кремния толщиной 10 – 15 Å, поэтому термическое окисление в любом случае ведется при наличии на поверхности тонкой оксидной пленки.

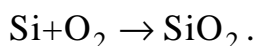
В настоящее время нет единой модели термического окисления полупроводников, согласованной со всеми экспериментальными данными. Рассмотрим простейшую из них. Процесс получения термического оксида можно разбить на следующие основные этапы:

- адсорбция – осаждение частиц окислителя (очищенного сухого или влажного кислорода) из парогазовой смеси на внешнюю поверхность оксида;

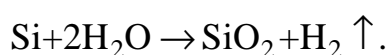
- диффузия частиц окислителя через оксид к границе раздела Si – SiO₂;
- химическое взаимодействие окислителя с кремнием и образование новых слоев SiO₂;
- диффузия газообразных продуктов реакции сквозь оксид к его внешней поверхности;
- десорбция их и удаление газовым потоком.

Скорость окисления определяется самым медленным этапом диффузионного проникновения окислителя сквозь растущую пленку к границе раздела SiO₂ – Si. Коэффициенты диффузии сильно зависят от температуры. При низких температурах коэффициенты диффузии и, следовательно, скорость роста пленки малы. Повысить скорость роста можно либо увеличением давления в реакционной камере установки, либо повышением температуры процесса. На практике термическое окисления кремния проводят при температурах 850 – 1250 °С. При одной и той же температуре коэффициент диффузии воды в диоксиде кремния существенно больше коэффициента диффузии кислорода. Этим объясняются высокие скорости роста оксида во влажном кислороде. Выращивание пленок только в парах воды не применяется из-за плохого качества оксида. Более качественные пленки получаются в сухом кислороде, но скорость роста пленок слишком мала.

При использовании сухого кислорода на поверхности кремния идет следующая реакция:



При использовании влажного кислорода протекает дополнительная реакция



Образующийся при реакции водород достаточно быстро диффундирует от границы Si – SiO₂ к поверхности оксида. На образование пленки расходуются атомы кремния, поэтому исходная поверхность подложки в процессе окисления уходит в толщу оксида. Этим объясняется отсутствие проблемы обеспечения высокой адгезии.

При температурах более 1000 °С окисление кремния подчиняется параболическому закону

$$x^2 = k t, \tag{1.7}$$

где x – масса или толщина оксидной пленки; t – время окисления; k – постоянная скорости роста, зависящая от типа окислителя, давления его паров и наличия примесей в кремниевой пластине и в растущей пленке.

1.4.2.2. Техника процесса. Для термического окисления применяют то же оборудование, что и для диффузионного легирования, например, диффузионные электропечи типа СДО-125/3, трех- или шестикамерные автоматизированные системы типа АДС-6-100. Камера установки (рис. 1.35) из дважды переплавленного в вакууме кварца проходит через муфель печи с резистивными нагревателями.

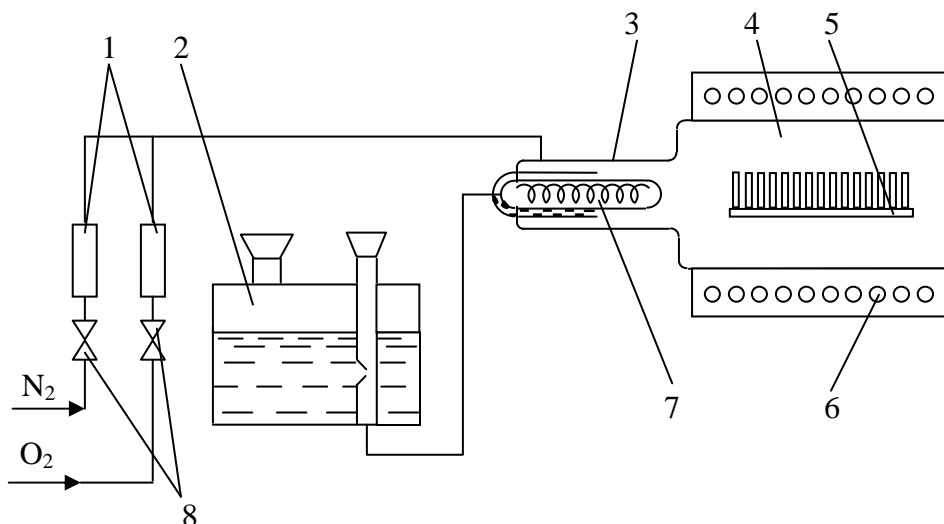


Рис. 1.35. Схема камеры для термического окисления кремния: 1 – датчики расхода газов; 2 – дозатор водяного пара; 3 – камера испарения; 4 – кварцевая труба; 5 – кассета с пластинами; 6 – резистивные нагреватели; 7 – нагреватель воды; 8 – вентили

Температура в рабочей зоне поддерживается с точностью $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $700 - 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ автоматическими системами терморегулирования. Процесс проводят способом открытой трубы, т.е. через кварцевую трубу-камеру непрерывно проходит сухой или влажный кислород. Для обеспечения подачи в камеру строго определенного количества паров воды испарение ведут в стационарном режиме. Для этого определенное количество воды (дозу) заливают в герметичный сосуд-дозатор. Поступающий в дозатор кислород проходит сквозь воду, захватывая пары воды. Такой дозатор барботажного типа нагревают до температуры $60 - 95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Подготовленные к процессу пластины кремния помещают вертикально в пазы кварцевой или из высокоомного кремния кассеты-лодочки. Лодочку с пластинами устанавливают на площадку загрузочного устройства установки. Запуском программатора автоматически выполняются технологические переходы окислирования: продувка камеры азотом, нагрев рабочей зоны до предварительной температуры, которая на $100 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже заданной по технологии рабочей температуры, загрузка лодочки с пластинами в рабочую зону установки кварцевым толкателем со скоростью

10 – 60 см/мин, нагрев печи с заданной скоростью до рабочей температуры, подача парогазовой смеси, выдержка пластин в течение заданного времени, охлаждение печи, выгрузка пластин кварцевым толкателем. Расход и концентрацию парогазовой смеси регулируют датчиками расхода газов 1 и дозатором 2.

В процессе термического окисления с помощью кварцевого толкателя осуществляются возвратно-поступательные перемещения лодочки с пластинами с амплитудой около 20 мм, чтобы предотвратить ее приварку к поверхности трубы. Предварительный нагрев печи, медленная загрузка и выгрузка пластин обеспечивают более мягкий режим оксидирования и уменьшают градиент температуры по радиусу пластин, а, следовательно, и термические напряжения, приводящие к изгибу пластин. Скорость нагрева печи вместе с пластинами до рабочей температуры составляет 10 – 30 °С/мин, скорость охлаждения – около 8 °С/мин.

1.4.3. Пиролитическое осаждение SiO₂

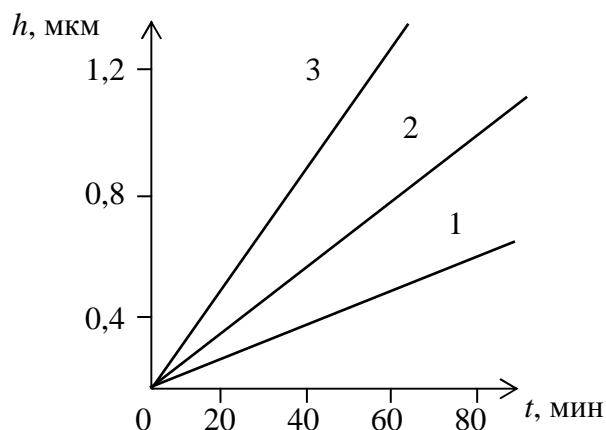
Пиролитическое осаждение используют для получения толстых слоев SiO₂ при низких температурах, когда термическое окисление неприемлемо из-за существенного изменения параметров предшествующих диффузионных слоев. Пиролитическое осаждение обеспечивает большую производительность, высокую равномерность слоев, качественное покрытие уступов металлизации и позволяет создавать изолирующие и пассивирующие слои не только на поверхности кремния, но и германия, арсенида галлия, а также других материалов. Помимо оксида кремния осаждают слои SiC, Si₃N₄, ФСС и поликремния.

Рассмотрим два варианта данного способа, которые нашли широкое применение при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

1.4.3.1. Термическое разложение тетраэтоксисилана Si(OC₂H₅)₄.

Этот процесс может проводиться непосредственно над поверхностью подложки либо в отдельной камере, из которой продукты реакции транспортируются к подложке. Реакция разложения тетраэтоксисилана происходит при температуре 700 – 750 °С. В результате реакции выделяются диоксид кремния, оксид кремния, оксид углерода и органические радикалы в газовой форме. Источником кислорода в этой реакции служит сам тетраэтоксисилан, а не внешний источник. На рис. 1.36 приведены графики зависимости толщины пленки от времени проведения процесса.

Рис. 1.36. Зависимость толщины пленки SiO₂, полученной при пиролизе, от времени для температур, °С: 1 – 700; 2 – 725; 3 – 750



Если реакция разложения тетраэтоксисилана проводится в одной камере с подложкой, то температура подложки соответствует температуре пиролиза. Если реакция разложения проходит в одной камере, а подложки находятся в другой камере, то температура подложек может быть значительно снижена по сравнению с температурой пиролиза.

1.4.3.2. Окисление силана кислородом. Преимущество этой реакции перед предыдущей заключается в том, что в этом случае не происходит образования газообразных органических радикалов и углерода, а сама реакция идет при более низкой температуре.

Окисление моносилана кислородом является перспективным методом в полупроводниковой технологии, так как он дает возможность осаждать оксидные пленки кремния на соединения типа A^{III}B^V и A^{II}B^{VI} без нарушения их стехиометрического состава. Для протекания реакции и образования диоксида кремния внешний нагрев не требуется, однако для получения оксидных пленок кремния более высокого качества процесс проводят при температуре 150 – 300 °С:



Исходными веществами для проведения этого процесса являются газовые смеси, которые включают в себя высокочистый моносилан SiH₄, аргон или азот (газы-носители) и кислород. Контролируемое окисление сильно разбавленного инертным газом силана (3 – 10 %) позволяет реализовать осаждение диоксида кремния в широком диапазоне температур со скоростью 10 – 50 нм/мин.

Температурный интервал осаждения оксидных пленок кремния определяется концентрациями моносилана и окислителя. При изменении концентрации моносилана от 0,8 до 0,015 об.% для постоянного отношения силан : окислитель = 1:3 температура процесса осаждения должна быть увеличена со 140 до 450 °С.

Особое внимание следует обращать на минимальную температуру процесса осаждения. Нижний температурный предел лимитируется двумя факторами: монотонным увеличением пористости пленки диоксида кремния и гомогенным окислением моносилана в газовой фазе. Монотонное увеличение пористости пленки связано с тем, что по мере снижения температуры процесса уменьшается энергия поверхностной миграции адсорбированных подложкой молекул. Кристаллизация осаждаемых частиц при этом происходит в положениях, все более далеких от минимума свободной энергии системы. Это вызывает образование рыхлых, пористых пленок с низкой электрической прочностью и слабой адгезией к подложке. При температурах проведения процесса осаждения ниже 150 °С происходит отложение частиц диоксида кремния в виде мелкодисперсного белого порошка.

Гомогенное окисление моносилана в газовой фазе связано с тем, что чем ниже температура осаждения оксидной пленки, тем бóльшие концентрации моносилана необходимы для реализации механизма окисления и, следовательно, все бóльшая часть моносилана окисляется в газовой фазе, засоряя реакционную камеру и ухудшая качество образующейся пленки.

В качестве окислителя кроме кислорода могут быть использованы кислородсодержащие соединения, такие, как N_2O , CO_2 , H_2O . Использование в качестве окислителей закиси азота и углекислого газа позволяет практически исключить гомогенное окисление, однако при этом невозможно реализовать осаждение пленок диоксида кремния в диапазоне температур 200 – 350 °С.

Контролируемое окисление моносилана (кислородом), достаточно сильно разбавленного инертными газами, позволяет получать пленки SiO_2 в широком диапазоне температур (200 – 500 °С), при этом скорости осаждения пленок достигают значений порядка 50 – 100 нм/мин.

Следует отметить, что пленки SiO_2 , полученные данным методом, равномерны по толщине по всей поверхности пластины, обладают хорошей стабильностью химического состава. Отличительным признаком пленок SiO_2 , полученных этим методом, является более высокая скорость их травления.

1.4.3.3. Оборудование для пиролитического осаждения SiO_2 . Пиролитическое осаждение проводят в установках «Изотрон», имеющих три варианта исполнения. Конструктивно (рис. 1.37) установка представляет собой трехтрубную диффузную печь и имеет реакторы 3 с горячими стенками, работающие при пониженном давлении в режиме непрерывной от-

качки их объема. Нагревательный элемент 10 состоит из трех секций. Пластины устанавливают в кассету 2 вертикально (как и при термическом окислении) по всей длине рабочей зоны, равной 600 мм.

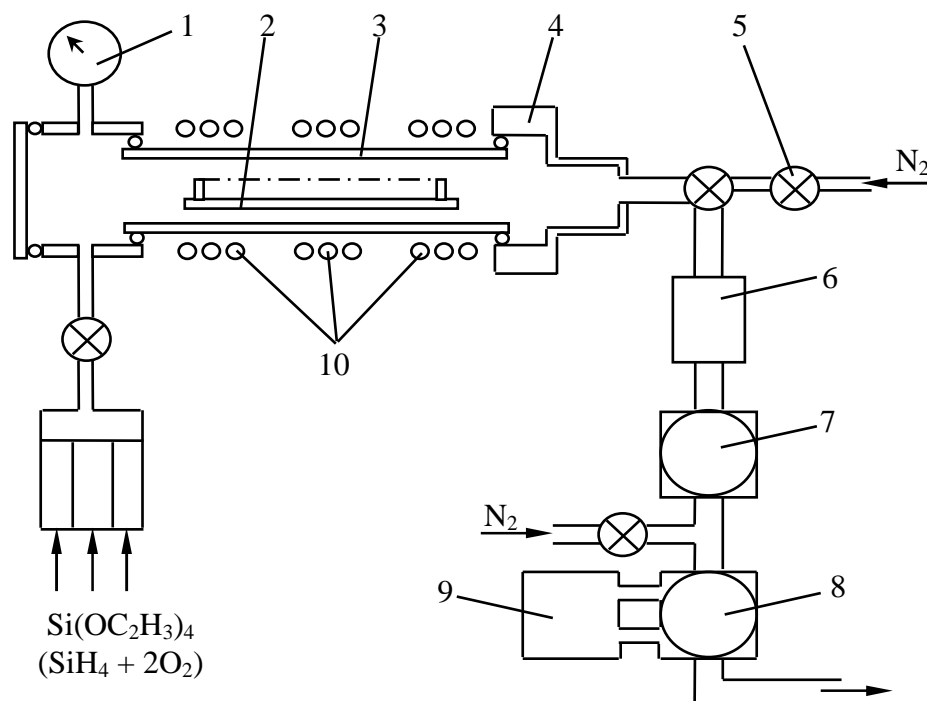


Рис. 1.37. Схема установки для пиролитического осаждения SiO_2 :
 1 – датчик давления; 2 – кассета с пластинами; 3 – кварцевый реактор;
 4 – водоохлаждаемая заглушка; 5 – кран впуска азота; 6 – фильтр; 7 – диффузионный насос; 8 – масляный насос; 9 – очиститель; 10 – резистивные нагреватели

Газовая смесь поступает с одного конца реактора и откачивается с другого. Предельное разрежение в реакторе установки не выше 0,7 Па, рабочее давление при напуске газов варьируется в пределах 13 – 670 Па. Система откачки реактора имеет диффузионный 7 и масляный 8 с очистителем 9 насосы, фильтр 6, кран впуска азота 5 и заглушку 4. Датчик 1 позволяет контролировать давление в реакторе. Установка работает в автоматическом режиме, основные параметры выводятся на ЭВМ.

В таких устройствах скорость осаждения SiO_2 составляет примерно 0,2 мкм/ч, ФСС 0,7 – 0,8 мкм/ч. Наиболее важными факторами, определяющими скорость осаждения, являются температура пластин, состав и расход газов, а также давление в реакторе. Пленки SiO_2 , полученные пиролитическим осаждением, имеют более высокую пористость, чем при термическом окислении, однако в них ниже уровень механических напряжений.

1.4.4. Анодное окисление кремния

Анодное окисление кремния является одной из основных электродных реакций, происходящих на поверхности исходной пластины при воздействии на нее электролита и электрического тока. Метод анодного окисления включает две модификации: окисление поверхности кремния в жидком электролите и окисление в газовой плазме. В первом случае процесс называют электролитическим анодированием, во втором – газовым анодированием.

Электролитическое анодирование. При обычных условиях поверхность кремниевых пластин покрыта тонкой пленкой оксида толщиной около 15 – 30 Å. Эта оксидная пленка разделяет вещества, которые участвуют в реакции анодного окисления. Поэтому дальнейший рост оксидной пленки возможен только при переносе за счет диффузии или миграции ионов реагирующих веществ через эту пленку. Скорость роста пленок SiO₂ на кремнии в жидком электролите, не растворяющем эти пленки, зависит от электростатического поля в слое оксида, стимулирующего миграцию ионов. Считают, что подвижным компонентом в рассматриваемом случае является ион кремния. Поэтому процесс выращивания анодных оксидных пленок может быть описан как процесс переноса ионов кремния через границу раздела оксид – кремний и через оксид к границе раздела оксид – электролит, где происходит реакция окисления.

Присутствие ионов в электролите у границы с оксидом заметно влияет на скорость окисления, а также на предельную толщину оксидной пленки. Толщина пленки при анодном окислении определяется значениями напряжения пробоя и ионного тока. Регулирование значения общего тока в процессе анодного окисления может осуществляться при постоянном токе, при постоянном напряжении и при комбинации этих величин.

Рассмотрим окисление при постоянном токе. Для поддержания постоянного ионного тока через оксид необходимо, чтобы с увеличением толщины оксидной пленки возрастало падение напряжения в этой пленке. Поэтому анодирование при постоянном токе можно характеризовать как скорость роста напряжения в оксиде. Скорость изменения напряжения приблизительно пропорциональна току. Следовательно, чем выше плотность ионного тока, тем быстрее повышается напряжение и быстрее растет оксид. При этом типичное значение коэффициента полезного выхода ионного тока составляет около 1% от выхода электролитических реакций. Анодное окисление при постоянном токе может продолжаться до тех пор, пока напряжение не достигнет определенного значения, зависящего от типа электролита и конструкции установки, после чего происходит пробой оксидной пленки.

В случае окисления при постоянном напряжении между анодом и катодом первоначальный ток, возникающий вследствие ионной проводимости оксида, определяется сопротивлением электролита, толщиной первоначального слоя оксида на кремниевой пластине и поляризацией, связанной с образованием «двойного слоя» в электролите. По мере роста оксида электрическое поле в нем уменьшается, что приводит к уменьшению тока, проходящего через оксид. В результате рост оксида замедляется.

Большую роль в получении воспроизводимых результатов анодного окисления играет выбор электролита и процент содержания в нем влаги. Могут быть использованы самые различные электролиты на основе азотной, борной или фосфорной кислот с добавками нитрата натрия, нитрата калия, бихромата аммония и др.

Газовое анодирование кремния аналогично электролитическому с той лишь разницей, что вместо электролита используется газ. Этот метод применяется при выращивании толстых оксидных пленок. Кислородная плазма, возбуждаемая полем высокой частоты, служит источником отрицательно заряженных кислородных ионов. Ионы кислорода из плазмы взаимодействуют с поверхностью кремниевой пластины. Рост оксида зависит от режима проведения анодного окисления – давления внутри рабочей камеры, температуры и плотности плазмы.

1.4.5. Осаждение пленок оксида кремния термическим испарением

Для нанесения защитных пленок оксида кремния используют два метода, основанные на испарении монооксида кремния. В первом методе используется технический порошкообразный монооксид кремния. Вторым методом заключается в том, что кремниевый электрод нагревается в атмосфере кислорода. При этом его поверхность покрывается монооксидом, который легко испаряется, так как обладает более высоким, чем у кремния, давлением паров.

Оксиды, получаемые путем напыления на полупроводниковую подложку, представляют собой комплексы вида Si-SiO-SiO_2 . При использовании в качестве источника испарения порошка монооксида кремния одним из наиболее важных моментов для получения однородной защитной оксидной пленки является конструкция лодочки для порошка монооксида кремния. Скорость испарения зависит от геометрии лодочки, температуры, давления, а также от однородности порошка монооксида. При использовании какого-либо определенного источника скорость испарения регулируют изменением электрической мощности, служащей для нагрева лодочки. Кремниевые пластины при этом методе осаждения защитной пленки на-

гревают до 300 °С и выше, чтобы получить хорошую адгезию защитной пленки к исходной пластине. Если осаждение производится с малой скоростью, но при высоком давлении кислорода, то пленка обладает такими же характеристиками, как и пленка SiO₂.

Защитные пленки, обладающие свойствами пленок SiO₂, получают обычно при температуре источника 1300 – 1400 °С и суммарном давлении менее $6,5 \cdot 10^{-4}$ Па.

Для получения оксидных пленок методом напыления в вакууме в качестве источника можно использовать кремний. При этом определяющую роль играет реакция у поверхности кремния. Температура и давление кислорода у этой поверхности определяют скорость адсорбции кислорода на поверхности кремния и испарения SiO₂. Кремний нагревается до температуры 700 – 1000 °С. Давление кислорода должно быть таким, чтобы на поверхности кремниевого источника обеспечивалась реакция $\text{Si} + \text{O} \rightarrow \text{SiO}$. Указанным методом на исходной полупроводниковой пластине можно получить оксидную пленку толщиной 0,1 мкм при температуре 900 °С и давлении $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па в течение 30 мин. При подогреве подложки, на которой располагаются пластины, улучшаются адсорбция паров оксида и их адгезия к полупроводниковым пластинам. Во избежание испарения осажденной пленки оксида температура пластин должна быть на 100 – 200 °С ниже температуры источника.

1.4.6. Реактивное катодное распыление оксида кремния

Метод реактивно-катодного распыления оксида кремния основан на использовании электрического разряда между электродами при низком давлении окисляющего газа. Под действием бомбардировки ионизированными молекулами газа материал катода испаряется в виде свободных атомов или в виде соединений, образующихся при реакции катода с остаточными молекулами газа. Перенос распыленных частиц происходит либо за счет их кинетической энергии, либо за счет диффузии, если столкновения с остаточными молекулами газа заметно снижают их кинетическую энергию.

Методом реактивно-катодного распыления можно получать пленки оксида кремния, подвергая распылению в присутствии кислорода кремневую мишень. Обычно этот процесс проходит при давлении 0,4 Па и напряжении 1500 – 2000 В. Скорость роста пленки оксида кремния увеличивается при введении в кислородную атмосферу небольших количеств аргона.

Разновидностью реактивно-катодного распыления является метод, при котором плазма получается с помощью высокочастотного разряда. По этому методу защитные оксидные пленки получают при давлении 26,5 – 133 Па и напряжении 3 – 5 кВ.

Хорошая контролируемость процесса реактивно-катодного распыления позволяет автоматизировать процесс осаждения защитных пленок оксида кремния на подложки из полупроводникового материала.

1.4.7. Реактивное катодное осаждение пленок нитрида кремния

Достоинство этого метода состоит в том, что реакция между кремнием и азотом происходит при комнатной температуре окружающей среды за счет энергии газового разряда, между анодом и катодом в рабочей камере.

Нанесение пленок нитрида кремния проводят в специальных установках катодного распыления при постоянном токе с холодным или горячим катодом.

Для проведения процесса катодного осаждения используют катод из высокочистого кремния в виде плоской пластины большого (80 – 120 мм) диаметра. Анодом служит подложка. При подаче на катод высокого напряжения (1 – 3 кВ) в пространстве между анодом и катодом возникает аномальный тлеющий разряд, который ионизирует газ внутри рабочей камеры. Специфика аномального тлеющего разряда состоит в том, что в непосредственной близости около катода образуется настолько сильное электрическое поле, что образовавшиеся при разряде положительно заряженные ионы газа ускоряются этим полем, бомбардируют катод, выбивают из него не только дополнительные электроны (необходимые для поддержания разряда), но и атомы материала катода.

В течение этого процесса кремниевый катод постепенно разрушается. Поэтому в производственных условиях, когда процесс катодного распыления используется длительное время, катод подлежит замене после определенного срока службы.

Технологический процесс катодного осаждения пленок нитрида кремния включает в себя предварительную откачку воздуха из рабочей камеры. Откачку обычно проводят до давления $1,3 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ Па, а затем в рабочую камеру вводят смесь газов аргона и азота, предварительно очищенных от влаги и кислорода. Давление в рабочей камере при этом устанавливают равным 1,3 – 13 Па.

Азот, участвующий в процессе, является реактивным газом, а аргон используется для повышения эффективности процесса распыления. Требование по отсутствию кислорода в рабочей камере продиктовано тем, что кремний взаимодействует с кислородом значительно лучше, чем с азотом. Поэтому даже незначительное количество кислорода в рабочей камере приводит к образованию пленки диоксида кремния на поверхности подложки.

На процесс катодного осаждения оказывают влияние катодный ток и расстояние между анодом и катодом. При плотности катодного тока $0,2 - 0,8 \text{ мА/см}^2$ и расстоянии между анодом (подложкой) и катодом (пластиной кремния) $2 - 5 \text{ см}$ можно получить скорость осаждения нитрида кремния $0,01 - 0,05 \text{ мкм/мин}$.

Применение катода с поверхностью, большей или равной поверхности подложки, позволяет получать осажденные пленки нитрида кремния одинаковой толщины с разбросом, не превышающим 5% .

Реактивное ионно-плазменное осаждение пленок нитрида кремния является разновидностью катодного способа. Отличительной особенностью реактивного ионно-плазменного способа является то, что высокое отрицательное напряжение прикладывается не к катоду, а к дополнительному электроду, называемому мишенью. Отсюда следует, что и распыляемый материал (кремний) будет служить не катодом, а мишенью.

Второй отличительной особенностью является введение в рабочую камеру устройства для расположения подложек, на которые будет происходить осаждение нитрида кремния.

Третья особенность ионно-плазменного способа состоит в том, что в промежутке между подложкой и мишенью располагают анод и катод, между которыми создают несамостоятельный дуговой разряд. Для этого между анодом и катодом прикладывают напряжение порядка $100 - 300 \text{ В}$, а в рабочем объеме создают давление $0,13 - 0,013 \text{ Па}$. В этом случае катод эмиттирует электроны, которые, взаимодействуя с рабочим газом, создают электронно-ионную плазму.

Положительные ионы плазмы бомбардируют кремниевую мишень и выбивают из нее атомы кремния. Выбитые из мишени, они реагируют с азотом, находящимся внутри рабочей камеры, и образуют нитрид кремния, который осаждается на подложке.

Таким образом, принципиальных различий между процессами катодного и ионно-плазменного осаждения нитрида кремния нет. Различают лишь конструкции установок, которые характеризуют по числу рабочих электродов (два или три).

Начало и конец процесса осаждения пленок нитрида кремния определяются подачей и отключением высокого напряжения на мишени.

1.4.8. Контроль толщины диэлектрических пленок

Толщина защитных диэлектрических пленок определяется с помощью следующих способов: микровзвешивание, интерферометрия и эллипсометрия.

Способ микровзвешивания основан на точном взвешивании подложки до и после осаждения пленки.

Толщина пленки

$$h = \frac{M_2 - M_1}{S\rho}, \quad (1.8)$$

где M_1 – масса подложки без пленки; M_2 – масса подложки с пленкой; S – площадь пленки; ρ – плотность пленки.

Точность определения толщины пленки этим способом зависит прежде всего от чувствительности весов и точности взвешивания, а также от точности определения площади пленки и ее плотности.

Наиболее простым из существующих *интерференционных* методов определения толщины пленок SiO_2 и Si_3N_4 является цветовой. Он основан на гасящей интерференции белого цвета, падающего на поверхность подложки с защитной пленкой. Цвет поверхности пленки SiO_2 и Si_3N_4 создается равномерным белым светом за вычетом той его части, которая участвует в гасящей интерференции. Отсутствие некоторых компонентов спектра белого света в отраженной волне воспринимается глазом как определенный цвет защитной пленки. Падающая и отраженная волны являются дополнительными – вместе они дают белый свет.

При нормальном падении белого света на поверхность пластины с защитной пленкой условие гасящей интерференции имеет вид

$$2nd = \frac{2k-1}{2}\lambda, \quad (1.9)$$

где d – толщина пленки SiO_2 или Si_3N_4 ; n – коэффициент преломления SiO_2 или Si_3N_4 ; $k = 1, 2, 3$ – порядок интерференции; λ – длина волны падающего света.

Таким образом, определенный цвет поверхности защитной пленки соответствует ее толщине, причем с увеличением толщины пленки один и тот же цвет повторяется с изменением порядка интерференции. Следовательно, для определения действительной толщины необходимо не только зафиксировать цвет поверхности пленки, но и определить порядок интерференции.

Цвет поверхности пленки необходимо наблюдать и фиксировать при нормальном падении света, так как при косом падении света цвет пленки изменяется в зависимости от ее толщины и коэффициента преломления.

Порядок интерференции на практике определяют следующим образом. Пластину, например, с пленкой SiO_2 одним концом опускают в плави-

ковую кислоту на 1 – 2 мин для получения слоя клиновидной формы. После этого наблюдают цвета как на однородной по толщине пленке SiO_2 , так и на клиновидном участке. На однородном участке пленки будет какой-либо один цвет, а на клиновидном имеет место чередование определенных цветов в зависимости от толщины пленки. По какому-либо однородному повторяющемуся определенное число раз цвету полосы (например, красному или зеленому) судят о порядке интерференции.

Для определения толщин защитных пленок SiO_2 или Si_3N_4 можно пользоваться набором цветовых оттенков, приведенных в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Цветовые оттенки, присущие пленкам оксида и нитрида кремния в зависимости от их толщины и от порядка интерференции

Цвет	Толщина пленок, мкм							
	1-й порядок		2-й порядок		3-й порядок		4-й порядок	
	SiO_2	Si_3N_4	SiO_2	Si_3N_4	SiO_2	Si_3N_4	SiO_2	Si_3N_4
Серый	0,01	–	–	–	–	–	–	–
Коричневый	0,05	–	–	–	–	–	–	–
Синий	0,08	–	–	–	–	–	–	–
Фиолетовый	0,1	0,9	0,28	0,21	0,46	0,34	0,65	0,52
Голубой	0,15	0,12	0,30	0,23	0,49	0,36	0,68	0,53
Зеленый	0,18	0,13	0,33	0,25	0,52	0,38	0,72	0,57
Желтый	0,21	0,15	0,37	0,28	0,57	0,42	0,75	0,61
Оранжевый	0,22	0,18	0,40	0,3	0,60	0,47	0,78	0,65
Красный	0,25	0,19	0,44	0,33	0,62	0,51	0,81	0,68

Недостатком цветового метода является то, что определение цвета пленки зависит от индивидуальных возможностей и особенностей каждого человека. Относительная ошибка цветового метода определения толщины пленки не превышает 10 %.

Эллипсометрический метод измерения толщины пленок SiO_2 и Si_3N_4 основан на отражении линейного поляризованного луча от поверхности защитной пленки. При отражении учитывается тот факт, что компонента, перпендикулярная к плоскости падения, отражается иначе, чем компонента, лежащая в плоскости падения. В результате образуется эллиптически поляризованная отраженная волна. Измерив эллиптичность отраженной волны, можно определить толщину пленки, вызвавшей соответствующие изменения поляризации падающей волны. Обычно для оценки толщины пленки, т.е. для оценки отраженной волны в эллипсометрическом методе используются соотношения между фазой и амплитудой падающей волны и фазой и амплитудой волны, отраженной от поверхности пленки. В качестве источника света могут быть использованы лазеры.

Эллипсометрический метод позволяет наиболее точно измерить толщину пленки. Этот метод обычно применяется для измерения пленок, толщина которых на порядок меньше, чем допускают другие методы.

1.4.9. Контроль пористости защитных диэлектрических пленок

Наличие сквозных отверстий (пор) в пленках SiO_2 и Si_3N_4 является наиболее распространенным видом дефектов, которые приводят к значительному браку при последующих операциях в планарной технологии. Поэтому требуется тщательный контроль пластин после операции осаждения защитных диэлектрических пленок.

Для определения пористости пленок используют методы электролитического осаждения меди, диффузионного легирования и электрографической.

Метод электролитического осаждения меди состоит в следующем. Пластины кремния с нанесенной пленкой SiO_2 помещают в электролит, содержащий ионы меди. На эту пластину подают отрицательный потенциал. Положительный потенциал подают на медную пластину, которая находится также в электролите и служит вторым электродом. В процессе электролиза ионы меди осаждаются на кремний в тех местах, где имеются сквозные отверстия (поры). По количеству осажденных островков меди судят о качестве пленки. Под микроскопом определяют количество пор и их геометрические размеры.

Метод диффузионного легирования заключается в проведении процесса диффузии примеси, создающего в исходном полупроводниковом материале противоположный тип электропроводимости. После проведения процесса диффузии в тех местах пленки, где имели место сквозные отверстия, образуются локальные p-n-переходы (участки с противоположным типом электропроводности). Далее защитную пленку удаляют с поверхности подложки и по количеству локальных p-n-переходов судят о количестве пор в пленке.

Рассмотренные методы имеют существенный недостаток – они исключают возможность использования исследуемого образца в дальнейших технологических процессах.

Наиболее простым и достаточно эффективным неразрушающим методом контроля пористости, позволяющим точно и быстро определять местонахождение, геометрические размеры и плотность сквозных отверстий в пленках, является *электрографический метод*. Этот метод позволяет обнаружить сквозные отверстия диаметром до 0,1 мкм.

Методика проведения контроля пористости пленок состоит в наложении на поверхность пластины с защитной пленкой фотобумаги, предварительно смоченной в 3 – 4 %-м водном растворе гидрохинона. К пластине с фотобумагой прижимают два металлических диска-электрода, через которые пропускают электрический ток. Так как фотобумага, смоченная в растворе гидрохинона, является токопроводящей, то ток через нее будет проходить лишь в тех локальных местах, где имеются сквозные отверстия в пленке. Электрический ток, протекающий через поры в пленке, действует на эмульсию фотобумаги подобно световому потоку, образуя изображение в виде черных точек и островков.

Количество и размеры дефектов пленки определяют визуально под микроскопом.

1.5. Литография

1.5.1. Применение литографии

Внедрение литографии в полупроводниковое производство в 1957 г. определило дальнейшее развитие элементной базы электроники и позволило перейти от дискретных элементов к интегральным.

В настоящее время области применения литографии существенно расширились. В производстве современных микросхем литография является самым универсальным технологическим процессом. Она позволяет воспроизводимо и с большой точностью выполнять сложные топологические рисунки с размерами элементов менее микрометра в разнообразных материалах. Литография применяется при изготовлении полупроводниковых и пленочных структур, для получения всевозможных канавок и углублений в полупроводниковых и других материалах. С ее помощью изготавливают шаблоны – инструменты для проведения самого процесса литографии, получают сквозные отверстия в фольге при изготовлении прецизионных свободных масок, выводных рамок или лент, применяемых для автоматизированной сборки и герметизации интегральных схем. С помощью литографии можно разделять пластины или подложки с готовыми структурами на отдельные кристаллы или платы, изготавливать прецизионные детали, создавать точные шкалы и т.д.

Основное назначение литографии при изготовлении структур микросхем – получение на поверхности пластин (или подложек) контактных масок с окнами, соответствующими топологии формируемых технологических слоев, и дальнейшая передача топологии (рисунка) с маски на материал данного слоя.

В последнее время вводят термин – актинолитография, учитывающий любые виды излучения (рентгеновские, электронные, ионные лучи). Для каждого технологического процесса подбирается свой вид резиста. Пленки резиста подвергают воздействию излучения либо через шаблон, либо по определенной программе движения луча. При последующей обработке резистов получается контактная маска.

Достоинства литографического процесса:

- возможность получения элементов ИМС минимальных размеров (до 1 мкм) практически любой конфигурации;
- универсальность метода (можно изготовить трафареты для напыления пленок и сеткографии; селективно травить напыленные пленочные слои; селективно травить «окна» в оксидных пленках при создании масок для диффузии, ионной имплантации, эпитаксии; осуществлять глубинное травление в полупроводниковых и диэлектрических подложках);
- возможность применения групповой технологии.

1.5.2. Сущность процессов литографии

Литография представляет собой сложный технологический процесс, основанный на использовании явлений, происходящих в актинорезистах при актиничном облучении.

Актинорезисты, на практике называемые просто резистами, представляют собой материалы, чувствительные к излучению определенной длины волны (к актиничному излучению) и стойкие к технологическим воздействиям, применяемым в процессе литографии. Под действием излучения процессы, происходящие в резистах, необратимо меняют их стойкость к специальным составам – проявителям. Резисты, растворимость которых в проявителе увеличивается после облучения, называются позитивными. Негативные резисты после облучения становятся практически нерастворимыми в проявителе.

Локальное облучение (экспонирование) осуществляется либо теньвым способом, т.е. экранированием нужных участков непрозрачными для излучения участками шаблонов, либо локализацией самого излучения с помощью, например, оптического проецирования изображения. После одинакового экспонирования слоев позитивных и негативных резистов при проявлении получают резистивные маски с противоположными по отношению к характеру локального облучения рисунками (рис. 1.38). Окнам маски из позитивного резиста соответствуют облученные участки; в маске

из негативного резиста окна образуются на необлученных участках. Контактные резистивные маски формируются в результате чувствительности резистов к актиничному излучению. Для дальнейшей передачи топологического рисунка с маски на материал технологического слоя необходима стойкость маски к последующим технологическим обработкам.

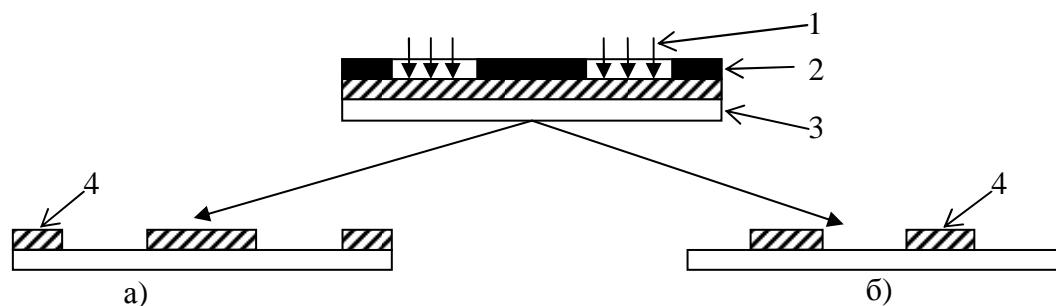


Рис. 1.38. Получение контактных резистивных масок с помощью позитивных (а) и негативных (б) резистов: 1 – актиничное излучение; 2 – слой резиста; 3 – подложка; 4 – резистивная маска

Рассмотрим требования, предъявляемые к резистам:

- высокая чувствительность к излучению;
- высокая селективность к воздействию проявителей (при проявлении);
- способность формировать тонкие покрытия.

1.5.3. Этапы и основные операции литографического процесса

Процесс литографии можно разделить на три этапа, каждый из которых включает ряд операций (рис. 1.39).

Передача рисунка с резистивной маски может выполняться двумя способами.

При прямой литографии (рис. 1.40, а) пленка, в которой формируется рисунок, наносится на подложку до формирования слоя резиста. Передача рисунка на пленку осуществляется травлением. Рисунок, получаемый в пленке, соответствует рисунку маски.

При обратной литографии пленка, в которой необходимо получить рисунок, наносится поверх уже сформированной резистивной маски. Часть пленки, как показано на рис. 1.40, б, удаляется вместе с маской («взрывная» литография), и на подложке остается требуемый рисунок пленки. Для «взрывной» литографии необходимо обеспечить соответствующую (с отрицательным наклоном) форму боковых стенок окон маски и сравнительно

толстый (по отношению к пленке) слой резиста. Наряду с «взрывной» разновидностью обратной литографии является способ, при котором пленка электролитически осаждается только в окна маски, с высокой точностью воспроизводя ее рисунок.

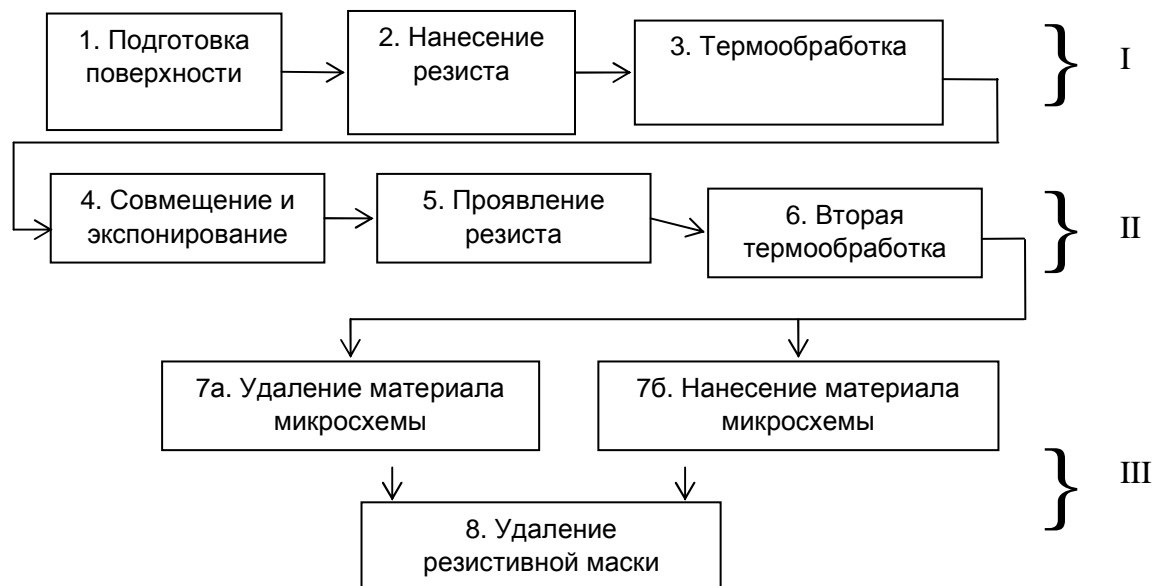


Рис. 1.39. Этапы (I, II, III) и операции (1 – 8) литографического процесса:
 I – формирование слоя резиста; II – передача рисунка на слой резиста;
 III – передача рисунка на материал микросхемы

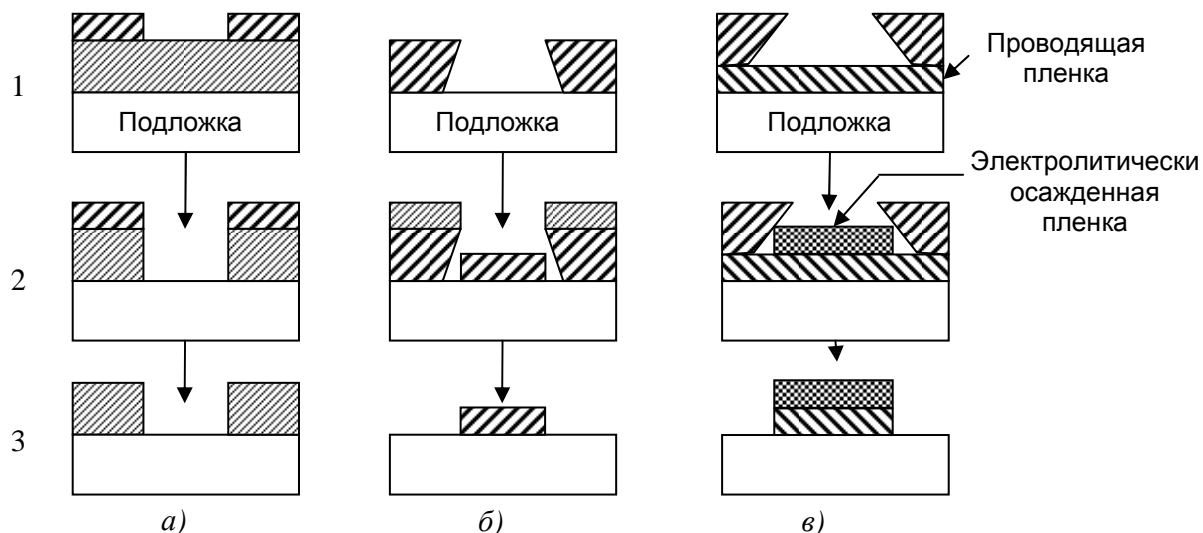


Рис. 1.40. Литография прямая (а), обратная «взрывная» (б) и обратная с электролитическим осаждением пленки (в): 1 – формирование резистивной маски; 2 – передача с рисунка с маски на слой SiO_2 при прямой литографии (а), нанесение пленки в окна и поверх маски (б) или в окна (в); 3 – удаление резистивной маски

При обратной литографии рисунок, передаваемый на пленку, противоположен рисунку резистивной маски. Преимуществом обратной литографии является отсутствие операции травления и, соответственно, всех негативных явлений, связанных с действием травителей на приборную структуру микросхемы.

1.5.4. Методы литографии

В зависимости от типа применяемого излучения различают оптическую, рентгеновскую, электронную и ионную литографию (рис. 1.41).

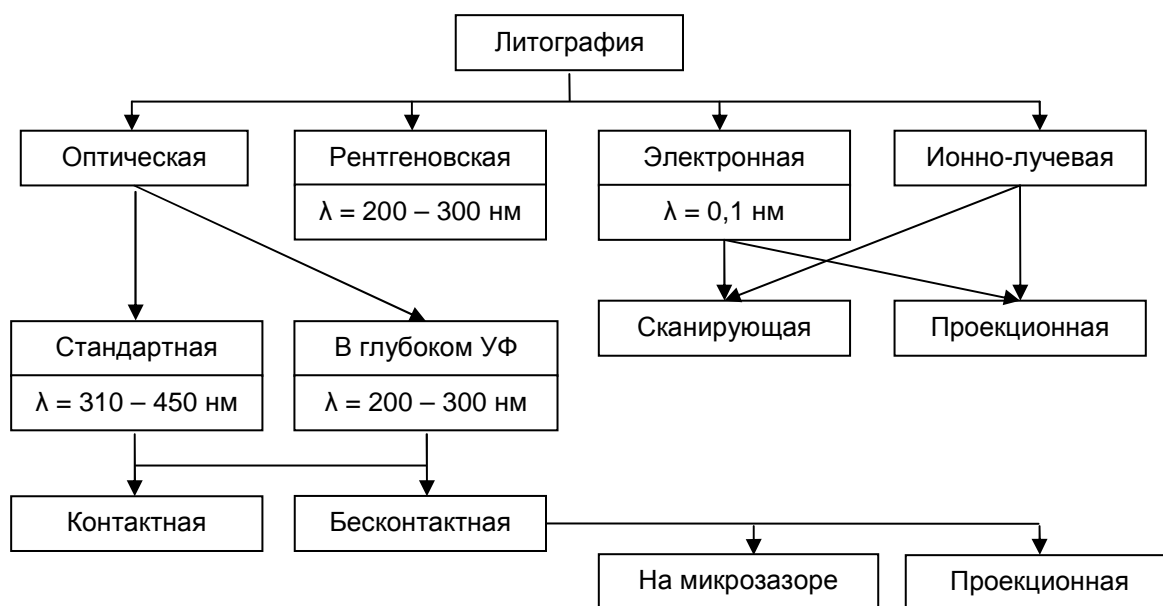


Рис. 1.41. Классификация литографических процессов

Оптическая литография (фотолитография), стандартная или в глубокой ультрафиолетовой области, в соответствии со способом экспонирования может быть контактной или бесконтактной (на микрозоре и проекционная).

Электронная литография может выполняться путем последовательной передачи топологического рисунка на слой резиста сфокусированным единичным электронным лучом или путем одновременной проекции всего рисунка. То же можно сказать и об ионной литографии.

1.5.4.1. Оптическая литография (фотолитография). Для стандартной фотолитографии применяют фоторезисты, чувствительные к ультрафиолетовому (УФ) излучению с длиной волны от 310 нм до 450 нм.

Фоторезисты представляют собой сложные полимерные композиции, в составе которых имеются фоточувствительные и пленкообразующие

компоненты, растворители и специальные добавки. Последние вводят для улучшения условий пленкообразования (разбавители), изменения фоточувствительности, повышения адгезии фоторезистивного слоя к подложкам, улучшения стойкости к воздействиям кислот, щелочей, высоких температур и др. Растворители определяют стабильность свойств готовых фоторезистов, влияют на процесс нанесения и последующее высыхание фотослоя.

Фотохимические процессы, происходящие в фоторезистах под действием УФ-излучения, можно разделить на две стадии. На световой стадии в результате поглощения кванта излучения наиболее слабая химическая связь разрывается и образуется свободный радикал. На темновой стадии протекают реакции, приводящие к деструкции (разрушению) молекулярных цепей полимера либо, наоборот, к структурированию (сшиванию) молекул в прочную сетку. В результате этого стойкость облученных участков к воздействию проявителя уменьшается или возрастает.

Позитивные фоторезисты изготавливают на основе фоточувствительных О-нафтохинондиазидов и фенолформальдегидных смол, являющихся пленкообразующими полимерами. Молекула позитивного фоторезиста, сокращенно НХД, имеет строение R_1-O-R_2 , где R_1 и R_2 – светочувствительная и полимерная части, О – соединяющий их атом кислорода. При поглощении квантов облучения молекула НХД распадается на азот и неустойчивый радикал, который превращается в инденкарбен; инденкарбен присоединяет всегда имеющуюся в фоторезисте влагу, образуя инденкарбоновую кислоту.

Облученные участки фотослоя, в отличие от необлученных, становятся гидрофильными, хорошо смачиваются и удаляются щелочными проявителями.

Негативные фоторезисты изготавливают на основе поливинилциннамата или на основе каучуков. Поливинилциннамат (ПВЦ) представляет собой сложный эфир циннамоильной кислоты и поливинилового спирта и имеет общую формулу R_1-O-R_2 , где R_1 – фоточувствительная циннамоильная группа; R_2 – пленкообразующая часть поливинилового спирта; О – соединяющий их атом кислорода.

При поглощении квантов излучения наиболее слабые в светочувствительных частях молекул химические связи $CN=CN$ разрываются. За счет освободившихся связей происходит фотоструктурирование, т.е. поперечное сшивание молекул ПВЦ в трехмерную сетку. Негативные фоторезисты на основе каучука наиболее часто представляют собой механическую смесь циклокаучука и бис-азида. Циклокаучук является полимерной осно-

вой и обладает слабой фоточувствительностью. Под действием облучения азиды распадаются на азот и нитрен. Нитрен, находящийся в возбужденном состоянии, вступает в химическое взаимодействие с каучуком, в результате происходит сшивание линейных полимеров каучука образующимися свободными радикалами.

Рассмотрим основные характеристики фоторезиста.

1. Светочувствительность – величина обратная экспозиции,

$$S = \frac{1}{H} = \frac{1}{Jt}, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right], \quad (1.10)$$

где S – интегральная светочувствительность, определяемая по всему спектру (может быть спектральной); t – время облучения; J – интенсивность светового потока.

2. Разрешающая способность фоторезиста – максимально возможное число раздельно передаваемых линий защитного рельефа на 1 мм поверхности подложки:

$$R = \frac{1000}{2l}, \left[\frac{\text{лин}}{\text{мм}} \right], \quad (1.11)$$

где l – ширина линий.

Следует различать разрешающую способность фоторезиста $1000 \left[\frac{\text{лин}}{\text{мм}} \right]$ и процесса фотолитографии $600 \left[\frac{\text{лин}}{\text{мм}} \right]$ (из-за интерференции, дифракции). Кроме того, разрешающая способность фотолитографии зависит от толщины фоторезиста (боковое протравливание возрастает при толстых пленках фоторезиста). Разрешающая способность определяется совершенством фотошаблонов и источников ультрафиолетового излучения. Разрешающая способность позитивных фоторезистов выше, чем негативных.

3. Устойчивость к химическим воздействиям, так как фоторезист подвергается воздействию концентрированных кислот и щелочей несколько минут. Кислотоустойчивость определяется химическим составом его полимерной основы. Иногда для этих целей вводят специальные добавки (новолак, эпоксидные смолы и др.). Если фоторезист изготовлен на основе каучука, то можно травить на глубину до 100 мкм. Кислотоустойчивость определяется фактором травления

$$K = \frac{h}{x}, \quad (1.12)$$

где h – глубина травления, x – боковое подтравливание.

Устойчивость фоторезиста к химическим воздействиям зависит от толщины и состояния фоторезистивного покрытия.

4. Равномерность фоторезистивного покрытия рассматривают либо на отдельной подложке (для определения градиентов), либо на различных (для определения воспроизводимости покрытия). Равномерность определяется условиями нанесения, вязкостью, плотностью, смачиваемостью.

Фотошаблоны являются основными инструментами фотолитографии, с их помощью производится локальное облучение фотослоя в соответствии с топологией микросхемы.

Фотошаблон для изготовления структур микросхем – плоскопараллельная пластина (или гибкая пленка) из прозрачного для УФ-излучения материала с нанесенным на ее рабочую поверхность непрозрачным рисунком, соответствующим топологии одного из слоев структуры микросхемы и многократно повторенным со строго определенным шагом в пределах рабочей области пластины (или пленки).

Для основы фотошаблонов применяют оптическое боросиликатное стекло или полимерные пленки, которые хорошо обрабатываются и не изменяют свойств под действием излучения. Для выполнения рисунка применяют галоидно-серебряную фотографическую эмульсию (эмульсионные фотошаблоны), металлы (металлизированные фотошаблоны) и полупрозрачные для видимого света оксиды или другие материалы (транспарентные, цветные фотошаблоны).

1.5.4.2. Особенности фотолитографии. Процесс формирования фотослоя должен обеспечить получение равномерных по толщине бездефектных фотослоев с хорошей адгезией к подложке при сохранении исходных свойств.

Подготовка подложек к нанесению фоторезиста в каждом конкретном случае индивидуальна и определяется материалом подложки, состоянием поверхности и дальнейшим назначением фотомаски. Под подложкой в литографических процессах подразумевают тот материал, на котором формируют резистивный слой. В производстве, например, полупроводниковых интегральных схем фотолитографию проводят по монокристаллическому и поликристаллическому кремнию, пленкам диоксида кремния, примесносиликатных стекол, алюминия.

Если фотомаска используется для локального травления, то качество передачи рисунка на подложку (например, пленку SiO_2) зависит в основном от адгезии маски к подложке и от способности травителя проникать под слой фотомаски по границам окон.

Адгезия фотослоя увеличивается с повышением смачивания поверхности подложки фоторезистом. Проникновение травителя под слой фотомаски, приводящее к растравливанию подложки (рис. 1.42), в свою очередь зависит от смачивания поверхности подложки, в данном случае SiO_2 , травителем или водой.

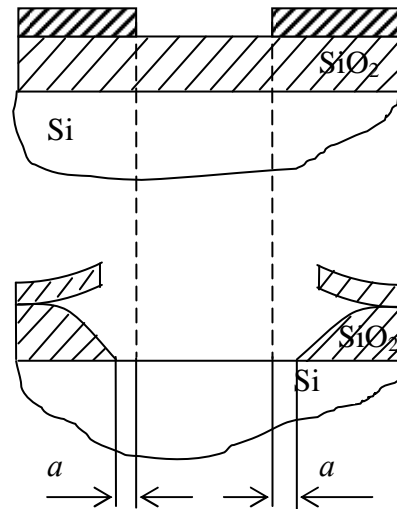


Рис. 1.42. Клинь травления (a) при передаче рисунка с фотомаски на пленку SiO_2

Критерием смачиваемости является краевой угол θ смачивания поверхности твердого тела жидкостью (рис. 1.43).

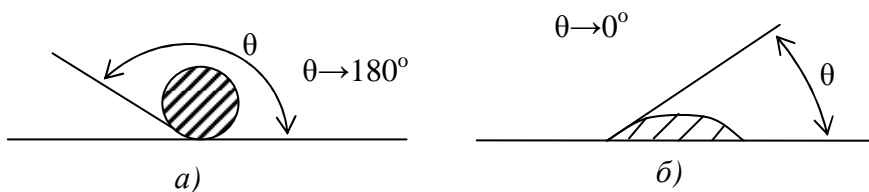


Рис. 1.43. Поверхность, плохо (a) и хорошо (b) смачиваемая жидкостью;
 θ – краевой угол смачивания поверхности

Оптимально подготовленной к фотолитографии поверхностью является поверхность, которая хорошо смачивается фоторезистом и плохо смачивается водой, т.е. для которой выполняются условия

$$\theta_F \rightarrow 0^\circ; \quad \theta_B \rightarrow 180^\circ. \quad (1.13)$$

Эти условия не противоречат друг другу для большинства полимерных фоторезистов, так как они, будучи сами гидрофобными, хорошо смачивают гидрофобные, а не гидрофильные поверхности.

Таким образом, подготовленная к нанесению фоторезиста поверхность должна быть не только очищена от загрязнений, но также должна быть гидрофобной.

Фотолитографию по пленке диоксида кремния целесообразно проводить непосредственно после термического оксидирования кремния, пока поверхность диоксида гидрофобна. Если пластины с пленкой SiO_2 хранились более 1 ч, их поверхность становится гидрофильной и необходима термообработка в сухом инертном газе, в вакууме или специальная гидрофобизирующая обработка с применением растворов органосиланов.

1.5.4.3. Методы нанесения фоторезиста. Нанесение слоя фоторезиста можно выполнять центрифугированием, распылением, погружением. Сравнительно недавно начали применять сухие пленочные фоторезисты, которые наносят накаткой. Иногда применяется электростатический метод нанесения.

Метод *центрифугирования* (рис. 1.44) применяется для круглых подложек, т.е. пластин кремния и других полупроводников.

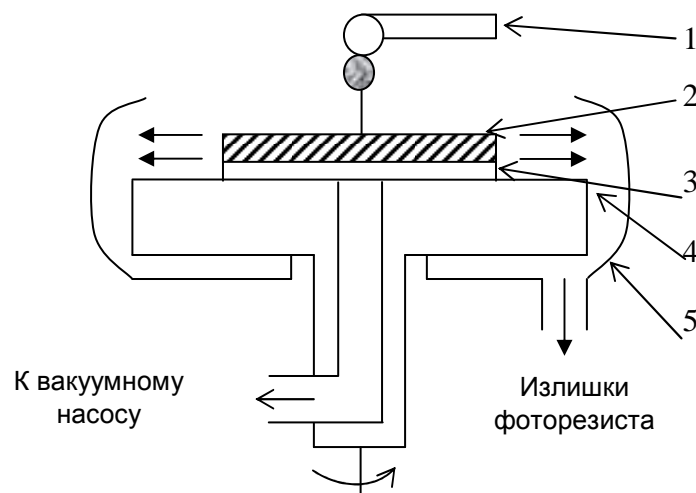


Рис. 1.44. Схема процесса нанесения фоторезиста центрифугированием:
1 – дозатор фоторезиста (капельница); 2 – слой фоторезиста; 3 – подложка;
4 – диск центрифуги; 5 – сборник фоторезиста

Подложки располагаются на диске центрифуги и удерживаются при вращении вакуумным прижимом. Несколько капель фоторезиста наносят на подложку и мгновенно включают центрифугу, так как вязкость фоторезиста очень быстро меняется в результате испарения растворителей. При вращении центрифуги жидкий фоторезист растекается по поверхности подложки под действием центробежных сил, пропорциональных числу оборотов центрифуги. За счет поверхностного натяжения фоторезиста воз-

никают силы сопротивления растеканию, пропорциональные вязкости фоторезиста, поэтому он не полностью сбрасывается с поверхности подложки.

Зависимость оставшегося на поверхности жидкого слоя фоторезиста h от частоты вращения центрифуги ω и кинематической вязкости фоторезиста ν определяется соотношением

$$h = A \sqrt{\nu / \omega}, \quad (1.14)$$

где A – коэффициент пропорциональности, подбираемый экспериментально.

С ростом числа оборотов толщина снижается, уменьшается и ее разброс. При достижении некоторой критической величины толщина становится постоянной, а рассеяние минимальным.

В процессе центрифугирования на периферии подложки образуется утолщение (при $\omega < \omega_{кр}$) – валик, высота и ширина которого зависят от вязкости фоторезиста, частоты вращения центрифуги и формы подложки. Применение пластин кремния с периферийной фаской и работа при частотах вращения центрифуги, больших 2000 об/мин, позволяет получать более плоскую поверхность фотослоя.

Рассмотрим профили фоторезистивного слоя, полученные на подложке при различных скоростях вращения центрифуги (рис. 1.45).

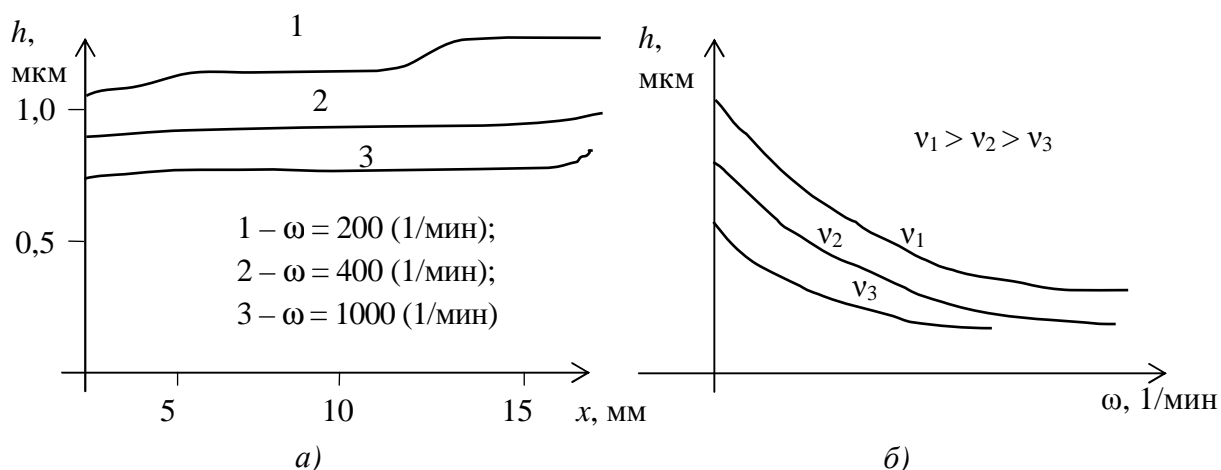


Рис. 1.45. Профили фоторезистивного покрытия в зависимости от скорости вращения центрифуги (а) и вязкости фоторезиста (б)

Выбор толщины фоторезистивного слоя определяется следующими противоречивыми факторами:

- чем тоньше слой, тем выше разрешающая способность;
- чем толще слой, тем выше его устойчивость к травителям.

Время центрифугирования мало влияет на толщину фоторезистивного слоя и составляет 20 – 30 с. Чтобы растворитель не успел испариться, время между нанесением фоторезиста из капельницы и началом центрифугирования должно быть минимальным.

Достоинства метода:

- высокая воспроизводимость толщины фотослоя в пределах каждой пластины и партии пластин;
- возможность получения тонких слоев (0,1 – 0,2 мкм).

Недостатки метода:

- невозможность получения равномерных слоев толщиной более 2 – 3 мкм;
- наличие краевого утолщения;
- загрязнение слоев из-за захвата пылинок из воздуха при вращении центрифуги;
- необходимость тщательного контроля и корректировки вязкости фоторезистов из-за испарения растворителей;
- в пленках, высыхающих при действии центробежных сил, возникают внутренние напряжения;
- процесс плохо поддается автоматизации.

Нанесение фоторезиста *распылением* производится форсункой, в которой для диспергирования струи раствора фоторезиста при выходе из сопла используется сжатый воздух.

Распылением можно наносить слой на рельефные поверхности (рис. 1.46), получать слои толщиной от 0,3 до 20 мкм с точностью 5 %. Краевое утолщение слоя отсутствует. Вследствие отсутствия механических напряжений дефектность нанесенных слоев в 3 – 4 раза меньше по сравнению с методом центрифугирования. Расход фоторезиста существенно меньше.

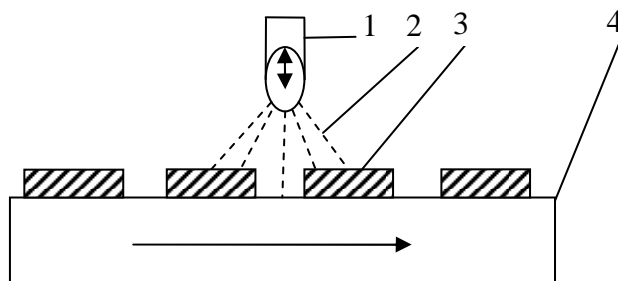


Рис. 1.46. Нанесение слоя резиста распылением: 1 – сопло форсунки; 2 – диспергированный резист; 3 – подложки; 4 – стол установки

Процесс отличается высокой производительностью и возможностью автоматизации. Основная проблема при нанесении слоев распылением – затягивание пыли и других загрязнений струей диспергированного фоторезиста. Распыление в основном применяют для нанесения резиста на прямоугольные диэлектрические подложки.

Метод *погружения* имеет две разновидности. Первый способ – простое погружение подложки в фоторезист и извлечение из него с регулируемой скоростью 6 – 150 мм/мин. При медленном извлечении получаются более тонкие и однородные слои. Такое окунание применяется для двустороннего нанесения слоев и для получения толстых слоев, когда требования к равномерности толщины не слишком высокие. Для устранения клиновидности слоя подложку поворачивают на 180° и выполняют повторное окунание.

Простое погружение применяют также для нанесения резиста на гибкую подложку в виде непрерывной ленты. С помощью роликов лента с постоянной скоростью при перематке с рулона пропускается через ванну с резистом и поступает из нее в камеру сушки. Это так называемая рулонная технология.

При втором способе происходит окунание подложки в воду или органический растворитель через тонкий слой наносимого резиста (рис. 1.47) и в обратном ее извлечении. Благодаря полярности молекулы резиста ориентируются к поверхности, подложку обволакивает монослой при погружении и монослой при извлечении. Повторяя погружения несколько раз, можно получать слой резиста толщиной 150 – 300 Å. Основное преимущество процесса – получение очень тонких, равномерных, бездефектных слоев с высокой воспроизводимостью параметров, что обеспечивает в дальнейшем формирование элементов субмикронных размеров.

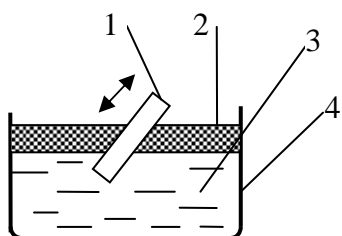


Рис. 1.47. Нанесение слоя резиста погружением:

1 – подложка; 2 – слой резиста;
3 – ванна; 4 – вода или растворитель

Накатка (рис. 1.48) применяется для нанесения сухих пленочных резистов, представляющих собой трехслойную ленту. Слой резиста заключен между несущей и более тонкой защитной полимерными пленками. Перед накаткой резиста вращающимся валиком на подогретую подложку защит-

ную пленку удаляют. Толщина сухого резиста составляет 1 – 2 мкм, поэтому метод применяют для случая получения топологических рисунков с большими размерами элементов, до десятков микрометров.

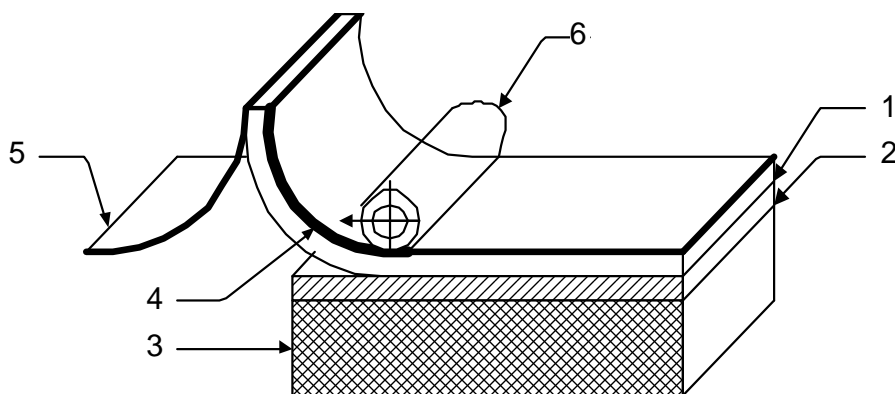


Рис. 1.48. Нанесение слоя резиста накаткой: 1 – пленочный резист; 2 – пленка на подложке 3; 4 – несущая полимерная пленка; 5 – защитная пленка; 6 – валик для накатки

В *электростатическом* методе нанесения (рис. 1.49) фоторезист дробится на части форсункой либо само электрическое поле дробит фоторезист. Капли ускоряются полем и попадают на подложку. К основным недостаткам метода относится пыль, притягиваемая электростатическим полем.

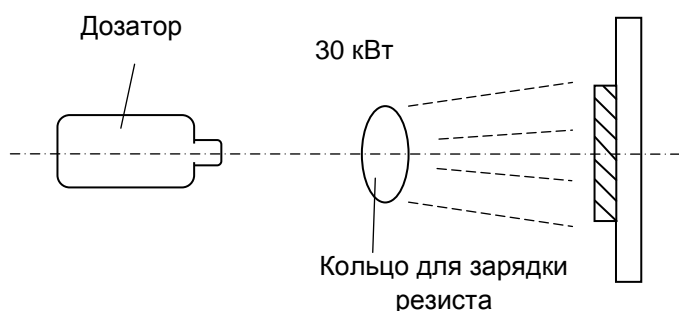


Рис. 1.49. Электростатический метод нанесения фоторезиста

1.5.4.4. Термообработка (первая сушка). Первая сушка выполняется после нанесения слоя жидкого фоторезиста. В процессе сушки удаляется растворитель, в пленке фоторезиста происходит сложный релаксационный процесс плотной упаковки молекул, уменьшающий внутренние напряжения и увеличивающий адгезию фотослоя к подложке.

Основными параметрами процесса сушки являются температура и время. При низких температурах адгезия фотослоя к подложке плохая, преобладает сцепление между собственными молекулами полимера (когезия). Этим объясняется отслаивание фотослоя при проявлении, кроме этого, возможно неполное удаление растворителя. При больших температурах в фоторезистах идет термополимеризация (при 140 – 200 °С) и другие процессы. Так, в слое позитивного фоторезиста при температурах, больших критических, протекают те же необратимые явления, что и при экспонировании. Качество проведения сушки влияет на все остальные операции фотолитографии.

Конвекционная сушка выполняется в термостатах. Образующаяся на поверхности уплотненная часть слоя препятствует равномерной и полной сушке. Для равномерного испарения растворителя и снижения внутренних механических напряжений в фотослое сушку выполняют в два этапа: 15 – 20 мин при 18 – 20 °С, 30 – 60 мин при 90 – 120 °С.

Термокомпрессионная сушка под давлением азота позволяет формировать качественные фотослои, так как присутствующие пары растворителя обеспечивают оптимальные условия для ориентационной релаксации молекул фоторезиста.

Инфракрасная (ИК) сушка отличается равномерным удалением растворителя по толщине слоя резиста. ИК-излучение вначале нагревает подложку, и процесс сушки идет от нижних, глубинных слоев в фоторезисте. Поэтому в слое фоторезиста нет пузырьков, трещин, пор. Длительность ИК сушки составляет 2 – 3 минуты.

Инфракрасная сушка является основным промышленным методом, применяемым в современных фотолитографических линиях. Она выполняется непосредственно после нанесения фоторезиста под ИК-лампами при непрерывной продувке азотом. Сушка завершает процесс формирования фотослоя.

В настоящее время ведутся работы по созданию установок СВЧ-сушки фоторезиста. Применение СВЧ энергии позволяет снизить длительность сушки до 1 – 2 минут.

1.5.4.5. Формирование фотомаски. На этом технологическом этапе в фотослое создается топологический рисунок. В соответствии с принципами локальности и послойности технологических обработок в процессе изготовления структур полупроводниковых микросхем литография проводится несколько раз.

Начиная со второй литографии необходимо совмещать рисунок шаблона с рисунком на подложке, полученным при формировании предыдущего технологического слоя.

Контактное экспонирование является хорошо изученным и освоенным в промышленном производстве методом передачи изображения с шаблона на фотослой.

Совмещение выполняют визуально на той же установке, что и последующее экспонирование, путем наложения (при наблюдении под микроскопом) рисунков шаблона и подложки. Точность совмещения зависит:

- от точности совмещения фотошаблонов в комплекте;
- от точности воспроизведения топологического рисунка предыдущим фотолитографическим процессом;
- от точности самой операции совмещения.

Для совмещения шаблонов друг с другом в комплекте и каждого шаблона с рисунком на подложке применяются специальные топологические рисунки – фигуры совмещения в виде квадратов, крестов, штрихов и др. Точность самой операции совмещения зависит от точности оборудования, совершенства фигур совмещения и индивидуальных способностей оператора.

1.5.4.6. Экспонирование. Время экспонирования зависит от толщины фоторезиста. Проводят специальные эксперименты и по их результатам подбирают оптимальные параметры: время 5 – 15 с, интенсивность 40 – 200 Дж/м². От времени экспонирования зависит ширина линий рисунка, т.е. погрешность фотолитографического процесса (рис. 1.50). Кроме того, следует оптимизировать дозу экспонирования.

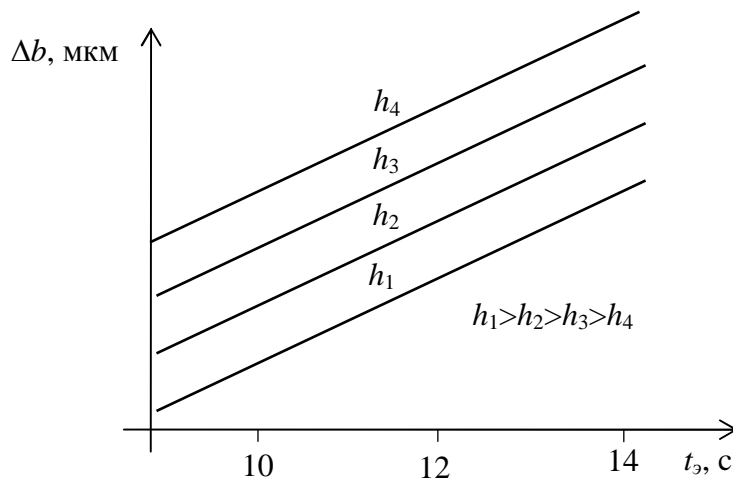


Рис. 1.50. Зависимость ширины линий рисунка от времени экспонирования

Существуют следующие методы экспонирования: контактный и проекционный (с мультиплицированием).

Наиболее широко в производстве ИМС применяется контактный метод (рис. 1.51).

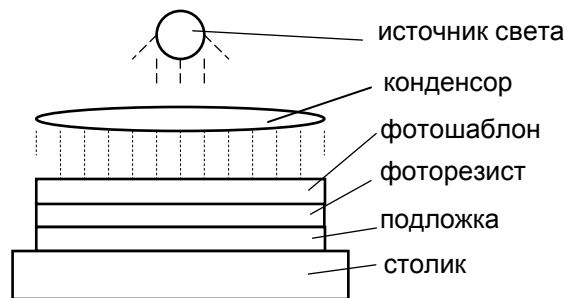


Рис. 1.51. Контактный метод экспонирования

К недостаткам контактного метода относятся:

- на совмещение требуется определенный зазор, зависящий от разрешения;
- трудность выдержки точного размера зазора, вследствие чего изнашивается фотошаблон.

В проекционном методе (рис. 1.52) проявляются следующие достоинства:

- объектив имеет высокую разрешающую способность;
- возрастает срок службы фотошаблона;
- возможность применения фотошаблонов с масштабом, превышающим 1:1 (10:1 и 5:1), в результате чего значительно возрастает разрешающая способность, но снижается производительность процесса.

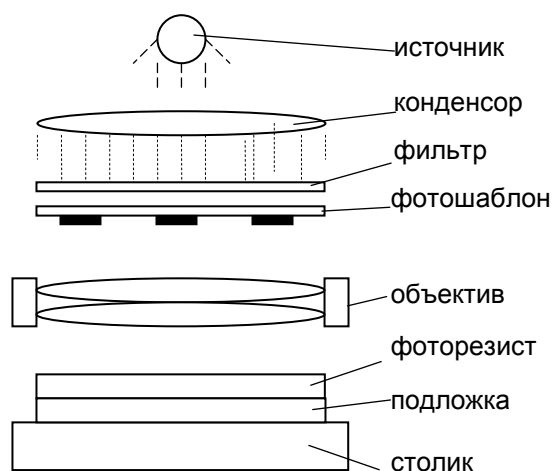


Рис. 1.52. Проекционный метод экспонирования

Недостатками проекционного метода являются:

- пошаговое мультиплицирование;
- в связи с тем, что между фотошаблоном и подложкой большое расстояние, наблюдаются явления дифракции и интерференции.

1.5.4.7. Проявление. Это процесс удаления лишних участков в фотослое в соответствии с локальным облучением при экспонировании.

Проявление негативных фоторезистов представляет собой простое растворение необлученных участков в органических растворителях – толуоле, трихлорэтилене, диоксане и др. Проявитель должен обладать хорошей растворяющей способностью и минимальным воздействием на облученные участки фотослоя. При заниженной экспозиции облученные участки сильно набухают, что приводит к искажению рисунка и, следовательно, к уменьшению разрешающей способности фотолитографического процесса. Если экспонирование выполнено при оптимальной экспозиции, перепроявление негативного фоторезиста неопасно, поэтому процессы проявления легко автоматизировать.

Проявление позитивных фоторезистов сопровождается химической реакцией превращения полученной при экспонировании инденкарбоновой кислоты в хорошо растворимую соль, которая затем легко вымывается. В качестве проявителей применяют слабые водные и водно-глицериновые щелочные растворы КОН (5,5 %), NaOH, Na₃PO₄ (2 %).

При проявлении в растворе тринатрийфосфата проявляются следующие особенности: если слой проэкспонирован не полностью, раствор окрашивается в малиновый цвет, так как часть молекул кислоты не превращается в соль натрия, а соединяется с неразрушенными молекулами тринатрийфосфата, образуя краситель. Если молекулы тринатрийфосфата разрушены полностью на всю глубину фотослоя, проявитель остается бесцветным.

Важная характеристика проявителя – величина *pH* раствора (нейтральные – *pH* = 7, кислые – *pH* < 7, щелочные – *pH* > 7). В производстве микросхем следует подбирать оптимальную кислотность проявителя и температуру проявления.

1.5.4.8. Термообработка (вторая сушка). Проводится для удаления проявителя, воды, повышения химической стойкости и адгезии фотомаски к подложке. У негативных фоторезистов сушка сопровождается термополимеризацией, у позитивных – разрушением молекул и частичной сшивкой полимерных составляющих. Чтобы не произошло ухудшения качества фотомаски, сушку проводят в два – три этапа с постепенным подъемом

температуры до максимальной. Для большинства фоторезистов максимальная температура второй сушки – 150 °С, общее время – 1 – 1,5 ч. Облучение перед второй сушкой большой дозой глубокого ультрафиолета устраняет пластическое течение резиста при термообработке и существенно улучшает качество фотомаски.

1.5.4.9. Передача изображения с фотомаски на материал слоя микросхемы. Эта операция может выполняться двумя способами.

Травление при прямой фотолитографии является ответственной операцией, так как брак после травления неисправим. Травитель должен взаимодействовать только с удаляемым материалом, так как возможно нежелательное удаление ранее сформированных областей структур микросхем, а при воздействии на фотослой не обеспечивается контролируемость размеров формируемых элементов.

Качество травления определяется величиной адгезии фотомаски к подложке, наличием в маске дефектов и зависит от свойств травителя, способа и режимов травления. Основным критерием качества переноса рисунка является клин травления, т.е. уход горизонтальных размеров рисунка по отношению к маске.

Большинство жидких травителей изотропны, т.е. скорость травления в них практически одинакова во всех направлениях, поэтому рисунок маски переносится с искажением (рис. 1.53). Кроме того, резисты часто теряют адгезию к прилегающим пленкам при обработке их в нагретых кислотах. Процесс травления структур субмикронных размеров затрудняется из-за сил поверхностного натяжения растворов, которые приводят к образованию «мостиков» жидкости и пустого пространства под ними между двумя соседними полосками резиста. В этой области не происходит травления нижележащей пленки. В связи с этим жидкостное травление не может обеспечить получение элементов с размерами менее 1 – 2 мкм.

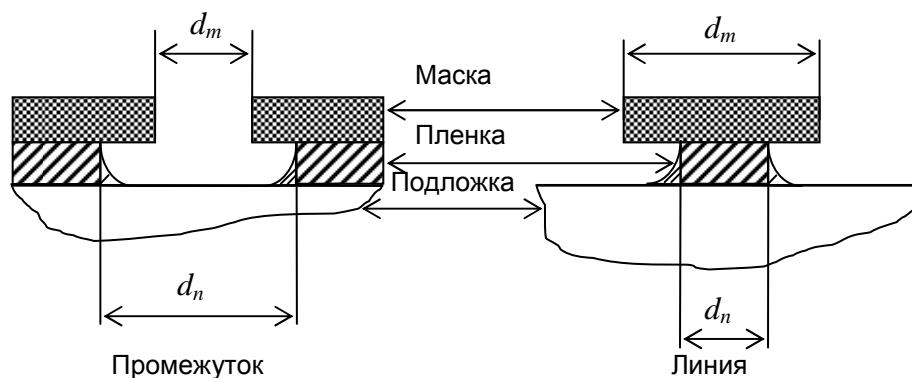


Рис. 1.53. Искажение топологического рисунка при жидкостном изотропном травлении

Сухое травление обеспечивает большее разрешение. Наиболее широко для получения интегральных схем с субмикронными размерами элементов применяют реактивное ионное и ионно-плазменное травление в вакуумных камерах с параллельными электродами. Эти методы отличаются высокой анизотропией травления, что позволяет четко контролировать размеры вытравленных областей. Параметры процессов травления следует строго контролировать, чтобы исключить нежелательные побочные эффекты – радиационные повреждения и осаждение полимеров.

При обратной фотолитографии перенос топологии с фотомаски на слой интегральной микросхемы совмещен с операцией удаления фотомаски или с операцией нанесения слоя.

Удаление фотомаски имеет целью также тщательную очистку от всех загрязнений подложки в процессе фотолитографии.

Плазмохимическое удаление фотомаски – наиболее эффективный и безопасный процесс, одновременно обеспечивает и очистку пластин. Выполняется, например, в вакуумных полуавтоматах «Плазма-600», «Плазма-600Т» в низкотемпературной плазме смеси кислорода с азотом. Азот предохраняет открытые участки кремния от окисления. Длительность обработки существенно сокращается по сравнению с жидкостными процессами. Однако плазмохимическая обработка не в полной мере удовлетворяет возросшим требованиям к технологии больших и сверхбольших микросхем, поскольку выделяющиеся при окислительной деструкции фоторезиста газообразные продукты CO_2 , CO , NO_2 , H_2O адсорбируются и химически взаимодействуют с диоксидом кремния. Кроме того, на поверхности остаются продукты неполного сгорания фотослоя, металлические загрязнения; возможны радиационные дефекты.

В современных технологических процессах сухого травления успешно используется установка планарного реактора (рис. 1.54).

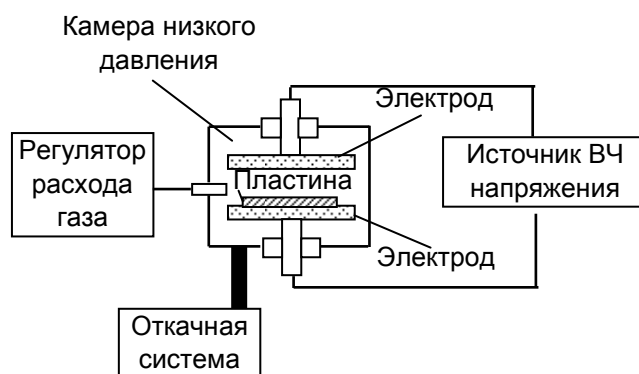


Рис. 1.54. Травление в планарном реакторе

В этой установке электроды, на которые подается высокочастотное напряжение, имеют плоскую форму и расположены внутри камеры, причем обрабатываемые пластины размещаются на одном из электродов (заземленном или незаземленном). В соответствии с тем, какой из электродов заземлен, выбирается оптимальное давление газа: 1,33 Па – для расположения пластин на незаземленном электроде и 13,3 Па – на заземленном.

При использовании инертного газа при низких давлениях и расположении обрабатываемых пластин на незаземленном электроде реализуется ионное травление. При использовании химически активных газов при более высоких давлениях и расположении обрабатываемых пластин на заземленном электроде реализуется плазменное травление. Изменяя расположение пластин, давление и состав газа, в планарном реакторе можно реализовать любую комбинацию данных методов в зависимости от требований, предъявляемых к анизотропии, избирательности и скорости процесса травления.

Главным достоинством установок планарного типа является высокая анизотропия травления, обусловленная следующими причинами:

- 1) электрическое поле ускоряет заряженные частицы в направлении, перпендикулярном к поверхности пластины;
- 2) наблюдается распыление в результате взаимодействия поверхности образца с ионами.

Технологические маршруты удаления фотомаски разрабатываются для каждого конкретного случая в зависимости от марки фоторезиста, материала подложки и др.

Фотолитография в глубоком ультрафиолете. Экспонирование в области глубокого ультрафиолета позволяет значительно повысить разрешающую способность фотолитографии за счет уменьшения дифракции света с понижением длины волны. Это сравнительно новое направление фотолитографии имеет ограничения, связанные с необходимостью согласования спектров источника излучения и фоторезиста.

1.5.5. Современные технологии оптической литографии

Современные методы литографии обеспечивают возможность формирования структур микронных размеров. Перспективной задачей является продвижение в нанометровую область.

1.5.5.1. Иммерсионная литография. Простым и неожиданным решением оказалась возникшая совсем недавно и интенсивно развиваемая идея иммерсионной литографии. Сущность метода заключается во введении в пространство между поверхностью объектива и слоем фоторезиста иммерсионной жидкости (рис. 1.55).

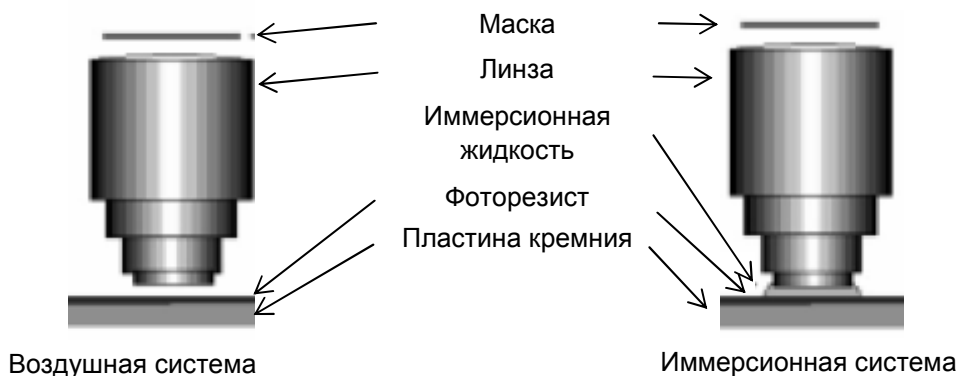


Рис. 1.55. Схемы воздушной и иммерсионной систем

Простейшим вариантом иммерсии является вода. Использование иммерсии с показателем преломления, превышающим показатель преломления воздуха, позволяет увеличить разрешающую способность и глубину резкости.

При использовании иммерсии с показателем преломления 1,44 рабочая длина волны сокращается до $\lambda_0/n = 135$ нм.

Проблемами иммерсионной литографии являются:

- использование сред с большим показателем преломления;
- неоднородности в иммерсионной жидкости – пузырьки и завихрения, которые возникают при перемещении пластинок относительно объектива с высокой скоростью;
- возможные температурные изменения;
- посторонние включения.

Применение иммерсионного метода позволит выйти на характеристические размеры 35 – 65 нм.

1.5.5.2. Голографическая литография. Несмотря на постоянное продвижение в сторону уменьшения характеристических размеров при использовании методов классической литографии (по прогнозу специалистов эта тенденция приближается к насыщению) представляют интерес методы голографической литографии. Рассмотрим особенности *голографической литографии с использованием полного внутреннего отражения*. Метод состоит из следующих этапов:

- получение фотомаски;
- получение голограммы фотомаски;
- перенесение изображения, восстановленного голограммой, на фоторезист.

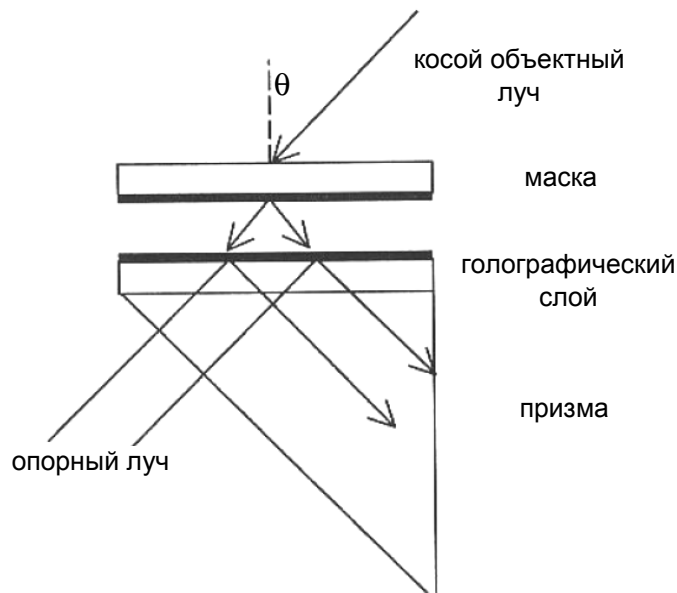


Рис. 1.56. Схема записи голограммы фотомаски

Фотомаска изготавливается с использованием электронно-лучевого пишущего устройства в слое резиста. Затем производится ионно-лучевое травление хрома на кварце. Голографическая запись производится по схеме, приведенной на рис. 1.56.

В качестве источника когерентного излучения используется аргоновый лазер с длиной волны 364 нм. Маска (объект) освещается объектным пучком под углом θ к нормали. Угол освещения подбирается в соответствии с периодом d рисунка на маске и длиной волны λ так, чтобы выполнялось условие

$$\sin \theta = \lambda/2d. \quad (1.15)$$

При освещении под этим углом два дифракционных порядка, симметрично расположенные относительно нормали, интерферируют с коллимированным опорным пучком в плоскости голографического слоя. Расстояние от маски до голографического слоя составляет 100 мкм. Для формирования структур с различным периодом угол θ регулируется. Восстановленное голограммой изображение впечатывается в слой фоторезиста.

Метод позволяет записывать периодические (с шириной штриха 120 нм) и квазипериодические (с наименьшей шириной штриха 150 нм) структуры.

1.5.5.3. Субмикронная литография. Приведем современные литографические процессы в порядке уменьшения длины волны λ :

- фотолитография в ультрафиолетовой области спектра и в жестком ультрафиолете ($\lambda = 0,2 - 0,3$ мкм);

- рентгенолитография ($\lambda = 0,4 - 5,0$ нм);
- электронно-лучевая литография ($\lambda < 0,01$ нм);
- ионная литография ($\lambda < 0,001$ нм).

С точки зрения сокращения минимальных топологических размеров областей интегральных структур наиболее перспективными являются электронно-лучевая и ионная литографии, в которых вследствие малых значений длины волны можно не учитывать влияние дифракции на разрешающую способность. Источники электронных и ионных пучков характеризуются высокой яркостью, что позволяет сократить время экспонирования элементов микрорисунка до секунд, а также малым разбросом энергий частиц в пучке (около 0,4 эВ для автоэмиссионных источников), благодаря чему удается уменьшить характерные искажения (абберации).

Поскольку электроны и ионы обладают электрическим зарядом, они взаимодействуют с электрическим и магнитным полями, что позволяет создавать электростатические и магнитные линзы, обеспечивающие фокусировку и центровку электронного луча, а также возможность сканирования по поверхности образца. При этом возможно бесшаблонное экспонирование резиста, нанесенного на поверхность полупроводниковой пластины, что позволяет использовать электронно-лучевую и ионную литографию для создания фото- и рентгеношаблонов очень высокого качества.

Важным достоинством электронно-лучевой литографии является возможность экспозиции непосредственно слоя оксида кремния без использования резистов. Экспонированные области оксида травятся в несколько раз быстрее, чем неэкспонированные.

Ионная литография позволяет сопровождать прорисовку элементов микрорисунка одновременным распылением экспонируемого слоя (например, оксида кремния).

Тем не менее, существует ряд факторов, ограничивающих использование электронно-лучевой и ионной литографий в процессе производства современных СБИС. К основным из них следует отнести:

- эффект близости, ограничивающий разрешающую способность электронно-лучевой литографии и обусловленный рассеянием электронов в слое резиста вследствие их малой массы;
- наличие определенных искажений (сферическая и хроматическая абберации, астигматизм), ограничивающих разрешающую способность, которые невозможно полностью скорректировать электро- и магнитооптическими системами;

- сравнительно низкую производительность, обусловленную необходимостью сканирования сфокусированным «точечным» или профильным электронным (ионным) пучком;
- высокую стоимость оборудования, обусловленную необходимостью использования высокочистых и дорогостоящих материалов для создания электростатических элементов электронно- и ионно-оптических систем, прецизионной установкой элементов литографической системы относительно главной оптической оси, необходимостью обеспечения глубокого вакуума в рабочей камере.

Перечисленные ограничивающие факторы требуют разработки новых методов формирования микрорисунков на поверхности полупроводниковых пластин в рамках фото- и рентгенолитографии.

Основным недостатком процесса фотолитографии в ультрафиолетовой области спектра является сравнительно большая длина волны фотонов (0,2 – 0,3 мкм), затрудняющая формирование элементов микрорисунка с размерами менее 1 мкм вследствие дифракции. Кроме того, существует ряд проблем, связанных с изготовлением и эксплуатацией фотошаблонов.

Так, сравнительно недорогие эмульсионные фотошаблоны имеют ограниченный срок службы (не более 10 экспозиций) и при использовании контактной печати являются источниками дефектов на поверхности резиста, что существенно снижает выход годных кристаллов.

Для устранения этих недостатков используют более дорогостоящие фотошаблоны с маскирующими слоями из оксидов металлов, имеющие продолжительный срок службы (не менее 100 экспозиций) и предусматривающие возможность периодической очистки. Кроме того, используют проекционную печать, практически исключая износ фотошаблона, но сильно ограничивающую разрешающую способность литографии.

Использование для литографического экспонирования низкоэнергетического рентгеновского излучения (1 – 10 кэВ) с длинами волн порядка 0,4 – 5 нм позволяет значительно уменьшить влияние дифракции на качество формируемого на поверхности полупроводниковой пластины рисунка. При этом необходимо решать целый комплекс проблем, не позволяющих рассматривать рентгенолитографию в качестве полной альтернативы фотолитографии в ультрафиолетовой области спектра.

Прежде всего, затруднительно создать источник рентгеновских лучей высокой интенсивности. Рентгеновское излучение возникает при торможении в материале мишени направленного потока электронов. Причем процесс этот малоэффективный, так как большая часть энергии электронов идет на нагрев мишени. Для электронного луча диаметром 1 мм, падающего на алюминиевую мишень с водяным охлаждением, типовая величина

максимальной мощности равна 400 – 500 Вт. Мощность получаемого при этом рентгеновского излучения составляет порядка 10 мВт, причем излучение распределено по полусфере (рис. 1.57).

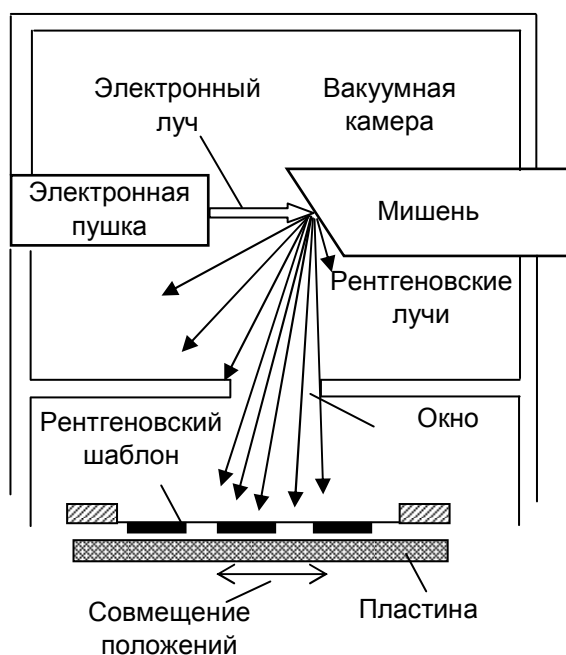


Рис. 1.57. Схема рентгенолитографической установки

Следующая трудность состоит в том, что для рентгеновского излучения не существует соответствующих зеркал и линз вследствие малой длины волны и, соответственно, высокой проникающей способности. Поэтому источник рентгеновских лучей должен быть удален от шаблона и резиста достаточно сильно, чтобы лучи падали с возможно меньшей расходимостью (см. рис. 1.57). Конечные размеры источника и расходимость лучей вызывают полутени и геометрические искажения.

Эта трудность усугубляется тем, что зазор между шаблоном и резистом должен быть достаточно большим, чтобы исключить касание с учетом кривизны поверхности пластины. Необходимость данного требования обусловлена особенностями рентгеношаблонов (рис. 1.58). Основная проблема состоит в изготовлении тонких, но достаточно прочных подложек, прозрачных к рентгеновскому излучению, так как мощность источников излучения крайне мала. Для этой цели используют различные органические и неорганические мембраны. Органические пленки изготавливаются на основе мулара, пиолена и полиимида. Неорганические содержат кремний, окисел кремния, карбид кремния и окисел алюминия. Поглощающая пленка обычно состоит из двух слоев – тонкого слоя хрома, используемого для улучшения адгезии, и слоя золота.

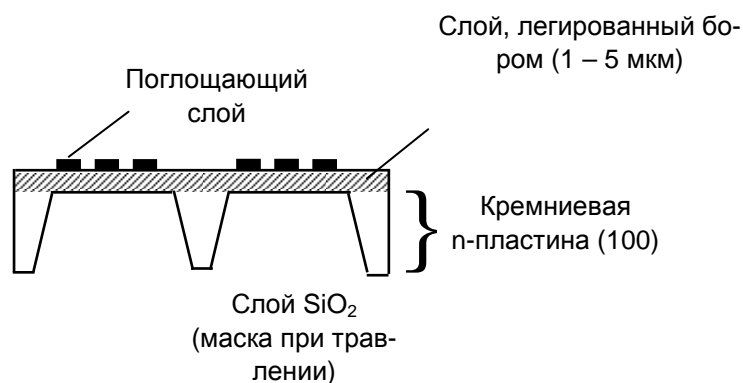


Рис. 1.58. Конструкция рентгеношаблона

Вследствие малой поглощательной способности существующих рентгенорезистов, а также малой интенсивности источников излучения требуется продолжительное время экспозиции – несколько часов. Большинство резистов поглощает менее 10 % падающего рентгеновского излучения. Наиболее распространенными рентгенорезистами являются ПММА – полиметилметакрилат (позитивный) и СОР (негативный).

Одним из перспективных путей решения проблем, связанных с применением рентгенолитографии, является использование источников синхротронного излучения.

Рентгенолитография с применением синхротронного излучения (СИ) – это многофакторный технологический процесс, в котором важную роль играют параметры многих компонентов литографической системы – источника излучения, канала вывода, рентгеношаблона, рентгенорезиста.

Синхротронное излучение испускается заряженными частицами (электронами, протонами, позитронами), движущимися с релятивистскими скоростями по искривленным траекториям. Генерация СИ обусловлена наличием у частицы центростремительного ускорения. Синхротронное излучение обладает следующими свойствами:

- это излучение с исключительно высокой коллимацией пучка;
- обладает широким, непрерывным, легко перестраиваемым спектром, перекрывающим практически весь рентгеновский диапазон и область ультрафиолетового излучения (0,1 – 100 нм);
- обладает очень высокой интенсивностью – интенсивность СИ в рентгеновском диапазоне более чем на пять порядков превышает интенсивность рентгеновских трубок;
- обладает естественной поляризацией, строго линейной на оси пучка и строго циркулярной на его периферии.

Уникальные свойства синхротронного излучения позволяют поднять на новый качественный уровень субмикронную микротехнологию и аналитические методы диагностики субмикронных структур.

В рентгенолитографии разрешающая способность определяется, с одной стороны, волновой природой рентгеновского излучения, с другой стороны – нелокальным характером формирования изображения (генерация фото- и оже-электронов рентгеновскими фотонами и вторичное экспонирование резиста этими электронами). Реальное технологическое разрешение очень сильно зависит от процесса проявления полученного скрытого изображения.

Для оценки эффективности работы рентгенолитографической системы экспонирования в той или иной области спектра нужно учитывать не только спектральную эффективность рентгенорезиста, но и рентгеновскую прозрачность, то есть оптические характеристики литографического канала вывода СИ. Поэтому в системах экспонирования с применением рентгеновского излучения одним из важных параметров является контраст получаемого рентгеновского изображения. На рис. 1.59 приведена схема рентгенографической системы экспонирования в пучках СИ.

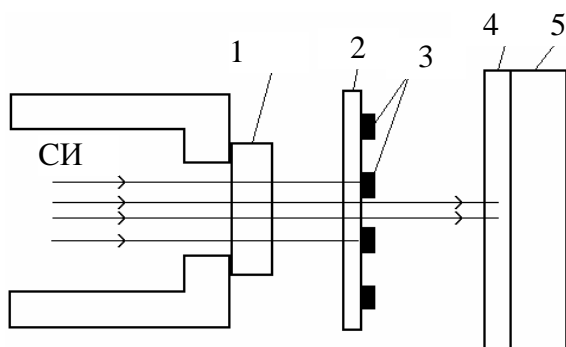


Рис. 1.59. Схема рентгенографической системы экспонирования в пучках СИ:
1 – вакуумное окно; 2 – мембрана рентгеношаблона; 3 – маска; 4 – резист;
5 – рабочая пластина

1.6. Разработка маршрута изготовления кристалла БИС

На рис. 1.60 представлено поперечное сечение базовой ячейки биполярной ИС с изоляцией р-п-переходом. Базовой ячейкой будем называть элемент (например, транзистор) или совокупность элементов ИС, периодическим повторением которых строится кристалл в целом. Вертикальными координатами $z_1 - z_{10}$ на рис. 1.60 отмечены фрагменты базовой ячейки ИС. Фрагментом будем называть структурную часть базовой ячейки кристалла, возникающую на конкретном этапе ее формирования и сохраняющуюся в том или ином виде в готовом изделии.

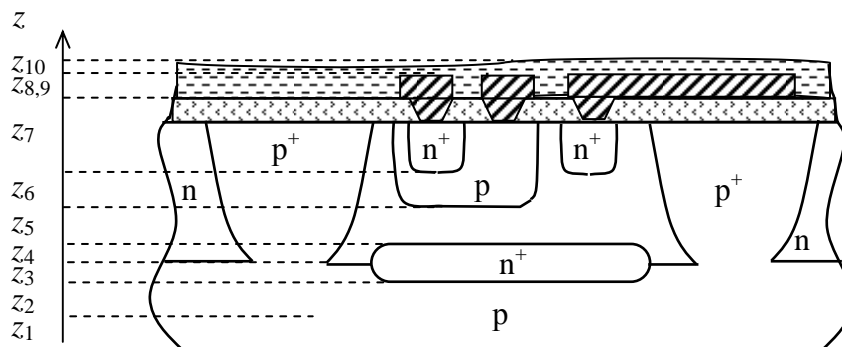


Рис. 1.60. Последовательность определения фрагментов структуры

В соответствии с таким определением фрагментом является, например, базовая, эмиттерная, коллекторная области транзистора, области изоляции, поверхностные слои и т.д. В то же время в процессе изготовления кристалла могут возникать, использоваться, а в дальнейшем исчезать такие слои, как фоторезисты, пленки ФСС, БСС (как источники диффузанта). Поскольку они даже в видоизмененном состоянии не присутствуют в законченном кристалле, то они не могут быть отнесены к понятию фрагмента.

Для того чтобы разработать маршрут операций по изготовлению кристалла БИС, оценить эффективность разработанной технологии, провести сравнительный анализ с уже существующими технологиями, необходим единый методологический подход к задачам проектирования маршрутов формирования кристаллов ИС различных классов. Одним из таких подходов является метод матричного представления маршрута.

1.6.1. Определение блочной структуры технологического маршрута

Технологические маршруты изготовления ИС одного класса имеют много общего, поскольку эти приборы строятся, как правило, на однотипных базовых ячейках. При этом отдельные части таких маршрутов имеют практически одинаковый состав операций от прибора к прибору. В связи с этим целесообразно расчленить сквозной технологический маршрут на отдельные крупные блоки операций, предназначенные для формирования определенных составных частей базовых ячеек. После выполнения операций каждого из блоков кристалл представляет собой полуфабрикат определенной степени законченности. Границы блоков устанавливаются на основании функциональных признаков, создаваемых на данном этапе фрагментов структуры ИС. Для биполярных БИС с открытыми n^+ -коллекторными

слоями (см. рис. 1.60) можно предложить следующие четыре основных блока операций:

- 1) блок эпитаксиальных структур;
- 2) блок разделения (изоляция);
- 3) блок активной структуры;
- 4) блок металлизации (разводки).

Операции блока эпитаксиальных структур предназначены для создания скрытых n^+ -областей коллекторов и осаждения на них эпитаксиального слоя. Поскольку все последующие функциональные области и элементы будут формироваться либо в эпитаксиальном слое, либо над ним, то эпитаксиальная структура может считаться исходной заготовкой для создания ИС, а блок операций – подготовительным блоком. Выделение данного блока тем более обосновано, что многие изготовители микросхем, не владеющие процессом эпитаксии, получают исходные заготовки от предприятий, специализирующихся на изготовлении эпитаксиальных структур.

Операции блока изоляции формируют боковые изолирующие области, которыми сплошная эпитаксиальная пленка разделяется на отдельные островки, как правило, прямоугольной формы. В этих островках в дальнейшем размещаются активные и пассивные элементы ИС. Качество изоляционных участков во многом определяет качество схемы в целом. Поэтому, несмотря на относительную простоту блока изоляции, он часто является центральным местом всего маршрута. По этой причине весь процесс изготовления ИС получает название по виду изоляции (например, «технология изопланар»).

Внутренняя структура элементов ИС представляет собой совокупность расположенных соответствующим образом локальных легированных областей, пассивирующих диэлектрических слоев над ними и вскрытых в этих слоях контактных окон. В большинстве маршрутов эти операции начинаются, как правило, после блока изоляции и по завершении их структура элементов ИС имеет практически законченный вид.

Операции формирования металлизации имеют одно функциональное назначение для всех ИС, что также позволяет выделить их в отдельный блок.

Очевидно, что кроме перечисленных четырех блоков стандартного техпроцесса биполярных схем имеются маршруты с дополнительными блоками операций (например, для изготовления нестандартных конструктивных элементов, если таковые должны присутствовать в кристалле).

Следует подчеркнуть, что границы блоков устанавливаются по функциональным признакам, создаваемых на данном этапе фрагментов и, как правило, операции одного блока родственны по виду воздействия на формируемую структуру. Например, операции блока активной структуры представляют собой совокупность литографических и термических процессов (легирование + отжиг + окисление). Операции блока металлизации – это совокупность литографических процессов и процессов нанесения и т.п.

Выделение крупных блоков операций хотя и дает общее представление о структуре маршрута данного вида ИС, но не позволяет провести детальный сравнительный анализ различных вариантов маршрута, выбрать оптимальный маршрут и оптимизировать его по технико-экономическим показателям.

1.6.2. Понятие микроцикла маршрута

Для детализации разрабатываемого маршрута воспользуемся следующими соображениями.

В сквозной последовательности технологических обработок маршрута ИС отыскивают повторяющиеся совокупности операций, называемые технологическими микроциклами. Технологические микроциклы могут служить базой для построения любого маршрута. Микроцикл с точки зрения оптимизации и стандартизации режимов и применяемого оборудования должен рассматриваться как единое целое, как некоторая макрооперация маршрута. В этом случае становится возможным стандартизировать целые фрагменты взаимосвязанных по цели операций, что исключит возможность эвристического подхода к подбору технологических режимов обработок.

Например, для получения рисунка слоев с минимальными геометрическими размерами и допусками на них целесообразно использовать операцию ионного травления. При существующем подходе к разработке режимов операций технолог отрабатывает непосредственно режимы травления, добиваясь высокого качества рисунка и максимальной производительности путем подбора режимов работы ионного источника, выбора состава ионообразующего газа, материала маски и т.д. Однако найденная таким образом оптимальная комбинация режимов еще не гарантирует высокого качества при изготовлении данного вида прибора. Травление ионным пучком может вызвать деградиационные изменения в ранее сформированных слоях либо послужить причиной брака на дальнейших операциях маршрута (например, шелушение поверхностного слоя за счет газовой выделе-

ний при последующих термообработках). С точки же зрения метода матричного представления в нашем примере должны отрабатываться и оптимизироваться (взаимоувязано) режимы, по крайней мере, двух операций – ионного травления и последующего термического отжига.

Кинетика отжига радиационных дефектов, внесенных на этапе травления, определяется как режимами непосредственно отжига, так и режимами предыдущей операции травления (в, частности энергией травящих частиц). Поэтому и оптимизация должна проводиться для совокупности параметров обеих последовательных операций. Сама эта совокупность может в маршруте представляться единой структурной единицей – микроциклом.

Поступая таким образом, можно создать, например, отраслевую библиотеку стандартных микроциклов с вполне определенными входными и выходными параметрами.

В зависимости от структуры запускаемого в производство прибора, требований к его параметрам технолог будет иметь возможность либо выбрать один из стандартных микроциклов ионного травления, либо в случае необходимости приступить к разработке и аттестации оригинального микроцикла, который также будет занесен в библиотеку. Таким образом значительно сокращается время отработки технологических режимов и унифицируются технологические маршруты разных приборов.

Для всестороннего сравнительного технологического анализа возможных различных вариантов маршрута одного и того же изделия принципиальным моментом метода матричного представления является характерное графическое изображение найденной повторяющейся последовательности технологических обработок. Обработки микроцикла должны изображаться последовательно в горизонтальной строке, причем каждый микроцикл занимает отдельную строку (рис. 1.61, *а*).

Из разных микроциклов выявляются технологические обработки, подобные по функциональному назначению и характеру воздействия на кристалл. При их графическом представлении они группируются в вертикальные столбцы однотипных обработок, т.е. изображаются каждая в своей строке, но обязательно друг под другом по вертикали (см. рис. 1.61, *б*).

В результате этих двух приемов технологический маршрут представляется в форме матрицы технологических обработок, в каждой из строк которой содержится комплексный набор обработок для формирования единичного структурного фрагмента базовой ячейки ИС, а в столбце – совокупность однотипных обработок из всех микроциклов (рис. 1.62).



Рис. 1.61. Графическое изображение обработок одного микроцикла в виде горизонтальной строки – *а*; изображение однотипных обработок нескольких микроциклов в виде вертикального столбца – *б*

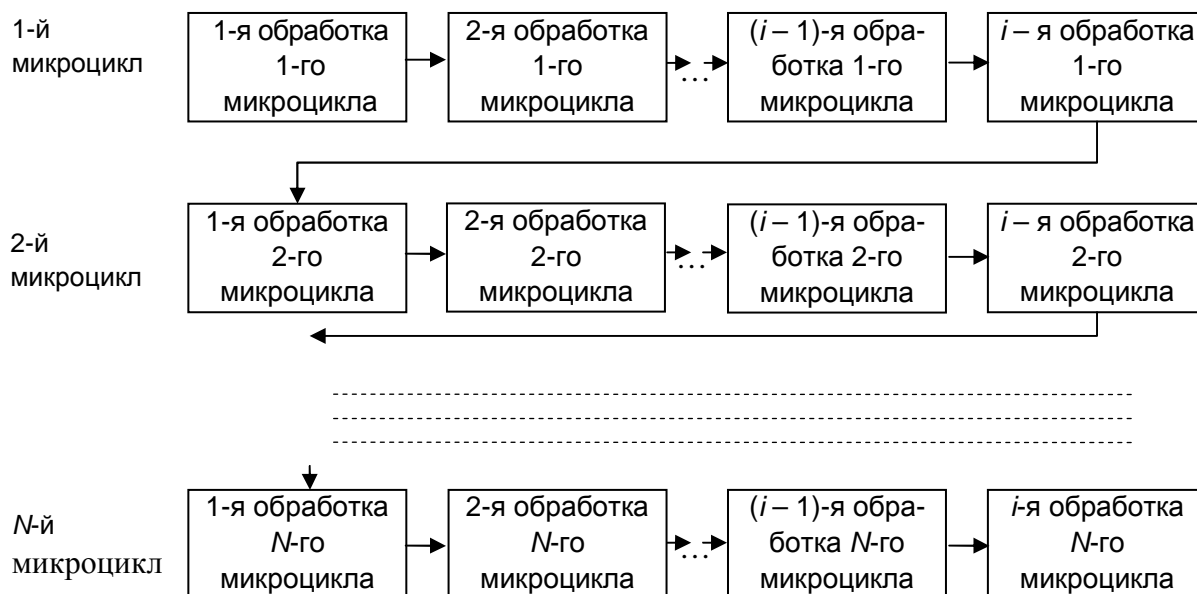


Рис. 1.62. Матричная форма представления маршрута изготовления кристалла ИС

1.6.3. Структура и состав микроциклов маршрута

Рассмотрим более подробно характеристики типичных технологических обработок с точки зрения их назначения в составе микроцикла. По результату воздействия на структуру элементов ИС все виды технологиче-

ских обработок целесообразно разделить на основные (формообразующие) и вспомогательные.

Формообразующие обработки характеризуются тем, что результат их воздействия, как правило, сохраняется в окончательно сформированном кристалле. Этот результат может выражаться либо в изменении структуры и состава материала, либо в изменении фрагментного состава базовой ячейки (добавление либо удаление определенного слоя, области и т.п.). Примерами подобных обработок могут быть имплантация примеси, травление материалов, термический отжиг, выращивание термического окисла, осаждение пленок и т.д.

Вспомогательные обработки предназначены для обеспечения условий, необходимых для проведения основных обработок. Выполнение этих обработок не приводит к изменению структуры и состава элементов ИС. К вспомогательным обработкам следует отнести такие операции, как послойная очистка, удаление фоторезистивных слоев, циклы формирования фотолитографических масок. Обычно каждый структурный фрагмент ИС можно реализовать не менее чем двумя формообразующими обработками.

Анализ маршрутов современных ИС показывает, что имеет место строго упорядоченное чередование основных и вспомогательных обработок.

Таким образом, в большинстве случаев микроцикл является четырехстадийным и содержит две формообразующие и две вспомогательные обработки.

В качестве начальной операции микроцикла наиболее целесообразно выбрать такую вспомогательную обработку, как фотолитографическая. В этом случае формализованная схема базового микроцикла будет иметь вид, показанный на рис. 1.63.

1 стадия	2 стадия	3 стадия	4 стадия
локализирующая обработка	1-я формообразующая обработка	послойная очистка	2-я формообразующая обработка

Рис. 1.63. Формализованная схема базового микроцикла

Задачей первой стадии микроцикла является создание условий для локального протекания второй стадии. Локализирующая обработка, как правило, представляет собой стандартный процесс фотолитографии, который заканчивается формированием маски фоторезиста. Первая формообразующая обработка (вторая стадия) обычно представляет собой либо опера-

цию легирования, либо операцию травления. Третья стадия стандартного микроцикла представляет собой подготовительную обработку перед второй формообразующей обработкой. Это либо удаление фоторезистивной маски плюс послойная очистка, либо просто послойная (много- или одностадийная) очистка поверхности. Четвертая заключительная стадия стандартного микроцикла – вторая формообразующая обработка. Ее назначение – завершение формообразования определенного фрагмента после первой формообразующей обработки и образование сплошного слоя, на базе которого в следующем микроцикле будет сформирован другой структурный фрагмент. Операциями второй формообразующей обработки могут быть:

- термические операции диффузии и окисления;
- термический отжиг;
- термическое окисление;
- нанесение структурного слоя (эпитаксиального, поликристаллического, окисного, нитридного, металлического и т.д.).

Возможны и другие варианты этой стадии, например, когда в едином технологическом цикле на второй формообразующей обработке (стадия 4) формируются сразу несколько последовательных слоев. Например:

- эпитаксиальный слой + $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$;
- $\text{SiO}_2 + \text{Si}$;
- $\text{Me}_1 + \text{Me}_2 + \text{Me}_3 + \dots$;
- $\text{SiO}_2 + \text{Me} + \dots$.

Для упрощения описания проектируемых маршрутов целесообразно вводить понятие «базовый микроцикл». Тип базового микроцикла может, например, определяться сочетанием первой и второй формообразующих обработок. Например:

- тип А: имплантация – термический отжиг;
- тип Б: имплантация – термическое окисление;
- тип В: травление – термическое окисление;
- тип Г: травление – нанесение слоя (слоев) и т.д.

На практике часто встречаются микроциклы, у которых отсутствуют некоторые стадии обработок, примером является микроцикл, в котором отсутствует первая (локализирующая) фотолитографическая обработка, а, следовательно, и операция удаления фоторезистивного слоя после первой основной обработки. Подобные микроциклы называются сокращенными. Сокращенными микроциклами являются, например, стадии неселективного (по горизонтали) травления слоев и имплантация примеси. Избирательность воздействия основной обработки в данных случаях достигается за счет эффектов самосовмещения.

Второй распространенный тип сокращенных микроциклов образуют последовательности операций, не содержащие вторых формообразующих обработок. Примером может служить метод легирования последовательно нескольких областей с последующим общим отжигом.

Число микроциклов в маршруте изготовления конкретной ИС, очевидно, будет пропорционально числу фрагментов, из которых состоят базовые ячейки кристалла.

1.6.4. Определение фрагментов структуры

Рассмотрим один из возможных алгоритмов определения фрагментов структуры на примере базовой ячейки биполярной ИС с диффузионной изоляцией и скрытыми n^+ -слоями транзисторов (см. рис. 1.60).

В пределах определенных ранее блоков операций могут быть предложены следующие практические действия:

а) анализ базовой ячейки. Проводят в последовательности, соответствующей перемещению по вертикальной координате Z снизу вверх;

б) порядковый номер текущей координаты Z соответствует очередности формирования данного фрагмента в сквозном маршруте изготовления кристалла. Например, в структуре (см. рис. 1.60) скрытый n^+ -слой с координатой Z_2 выполняется раньше, чем эпитаксиальный n -слой с координатой Z_5 ;

в) назовем однотипными фрагменты, выполненные одними и теми же технологическими приемами и имеющие идентичные параметры, например, концентрацию и тип легирующей примеси, химический состав и т.д. Примерами могут служить легированные области полупроводника, пленочные элементы поверхности и т.п.;

г) при совпадении нижних границ двух фрагментов последним выполняется тот из них, который имеет большую координату верхней границы. Например, координаты границы окна в окисном слое Z_8 и металла разводки Z_9 совпадают, однако верхняя граница металла находится выше верхней границы окисного слоя.

В случае затруднений при определении последовательности выполнения фрагментов с помощью представленных правил необходимо вернуться к блочной структуре технологического маршрута данной ячейки, разработка которой предшествует данному этапу.

Блочная структура маршрута ячейки (см. рис. 1.60) включает четыре блока операций:

- 1) эпитаксиальной структуры;
- 2) изоляции;

- 3) активной структуры;
- 4) металлизированной разводки.

Нумерация блоков операций практически соответствует последовательности их выполнения. Поэтому и фрагменты из разных блоков, последовательность выполнения которых затруднительно определить координатным методом анализа, выполняются в соответствии с очередностью своих блоков.

Теперь для нашего примера можно составить табл. 1.5.

Таблица 1.5

Фрагменты структуры, выполняемые в различных блоках операций

№ п/п	Блок операций маршрута	Формируемые в данном блоке фрагменты	
		№ п/п	Наименование фрагмента
1	Блок эпитаксиальной структуры	1.1	Скрытый коллекторный n^+ -слой
		1.2	Эпитаксиальный слой n -типа
2	Блок изоляции	2.1	Изолирующие p -диффузионные области
3	Блок активной структуры	3.1	Базовая p -область
		3.2	Эмиттерная n^+ -область и n^+ -коллекторный контакт
		3.3	Поверхностный слой защитного окисла
4	Блок металлизированной разводки	4.1	Контакты и металлические проводники
		4.2	Защитное пассивирующее покрытие и выходные контактные площадки

1.6.5. Построение стандартных микроциклов для формирования фрагментов базовой ячейки кристалла

При разработке конкретной маршрутной технологии полезно руководствоваться следующими рекомендациями.

Каждый микроцикл должен оканчиваться либо операцией, завершающей формирование данного фрагмента, либо операцией (операциями) формирования сплошного слоя или системы слоев, являющихся основой для формирования следующего фрагмента, причем в первом случае, когда последней операцией просто завершается формирование данного фрагмента на поверхности структуры, обязательно сохраняется сплошной слой, сформированный в предыдущем микроцикле.

Анализ показывает, что подавляющее большинство микроциклов содержит третью стадию – послойную очистку. В сокращенных операциях в эту стадию входят операции гидромеханической или химической очистки, а в полных добавляются операции удаления фоторезиста.

Первым микроциклом любого маршрута, когда создание кристалла начинается на исходной готовой подложке, является сокращенный микроцикл подготовительных обработок.

Для примера (см. рис. 1.60) первым микроциклом маршрута будет подготовительный (рис. 1.64, а). Следующим является полный микроцикл формирования скрытого n^+ -слоя путем фотолитографии по окислу и диффузии мышьяка. Эпитаксиальный слой формируют сокращенным микроциклом, включающим полное стравливание окисла, нанесение эпитаксиального слоя и его окисление.

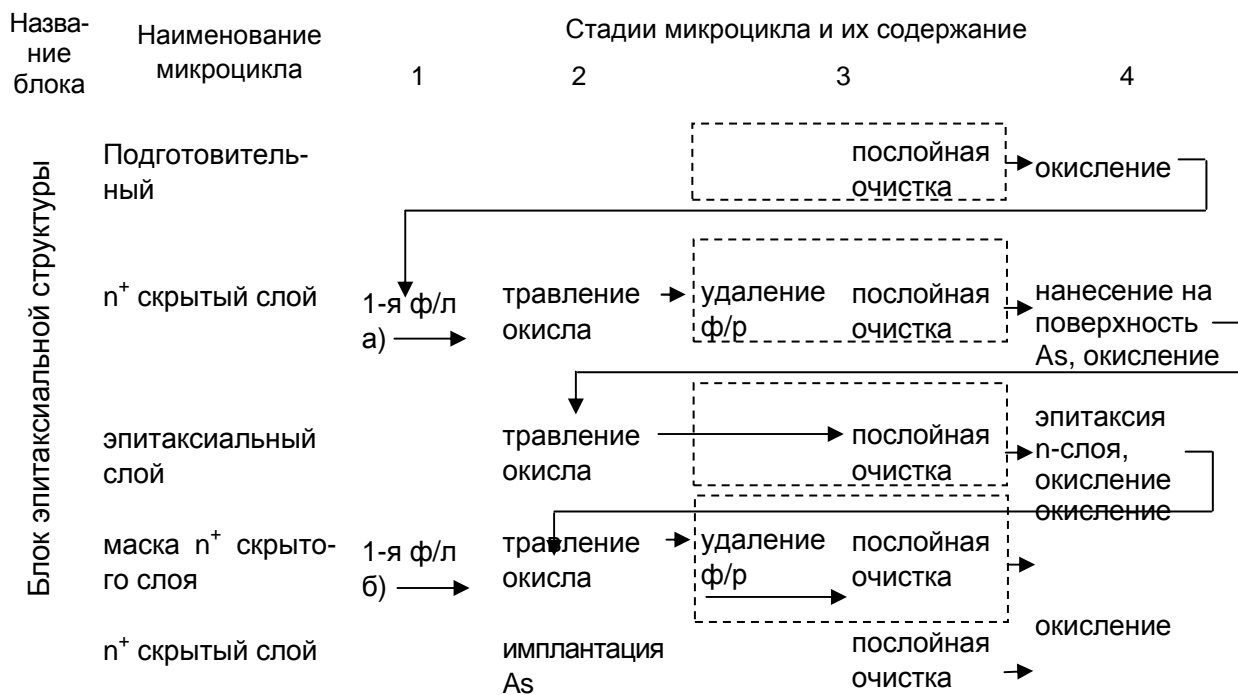


Рис. 1.64. Блок эпитаксиальной структуры

Если скрытые n^+ -слои формируются методом ионной имплантации, то вместо второго микроцикла данного блока операций необходимо использовать 2 микроцикла, показанные на рис. 1.64, б. Выбор того или иного варианта формирования скрытого n^+ -слоя определяется заданными параметрами слоев и точностью их изготовления. На рис. 1.65 – 1.67 представлены микроциклы последующих блоков маршрута изготовления базовой ячейки.

1.6.6. Анализ матрицы технологического маршрута

Целью анализа матрицы технологического маршрута является определение некоторых количественных показателей, прогнозирующих эффективность разрабатываемой технологии.

Прежде всего определяются отдельные абсолютные количественные показатели, знание которых позволяет судить об эффективности процесса в целом. В реальных условиях производства существуют технологические операции, вносящие наиболее заметный вклад в технологические потери из-за высокой дефектности. Подобные операции различны для каждого конкретного случая, однако есть операции «потенциально» опасные для любой технологии ИС. К ним, прежде всего, относятся операции фотолитографии. Исходя из этого, при сравнении различных возможных вариантов реализации того или иного фрагмента всегда следует максимально уменьшать число операций фотолитографии. Исходя из числа операций фотолитографии в матрице можно грубо оценить процент выхода годных на этапах кристального производства по соотношению

$$K = (K_{\phi})^n, \quad (1.16)$$

где K – процент выхода годных на всей матрице; K_{ϕ} – процент выхода годных на микроцикле с участием фотолитографии; n – число микроциклов с фотолитографией.

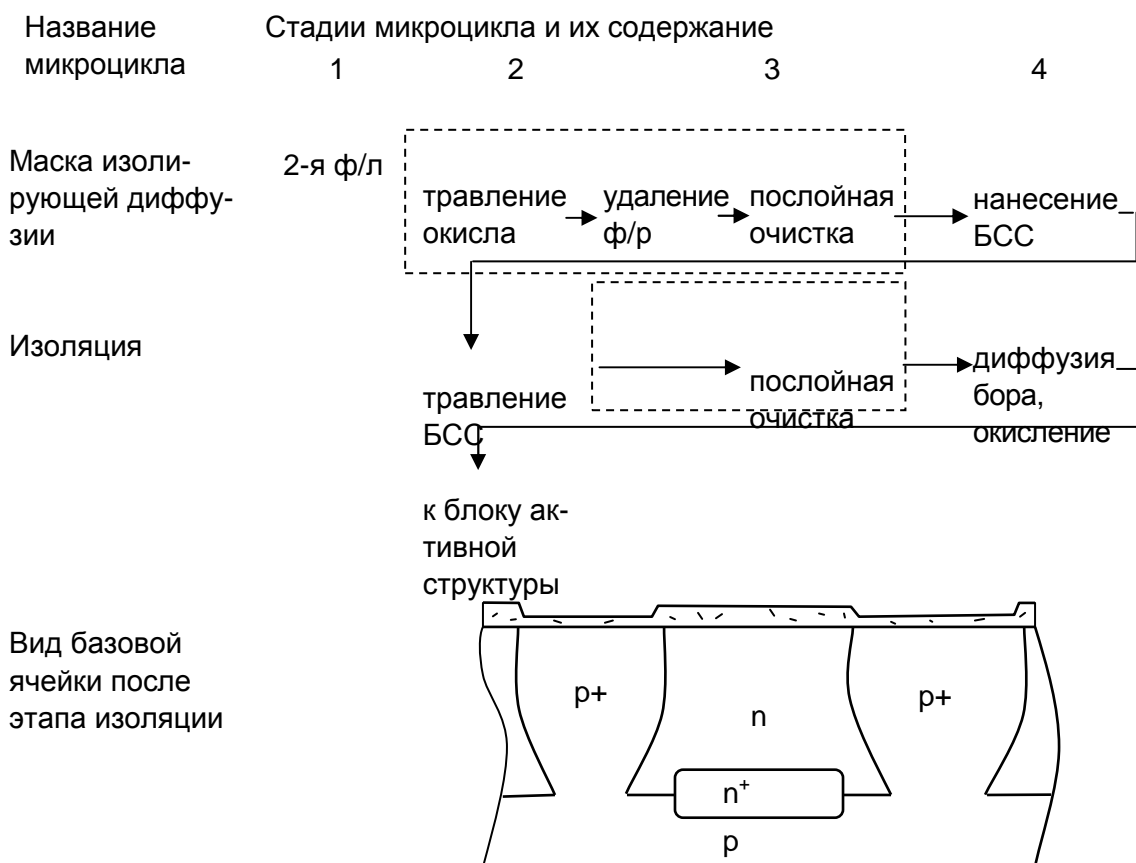


Рис. 1.65. Блок изоляции

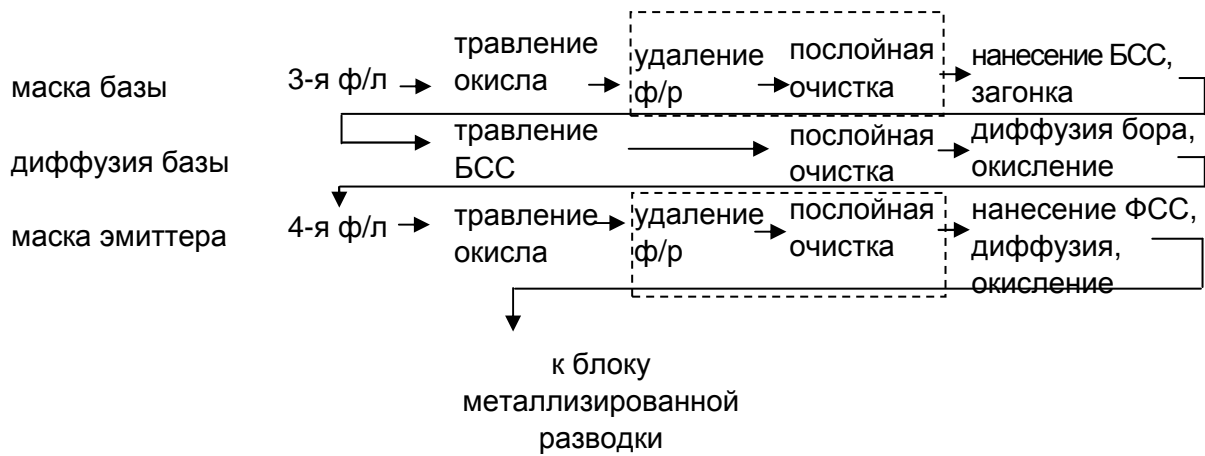


Рис. 1.66. Блок активной структуры

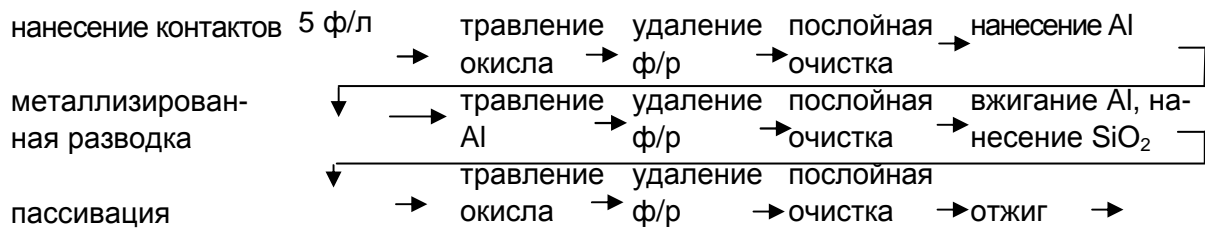


Рис. 1.67. Блок металлизированной разводки

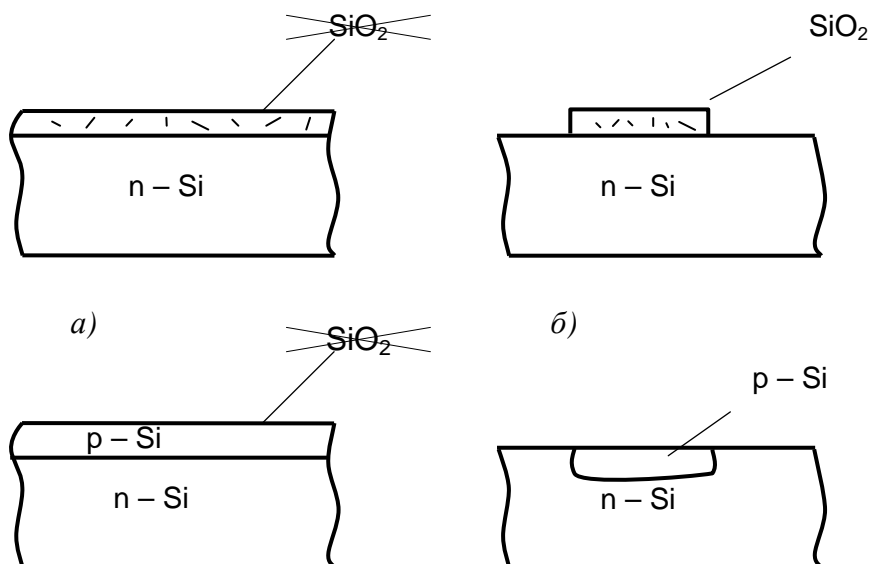


Рис. 1.68. Примеры фрагментов, неучитываемых (а) и учитываемых (б) при подсчете $K_{c.c.}$

Подобной формулой можно пользоваться, если все микроциклы фотолитографии (полные микроциклы) характеризуются приблизительно одинаковыми процентами выхода. Если полные микроциклы имеют резко отличные проценты выхода годных $K_{\phi i}$, то прогнозную оценку процента выхода всей матрицы получают из соотношения

$$K = K_{\phi 1} \cdot K_{\phi 2} \cdot \dots \cdot K_{\phi i} \quad (1.17)$$

На рис. 1.69 приведен пример повышения $K_{c.c.}$ для простейшей ячейки в два раза за счет рационального построения маршрута на базе знаний физико-химии образования силицидов на поверхности кремния.

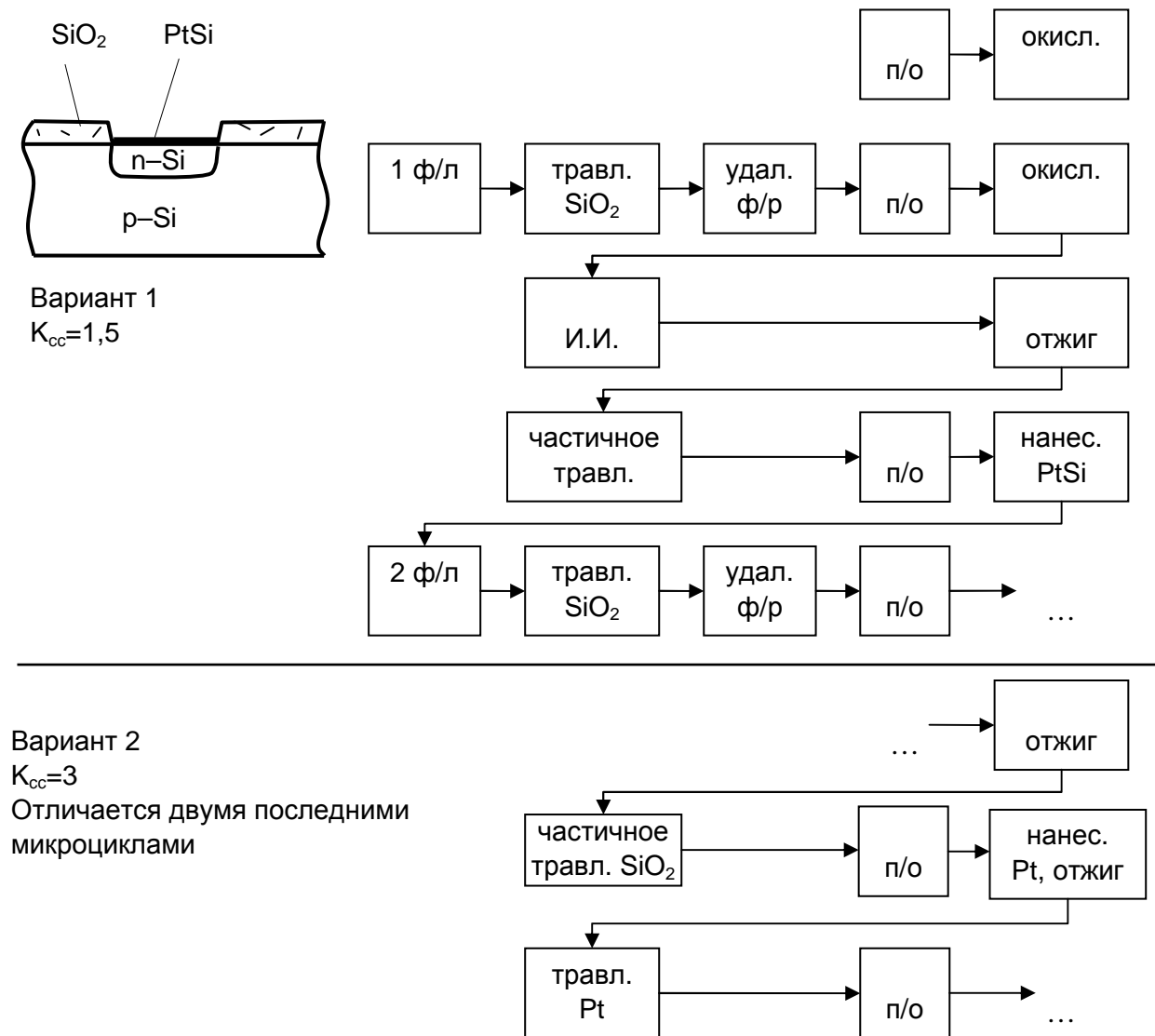


Рис. 1.69. Пример повышения $K_{c.c.}$ при разработке маршрута

Рассмотрим, какой вариант маршрута был бы еще хуже, чем первый, т.е. когда $K_{c.c.} = 1$. Особенностью данной ячейки является полный силицидный контакт. Если бы мы проводили легирование методом диффузии, то за

счет бокового ухода n-области под окисел фотолитографию по окислу пришлось бы проводить дважды. Тогда в сочетании с первым вариантом в сумме получили бы три операции фотолитографии и $K_{c.c.} = 1$.

В первом приближении матрица может дать представление о степени интеграции маршрута по оборудованию. Группа последовательных операций микроцикла называется интегрированной по оборудованию, если все они проводятся непрерывно в рабочем объеме одной и той же технологической установки, без промежуточных контактов с атмосферой или оператором. Микроцикл, содержащий интегрированную группу операций, можно назвать частично или полностью интегральным в зависимости от того, какая часть его операций входит в эту группу. Если все операции микроцикла интегрированы, то микроцикл полностью интегральный, если часть операций, то частично интегральный. Показателем интеграции маршрута по оборудованию является отношение

$$P_u = Y_{ni} \cdot Y_{чи} \cdot Y_{ni}; \quad (1.18)$$

$$P_u = \left(\frac{N_{ni}}{N} \right) : \left(\frac{N_{чи}}{N} \right) : \left(\frac{N - N_{ni} - N_{чи}}{N} \right), \quad (1.19)$$

где N_{ni} и $N_{чи}$ – число полностью и частично интегрированных микроциклов.

Оптимальным случаем является маршрут с показателем $P_u = 1:0:0$. Однако в настоящее время практически нет производственной базы для реализации маршрутов с таким показателем.

Работы в области частичной интеграции микроциклов наиболее успешно продвинулись в создании оборудования плазмохимического травления слоев и удаления фоторезиста. Частично интегральные микроциклы в подобных случаях целесообразно изображать без соединительных стрелок между прямоугольниками операций (рис. 1.70). Вместо стрелок ставится значок \int .

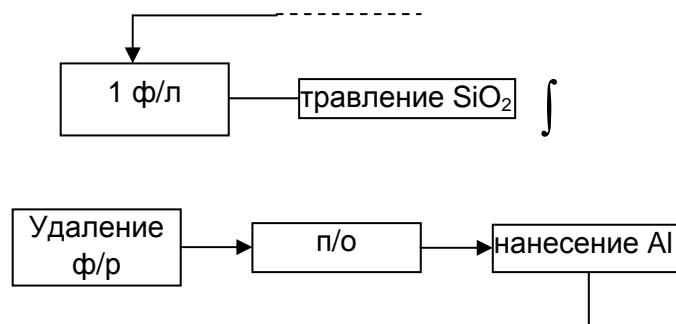


Рис. 1.70. Изображение частично интегрального микроцикла

Контрольные вопросы к главе 1

- 1.1. Приведите классификацию частных технологических процессов производства полупроводниковых ИМС.
- 1.2. В каком направлении происходит рост кристалла при его формировании из расплава?
- 1.3. Почему выпуклый фронт кристаллизации при выращивании монокристаллов более предпочтителен?
- 1.4. Перечислите методы выращивания монокристаллов из расплава.
- 1.5. Для каких целей в методе Стокбакера между печами устанавливается металлический тепловой экран?
- 1.6. Какой метод выращивания позволяет получать монокристаллы большого диаметра?
- 1.7. Укажите основное достоинство метода зонной плавки (перекристаллизации).
- 1.8. Поясните сущность метода зонной плавки, применяемого для очистки полупроводников.
- 1.9. Укажите преимущества метода БЗП по сравнению с методом Чохральского.
- 1.10. Проиллюстрируйте схему выращивания кристаллов методом бестигельной зонной плавки.
- 1.11. Приведите схему установки для бестигельной зонной плавки кремния.
- 1.12. Охарактеризуйте метод Чохральского, применяемый для выращивания полупроводниковых кристаллов.
- 1.13. Как модифицируется метод Чохральского при выращивании разлагающихся полупроводников?
- 1.14. Какой метод выращивания монокристаллов представляет собой комбинацию методов вытягивания из расплава и зонной плавки?
- 1.15. Охарактеризуйте метод Вернейля как метод выращивания монокристаллов.
- 1.16. Для чего необходима калибровка слитков полупроводников после их выращивания?
- 1.17. Приведите схему установки шлифования полупроводниковых слитков по наружному диаметру. Какой метод охлаждения в ней применяется?
- 1.18. Классифицируйте основные методы определения кристаллографических направлений в полупроводниковых слитках.
- 1.19. На чем основан рентгеновский метод ориентации полупроводниковых слитков?

- 1.20. Сформулируйте условие Вульфа – Брэгга.
- 1.21. Приведите схему установки ориентации слитка рентгеновским методом.
- 1.22. Сущность оптического метода ориентации полупроводниковых слитков.
- 1.23. Как осуществляется ориентированное наклеивание слитка полупроводника перед разрезанием?
- 1.24. Проиллюстрируйте схему резки полупроводниковых слитков диском с внешней алмазосодержащей режущей кромкой.
- 1.25. Что представляет собой режущий инструмент в методе разделения слитков диском с внешней режущей кромкой?
- 1.26. Приведите схему резки слитка на пластины алмазным диском с внутренней режущей кромкой. Какую минимальную глубину риска следует выполнять в разрезаемых изделиях?
- 1.27. Поясните достоинства резки дисками с внешней и внутренней режущей кромкой.
- 1.28. Что является режущим инструментом при разделении пластин и подложек полотнами?
- 1.29. Охарактеризуйте метод резки полупроводника полотнами.
- 1.30. Приведите схему резки полупроводников стальными полотнами.
- 1.31. Поясните недостатки и преимущества резки полупроводников стальными полотнами.
- 1.32. Какие параметры полупроводниковых пластин контролируют после их разрезания? Типичные параметры шероховатости полупроводниковых пластин после резки.
- 1.33. Охарактеризуйте и проиллюстрируйте структуру поверхности пластин полупроводника после резки.
- 1.34. Чему равна глубина зоны трещин на полупроводниковых пластинах после резки?
- 1.35. Какие нарушения структуры присущи полупроводниковым пластинам после разрезания слитка?
- 1.36. Условия, необходимые для получения хороших результатов при шлифовании полупроводниковых пластин.
- 1.37. Материалы шлифовальников, применяемых в полупроводниковом производстве. Какие абразивы используют при шлифовании?
- 1.38. Охарактеризуйте абразивы, применяемые для шлифования в микроэлектронном производстве, по степени твердости.
- 1.39. Охарактеризуйте назначение и особенности предварительного шлифования.

1.40. Охарактеризуйте назначение и особенности окончательного шлифования.

1.41. Поясните сущность шлифования свободным и связанным абразивами. Поясните отличия этих методов друг от друга.

1.42. Укажите основные отличия процесса полирования от процесса шлифования.

1.43. Что представляют собой полировальники, применяемые в микроэлектронном производстве? Что используют в качестве абразива при полировании?

1.44. Перечислите требования, предъявляемые к полировальникам в микроэлектронном производстве.

1.45. Охарактеризуйте этапы процесса полирования полупроводниковых пластин.

1.46. Почему при полировании поверхности полупроводниковых пластин с помощью батиста используют низкие частоты вращения полировальника?

1.47. Какие материалы используют при тонком полировании полупроводниковых пластин? Охарактеризуйте их.

1.48. Поясните критерии годности, по которым осуществляется оценка качества полупроводниковых пластин после проведения процессов механической обработки.

1.49. Как определяется стрела прогиба пластин после механической обработки?

1.50. Как определяется клиновидность пластин после механической обработки?

1.51. Как определяется плоскостность пластин после механической обработки?

1.52. Как определяется шероховатость пластин после механической обработки?

1.53. Приведите основную характеристику качества обработки полупроводниковых пластин.

1.54. Охарактеризуйте способы, используемые для определения глубины механически нарушенного слоя в полупроводниковом производстве.

1.55. Укажите критерии годности полупроводниковой пластины после резки слитков на пластины.

1.56. Укажите критерии годности полупроводниковой пластины после шлифования.

1.57. Укажите критерии годности полупроводниковой пластины после полирования.

1.58. Классифицируйте виды загрязнений по их физико-химическим свойствам и характеру их взаимодействия с основными полупроводниковыми материалами.

1.59. Какие загрязнения поверхности полупроводника относятся к физически адсорбированным загрязнениям? Приведите методы их удаления.

1.60. Какие загрязнения поверхности полупроводника относятся к химически адсорбированным загрязнениям? Приведите методы их удаления.

1.61. Перечислите основные этапы отмывки полупроводниковых подложек.

1.62. Какие растворители используют для удаления неполярных органических загрязнений? Приведите примеры смесей, используемых для этих целей.

1.63. Почему при проведении процесса обезжиривания подложек необходима частая смена растворителя?

1.64. Поясните сущность технологического процесса обезжиривания.

1.65. Охарактеризуйте процесс обезжиривания с использованием паров кипящих растворителей. Приведите основные преимущества этого способа по сравнению со стандартными методами обезжиривания.

1.66. Поясните необходимость промывки полупроводниковых пластин после обезжиривания.

1.67. Как интенсифицировать процесс промывки полупроводниковых пластин?

1.68. По какому параметру оценивают качество промывки полупроводниковых подложек?

1.69. Почему скорость травления механически нарушенного слоя значительно выше?

1.70. Чем можно объяснить химическую инертность кремния?

1.71. Приведите химическую реакцию растворения кремния в смеси азотной и плавиковой кислот.

1.72. Какие щелочные травители используют для кремния? Для каких целей наиболее целесообразно применять щелочные травители?

1.73. Укажите материалы, используемые для травления арсенида галлия.

1.74. Почему возникает неравномерность травливания полупроводникового материала на неподвижной полупроводниковой подложке?

1.75. Поясните сущность принципа химико-динамической обработки подложек в полупроводниковой технологии.

1.76. Опишите устройство установки химико-динамического травления полупроводниковых подложек.

1.77. Для чего применяется парогазовая обработка кремниевых подложек? Приведите примеры используемых смесей.

1.78. Какова типичная глубина травленных слоев кремния при парогазовой обработке?

1.79. Поясните сущность процесса ионно-плазменной обработки полупроводниковых подложек.

1.80. Перечислите основные достоинства ионно-плазменной обработки полупроводниковых подложек.

1.81. Объясните механизм ионно-плазменного удаления материала с поверхности полупроводниковой подложки заряженными ионами инертных газов.

1.82. Какие три основных разновидности образований плазмы существуют при проведении процессов ионно-плазменной обработки? Охарактеризуйте их.

1.83. Поясните отличие плазмохимической обработки подложек от ионно-плазменного процесса.

1.84. Укажите преимущества плазмохимической обработки подложек.

1.85. В чем сущность плазмохимического травления кремния?

1.86. Какой метод находит наибольшее применение в технологическом процессе фотолитографии для удаления фоторезиста с поверхности подложек?

1.87. Охарактеризуйте метод светящихся точек, применяющийся для количественного и качественного контроля загрязнений поверхности полупроводников.

1.88. Охарактеризуйте метод капли, применяющийся для количественного и качественного контроля загрязнений поверхности полупроводников.

1.89. Для каких целей в полупроводниковой технологии применяют осаждение гальванических покрытий? Какие факторы оказывают определяющее влияние на электролитический процесс осаждения металла на полупроводниковую подложку?

1.90. Как влияет чистота электролитов на процесс гальванического осаждения металлов? Приведите примеры.

1.91. Перечислите требования, предъявляемые к электролитам, применяемым в микроэлектронном производстве.

1.92. Поясните стадии процесса осаждения гальванических покрытий.

1.93. Для каких целей в полупроводниковой технологии используется процесс осаждения золотых пленок на поверхности полупроводниковых подложек? Укажите типы электролитов, применяемых в этом технологическом процессе.

1.94. Охарактеризуйте процесс диффузии из бесконечного (постоянного) источника. Приведите соответствующие профили распределения примесей.

1.95. Охарактеризуйте процесс диффузии из ограниченного источника. Приведите соответствующие профили распределения примесей.

1.96. За счет чего происходит искривление фронта диффузии?

1.97. Охарактеризуйте стадии «загонки» и «разгонки» примеси при проведении двухстадийной диффузии. Приведите поясняющие рисунки.

1.98. Соотнесите температурные режимы процессов «загонки» и «разгонки» примеси.

1.99. Приведите и поясните схему процесса диффузии в открытой трубе.

1.100. От каких технологических факторов зависит воспроизводимость параметров диффузии от пластины к пластине и по площади каждой пластины при применении способа диффузии в открытой трубе?

1.101. Охарактеризуйте ампульный способ проведения диффузии. Приведите схему технологической установки.

1.102. Поясните достоинства и недостатки ампульного метода проведения диффузии.

1.103. Охарактеризуйте бокс-метод проведения диффузии. Приведите схему технологической установки.

1.104. Поясните достоинства и недостатки бокс-метода проведения диффузии.

1.105. Поясните сущность метода ионного легирования.

1.106. Поясните достоинства и недостатки метода ионного легирования полупроводников.

1.107. Охарактеризуйте области применения метода ионного легирования.

1.108. Охарактеризуйте следующие параметры полупроводниковых структур, получаемых при ионном легировании: концентрацию легирующей примеси, глубину проникновения ионов, степень нарушения кристаллической решетки.

1.109. Охарактеризуйте явления, протекающие при ионной имплантации.

1.110. Как определить распределение имплантированных ионов по глубине залегания? Приведите поясняющую формулу.

1.111. Поясните механизм образования дефектов при ионном легировании.

1.112. Что такое кластер дефектов при ионной имплантации?

1.113. Почему возникает аморфизация полупроводников при ионном легировании? К чему она приводит?

1.114. Какие характеристики полупроводников наиболее чувствительны к радиационным дефектам?

1.115. В чем сущность методов быстрого термического отжига?

1.116. Укажите достоинства метода лазерного отжига после ионной имплантации.

1.117. Укажите основной недостаток отжига после ионной имплантации с помощью дуговых и мощных газоразрядных импульсных ламп.

1.118. Укажите преимущества и недостатки электронно-лучевых установок, применяемых для отжига после ионной имплантации.

1.119. Какие материалы применяют в качестве масок при ионном легировании?

1.120. Приведите схему установки ионного легирования. Поясните ее принцип действия.

1.121. Почему магнитную сепарацию ионов лучше проводить до ускорения в установке ионного легирования?

1.122. Приведите конструкцию источника ионов с термокатодом прямого накала.

1.123. Поясните назначение и устройство масс-сепаратора в установке ионного легирования.

1.124. Приведите основные технические данные автомата ионно-лучевого легирования «Иолла-2».

1.125. Опишите принцип действия автомата ионно-лучевого легирования «Иолла-2».

1.126. Дайте определение следующих понятий: «эпитаксия», «автоэпитаксия», «гетероэпитаксия», «хемоэпитаксия».

1.127. Приведите примеры гетеропереходов, выращиваемых эпитаксиальным образом.

1.128. Какие преимущества обеспечивает гетероэпитаксия на диэлектрических подложках при изготовлении микросхем?

1.129. Расшифруйте термины «КНС», «КНИ».

1.130. Приведите примеры газообразных источников примесей, применяемых при эпитаксии. Охарактеризуйте эти примеси.

- 1.131. Приведите химическую реакцию восстановления тетрахлорида кремния водородом.
- 1.132. Перечислите стадии процесса эпитаксиального роста.
- 1.133. Поясните последовательность операций процесса эпитаксии для получения кремниевых эпитаксиальных структур.
- 1.134. От каких факторов зависит скорость роста эпитаксиального слоя? Приведите примеры.
- 1.135. Какие материалы наиболее благоприятны для жидкофазной эпитаксии?
- 1.136. Приведите преимущества, обеспечиваемые жидкофазной эпитаксией.
- 1.137. Приведите схему установки эпитаксиального наращивания вертикального типа. Поясните ее принцип действия.
- 1.138. Из каких материалов следует изготавливать подложкодержатель в установках эпитаксии? Приведите примеры и особенности его изготовления.
- 1.139. Почему необходимо осушивать газы при проведении эпитаксии?
- 1.140. Приведите технологические переходы, характерные для процесса эпитаксии.
- 1.141. На чем основан силановый метод эпитаксии? Приведите химическую формулу процесса.
- 1.142. Достоинства силанового метода проведения эпитаксии.
- 1.143. К чему приводит градиент температуры при эпитаксии? Пояснить на примере графика.
- 1.144. Приведите конструкцию кварцевого реактора вертикального типа с ИК-нагревом.
- 1.145. Приведите конструкцию кварцевого реактора вертикального типа с ВЧ-нагревом и водяным охлаждением.
- 1.146. Поясните особенности молекулярно-лучевой эпитаксии.
- 1.147. Перечислите основные диэлектрические пленки, используемые в технологии изготовления полупроводниковых ИМС. Охарактеризуйте их.
- 1.148. Поясните основное назначение и требования, предъявляемые к маскирующим и пассивирующим слоям.
- 1.149. Для каких целей применяют примесно-силикатные стекла в технологии полупроводниковых микросхем?
- 1.150. Укажите основные области применения поликристаллического кремния.
- 1.151. Что такое карбидизация подложкодержателей?

1.152. Охарактеризуйте основные этапы процесса получения термического окисла.

1.153. От каких факторов зависит скорость окисления кремния? Как ее повысить?

1.154. Почему при термическом окислении кремния предпочтительно использовать сухой кислород?

1.155. Почему при термическом окислении кремния отсутствует проблема обеспечения высокой адгезии?

1.156. Приведите схему камеры для термического окисления кремния. Поясните ее принцип действия.

1.157. Как в методе термического окисления уменьшают температурные градиенты по радиусу пластин?

1.158. Для каких целей используют пиролитическое осаждение слоев SiO_2 ? Приведите его преимущества и недостатки по сравнению с термическим окислением.

1.159. Охарактеризуйте процесс термического разложения тетраэтоксисилана при пиролизе.

1.160. Приведите химическую формулу окисления моносилана кислородом.

1.161. Какие факторы лимитируют минимальную температуру процесса пиролитического осаждения кремния?

1.162. Приведите схему установки пиролитического осаждения SiO_2 , поясните ее принцип действия.

1.163. Приведите разновидности метода анодного окисления кремния. Охарактеризуйте их.

1.164. Какие электролиты используют для анодного окисления кремния?

1.165. Охарактеризуйте метод газового анодирования кремния.

1.166. Приведите характерные особенности и типовые технологические режимы испарения порошка монооксида кремния для получения защитных слоев.

1.167. Охарактеризуйте процесс получения оксидных пленок кремния методом напыления в вакууме.

1.168. В чем сущность метода реактивно-катодного распыления оксида кремния? Приведите типовые технологические режимы.

1.169. Охарактеризуйте процесс реактивного катодного осаждения пленок нитрида кремния.

1.170. Поясните специфику аномального тлеющего разряда.

1.171. Почему при реактивном катодном осаждении пленок нитрида кремния предъявляются требования по отсутствию кислорода в рабочей камере?

1.172. Укажите отличительные особенности реактивного ионно-плазменного осаждения пленок нитрида кремния.

1.173. Перечислите основные методы контроля толщины диэлектрических пленок в полупроводниковой технологии. Приведите их достоинства и недостатки.

1.174. Почему при определении толщины диэлектрической пленки интерференционным методом следует учитывать не только цвет поверхности пленки, но и порядок интерференции? Как порядок интерференции определяют на практике?

1.175. Поясните особенности эллипсометрического метода измерения толщины пленок SiO_2 и Si_3N_4 .

1.176. Поясните сущность и назначение методов, применяемых для контроля пористости защитных диэлектрических пленок.

1.177. Какие методы, применяемые для контроля пористости защитных диэлектрических пленок, не позволяют использовать анализируемый образец в дальнейшем технологическом процессе изготовления микросхемы?

1.178. Поясните особенности электрографического метода, применяемого для контроля пористости защитных диэлектрических пленок.

1.179. В чем состоит основное назначение литографии при изготовлении структур микросхем?

1.180. Перечислите достоинства литографического процесса.

1.181. Охарактеризуйте позитивные и негативные резисты.

1.182. Укажите требования, предъявляемые к резистам.

1.183. Поясните термин «взрывная» литография.

1.184. Приведите классификацию литографических процессов.

1.185. Какие компоненты входят в состав фоторезиста? Приведите их назначение.

1.186. Приведите основные характеристики фоторезиста.

1.187. Почему разрешающая способность фоторезиста выше разрешающей способности процесса фотолитографии?

1.188. Что представляют собой фотошаблоны? Перечислите материалы для их изготовления.

1.189. Как определяется краевой угол смачивания поверхности твердого тела жидкостью? Проиллюстрируйте.

1.190. Какая поверхность с точки зрения смачиваемости считается оптимально подготовленной к фотолитографии?

1.191. Приведите основное условие, предъявляемое к фотолитографии по пленке диоксида кремния.

1.192. Приведите схему процесса нанесения фоторезиста центрифугированием. Поясните особенности этого метода.

1.193. При каком условии в методе центрифугирования возможно краевое утолщение фоторезиста? Обозначьте способы устранения краевых утолщений.

1.194. Из каких соображений следует выбирать толщину фоторезистивного слоя?

1.195. Опишите установку нанесения слоя резиста распылением. Поясните особенности этого метода.

1.196. Поясните сущность методов погружения при нанесении фоторезиста.

1.197. Поясните особенности накатки как метода для формирования резистивного слоя.

1.198. Проиллюстрируйте электростатический метод нанесения фоторезистивного слоя.

1.199. Охарактеризуйте основные параметры процесса сушки фоторезистивного слоя.

1.200. Укажите виды и особенности процессов сушки фоторезистивного слоя.

1.201. Приведите схемы, особенности, достоинства и недостатки контактного и проекционного методов экспонирования фоторезистов.

1.202. Какие растворители применяются при проявлении негативных и позитивных фоторезистов?

1.203. Для каких целей проводится вторая сушка (термообработка) фоторезистов? Приведите типовые технологические режимы этой операции.

1.204. Из-за чего возникает искажение топологического рисунка при жидкостном изотропном травлении? Приведите поясняющие рисунки.

1.205. Какие существуют разновидности методов сухого травления фоторезистов? Укажите особенности этих методов.

1.206. Какие преимущества обеспечивает фотолитография в глубоком ультрафиолете?

1.207. Укажите особенности и преимущества иммерсионной литографии по сравнению с классическим фотолитографическим процессом.

1.208. Какие проблемы присущи иммерсионной литографии?

1.209. Укажите особенности голографической литографии.

1.210. Расставьте современные литографические процессы в порядке уменьшения длины волны.

1.211. Поясните особенности электронно-лучевой и ионной литографий.

1.212. Приведите факторы, ограничивающие использование электронно-лучевой и ионной литографий в процессе производства современных СБИС.

1.213. Какое количество экспозиций обеспечивают эмульсионные фотошаблоны? Как повышают срок службы фотошаблонов?

1.214. Какие сложности возникают при использовании рентгеновских лучей в процессе литографии?

1.215. Приведите схему рентгенографической системы экспонирования в пучках синхротронного излучения.

1.216. Приведите поперечное сечение базовой ячейки биполярной ИС с изоляцией р-п-переходом.

1.217. Дайте определения следующих терминов: «базовая ячейка», «фрагмент базовой ячейки», «технологический микроцикл», «формообразующая обработка», «вспомогательная обработка», «сокращенный микроцикл», «однотипный фрагмент», «коэффициент самосовместимости».

1.218. Укажите основные блоки операций для формирования биполярных БИС с открытыми n^+ -коллекторными слоями. Охарактеризуйте каждый блок.

1.219. Что является принципиальным моментом метода матричного представления технологического маршрута? Приведите примеры.

1.220. Охарактеризуйте формообразующие и вспомогательные обработки.

1.221. Приведите формализованную схему базового микроцикла. Поясните каждую ее стадию.

1.222. Приведите алгоритм определения фрагментов структуры на примере базовой ячейки биполярной ИС с диффузионной изоляцией и скрытыми n^+ -слоями транзисторов.

1.223. Укажите рекомендации, которыми следует руководствоваться при разработке конкретной маршрутной технологии.

1.224. Приведите примеры технологических операций, обладающих повышенным значением дефектности.

1.225. Приведите пример повышения коэффициента самосовместимости при разработке технологического маршрута.

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

2.1. Методы получения тонких пленок

2.1.1. Особенности тонкопленочной технологии

Тонкие пленки не только являются основой тонкопленочных ГИС, но широко используются и в полупроводниковых интегральных схемах. Поэтому методы получения тонких пленок относятся к общим аспектам технологии микроэлектроники.

Наиболее распространенными способами получения таких пленок являются методы получения пленок в вакууме. Эти методы можно классифицировать по способу генерации потока частиц в вакууме – термическое испарение, ионное распыление (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Классификация методов получения тонких пленок по способу генерации потока частиц в вакууме

Основанием для выбора метода являются следующие обстоятельства:

- природа и сортамент материала;
- вид и состояние обрабатываемых поверхностей;
- требования к чистоте и толщине пленки;
- производительность процесса.

Для создания вакуума в рабочей камере откачивают газы. Параметр, по которому судят о глубине или степени вакуума, – давление остаточных газов. Различают средний, низкий, высокий вакуум (по отношению λ/d , где λ – средняя длина свободного пробега молекул; d – диаметр сосудов цилиндрической формы или длина меньшей стороны сосудов прямоугольной формы):

1. При низком вакууме ($\lambda \ll d$) наблюдается явление адсорбции молекул на стенках сосуда.

2. При высоком вакууме ($\lambda \gg d$) молекулы вещества движутся прямолинейно, на стенках сосуда могут быть участки, свободные от слоя адсорбированных молекул.

3. При среднем вакууме ($\lambda \approx d$) наблюдаются как первые, так и вторые явления.

Рассмотрим влияние вакуума на процесс нанесения пленок. Если вакуум недостаточно высокий, то значительная часть частиц, летящих от источника тока, встречает молекулы остаточного газа и в результате столкновения с ними рассеивается, т.е. теряет первоначальное направление своего движения и не попадает на подложку. Это снижает скорость нанесения пленки.

Остаточные газы в рабочей камере также поглощаются растущей на подложке пленкой, вступают в химические реакции с наносимым веществом, что ухудшает электрофизические параметры пленки (повышается ее сопротивление, уменьшается адгезия, возникают внутренние напряжения).

Таким образом, для улучшения качества наносимых пленок и для улучшения производительности процесса необходимо повышать степень вакуума.

Подложки тонкопленочных ГИС должны, прежде всего, обладать хорошими изолирующими свойствами. Кроме того, следует обеспечивать малую диэлектрическую проницаемость, высокую теплопроводность, достаточную механическую прочность. Температурный коэффициент расширения должен быть близким к температурным коэффициентам расширения используемых пленок. Типичные параметры подложек следующие: $\rho = 10^{14}$ Ом·см; $\epsilon = 5 - 15$; $\text{tg}\delta = (2 \dots 20) \cdot 10^{-4}$; температурный коэффициент линейного расширения ТКЛР = $(5 \dots 7) \cdot 10^{-6}$.

В настоящее время наибольшее распространение в качестве подложек имеют ситалл и керамика. Ситалл представляет собой кристаллическую разновидность стекла (обычное стекло аморфно), а керамика – смесь окислов в стекловидной и кристаллической фазах (главные составляющие Al_2O_3 и SiO_2).

Толщина подложек составляет 0,5 – 1 мм в зависимости от площади. Площадь подложек у ГИС практически всегда больше площади кристаллов полупроводниковых интегральных схем. Стандартные размеры подложек лежат в пределах от 12×10 мм до 96×120 мм. Требования к гладкости поверхности примерно такие же, как и в случае кремния: допустимая шероховатость не превышает 50 нм (класс шероховатости 12 – 14).

Обычно ГИС, как и полупроводниковые ИС, изготавливаются групповым методом на ситалловых или иных пластинах. По завершении основных технологических операций, связанных с получением пленочных пассивных элементов и металлической разводки, проводится выходной тестовый контроль и при необходимости – подгонка параметров пассивных элементов.

При производстве гибридных ИМС для формирования заданной конфигурации пленочных элементов используют маски-трафареты. Они изготавливаются из материала, который при малой толщине должен быть упругим, иметь высокую нагревостойкость в условиях вакуума, т.е. не деформироваться, не испаряться и не допускать газовыделений. Такими свойствами обладают медные сплавы, нержавеющая сталь, молибден.

Существуют следующие основные технологические методы нанесения тонких пленок на подложку: термическое (вакуумное) напыление, ионно-плазменное напыление и электрохимическое осаждение. Ионно-плазменное напыление имеет две разновидности: катодное напыление и собственно ионно-плазменное.

2.1.2. Термовакuumное напыление

2.1.2.1. Особенности процесса. Метод основан на создании направленного потока пара вещества и последующей конденсации его на поверхностях подложек, имеющих температуру ниже температуры источника пара. Процесс термовакuumного напыления можно разбить на четыре этапа:

- образование пара вещества;
- распространение пара от источника к подложкам;
- конденсация пара на подложках;
- образование зародышей и рост пленки.

Образование пара вещества осуществляется путем его испарения или сублимации. Процесс перехода вещества из твердого состояния в парообразное, минуя жидкую фазу, называют возгонкой либо сублимацией.

Чтобы увеличить интенсивность парообразования, вещество нагревают. С увеличением температуры повышается средняя кинетическая энергия атомов и вероятность разрывов межатомных связей. Атомы отрываются от поверхности и распространяются в свободном пространстве, образуя пар.

Давление насыщенного пара сильно зависит от температуры. Приращение температуры на каждые 5 – 10 % сверх температуры испарения приводит к увеличению давления насыщенного пара, а, следовательно, и скорости испарения на один порядок.

Распространение пара от источника к подложкам осуществляется путем диффузии и конвекции, на которые в первую очередь влияет степень вакуума. Для уменьшения потерь испаряемого материала за счет напыления на внутрикамерную оснастку и стенки камеры, а также для повышения скорости напыления и получения более равномерной по толщине пленки необходимо обеспечить прямолинейное движение частиц пара в направлении подложки. Это возможно при условии, если длина свободного пробега частиц пара будет больше расстояния источник – подложка.

Можно считать, что частицы напыляемого вещества распространяются прямолинейно направленным молекулярным (атомарным) потоком, сохраняя свою энергию до встречи с подложкой.

Конденсация пара на поверхности подложки зависит от температуры подложки и плотности атомарного потока. Атомы пара, достигшие подложки, могут мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение), адсорбироваться и через некоторое время отразиться от подложки (реиспарение), адсорбироваться и после кратковременного мигрирования по поверхности окончательно остаться на ней (конденсация).

Конденсация атомов происходит, если их энергия связи с атомами подложки больше средней энергии атомов подложки, в противном случае атомы отражаются. Если подложка нагрета, энергия ее атомов выше, вероятность конденсации пара ниже.

Температура, выше которой при данной плотности потока пара все атомы отражаются от подложки и пленка не образуется, называется критической температурой конденсации. Критическая температура зависит от природы материала пленки и подложки и от состояния поверхности подложки.

При определенной температуре подложки, меньшей критической, конденсация пара возможна только при условии пересыщения пара, т.е. для конденсации существует критическая плотность атомарного потока. Критической плотностью атомарного потока для данной температуры подложки называется наименьшая плотность, при которой атомы конденсируются на подложке.

Образование зародышей происходит в результате нахождения атомами мест, соответствующих минимуму свободной энергии системы атом – подложка. Рост зародышей происходит за счет присоединения новых атомов, мигрирующих по поверхности или попадающих на зародыши непосредственно из пролетного промежутка источник – подложка. По мере конденсации пара зародыши растут, между ними образуются соединяющие мостики, зародыши сливаются в крупные островки. После этого на-

ступает стадия слияния островков с образованием единой сетки. Сетка переходит в сплошную пленку, которая начинает расти в толщину. С этого момента влияние подложки исключается и частицы пара от поверхности пленки практически не отражаются.

На этапе образования зародышей и роста пленки воздействие остаточных газов на растущую пленку должно быть сведено к минимуму. Это обеспечивается повышением степени вакуума или увеличением скорости парообразования. Создание сверхвакуумных установок представляет значительные трудности, и кроме того, время откачки рабочих камер велико. Поэтому на практике процесс в основном проводят при давлении $1,3 \cdot 10^{-4} - 6,6 \cdot 10^{-5}$ Па, которое достигается с помощью форвакуумного и диффузионного паромасляного насосов.

На чистоту растущей пленки влияют наличие в потоке пара частиц материала испарителя и загрязнения, присутствующие на поверхности подложки. Поэтому выполняют очистку поверхности подложек в вакуумной камере непосредственно перед напылением пленок.

Для увеличения скорости парообразования испарение практически всегда проводят при температурах, превышающих условную температуру испарения вещества (форсированный режим). При низких скоростях испарения возможно образование рыхлых, шероховатых пленок.

Качество пленки определяется размером зерна и величиной адгезии к поверхности подложки. Повышение температуры подложек уменьшает плотность центров зародышеобразования и, следовательно, способствует формированию крупнозернистых пленок, и наоборот, повышение плотности потока пара вещества способствует получению пленок с мелкозернистой структурой.

При прочих равных условиях склонностью к образованию мелкозернистой структуры обладают металлы с высокой температурой испарения – W, Mo, Ta, Pt, Ni. Низкотемпературные металлы Zn, Cd и другие образуют крупнозернистые пленки.

Адгезия, т.е. прочность сцепления пленки с подложкой, при значительной разнице в их ТКЛР уменьшается из-за внутренних напряжений, возникающих в пленке, при охлаждении после проведения процесса напыления. Недостаточная адгезия является причиной отслаивания пленок. Пленки толщиной более 1,5 – 2 мкм имеют недостаточную адгезию, поэтому термовакuumное напыление применяют для получения пленок меньшей толщины – до 1 мкм.

Хорошая адгезия обеспечивается при напылении материалов, химически родственных с материалом подложки. В этом случае конденсация

сопровождается образованием прочных химических связей (хемосорбция). Материалы подложек для тонкопленочных микросхем – ситаллы, керамика, стекла состоят из оксидов металлов и неметаллов. Хемосорбция происходит при напылении оксидов, а также легкоокисляемых металлов Al, Cr, Mn, Ti, W. Некоторые распространенные материалы (например, золото) имеют плохую адгезию с типичными подложками, в том числе с кремнием. В таких случаях на подложку сначала наносят так называемый подслоя, обладающий хорошей адгезией, а затем на него напыляют основной материал, у которого адгезия с подслоем тоже хорошая. Например, для золота подслоем могут быть никель или титан.

2.1.2.2. Техника термовакuumного напыления (ТВН). Процесс ТВН выполняют в вакуумных камерах с предельным давлением $1,3 \cdot 10^{-4}$ – $6,6 \cdot 10^{-5}$ Па. Нагрев вещества осуществляют прямым или косвенным (теплопередачей от испарителя) способами: путем пропускания электрического тока, токами индукции, электронной бомбардировкой. Схема ТВН приведена на рис. 2.2.

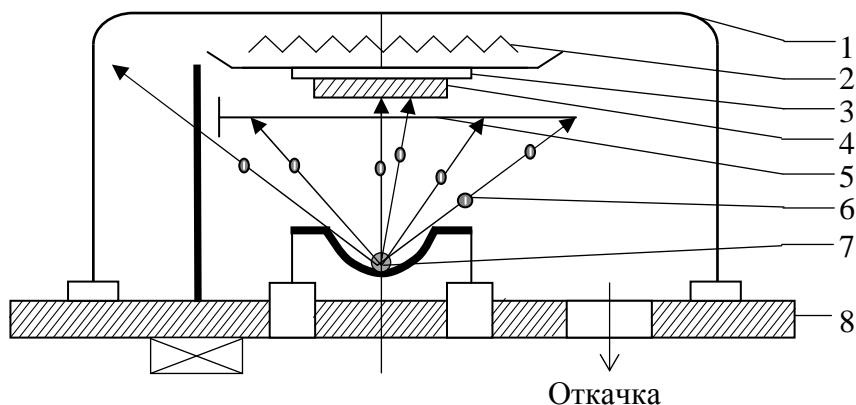


Рис. 2.2. Схема процесса термовакuumного напыления: 1 – вакуумная камера; 2 – нагреватель подложки; 3 – держатель подложки; 4 – подложка; 5 – заслонка; 6 – частицы испаряемого вещества; 7 – испаритель с навеской материала пленки; 8 – опорная плита

Стационарная и съемная оснастка вакуумной камеры периодически очищается от наслоений предыдущих напылений. Процесс начинают с загрузки вакуумной камеры – испаряемый материал помещают в тигли, подложки устанавливают в подложкодержатели, маски – в маскодержатели. Затем камеру герметизируют и производят откачку воздуха. При закрытой заслонке производят нагрев подложек до заданной температуры и испарителей до температуры испарения. Проводят ионную очистку поверхностей

подложек. Откачивают камеру до предельного вакуума. После этого открывают заслонку и ведут напыление пленки. При получении заданной толщины пленки процесс напыления прекращают, перекрывая атомарный поток заслонкой. Подложки охлаждают и после этого в камеру напускают воздух и производят выгрузку подложек.

Условной, практически установленной температурой испарения ($T_{усл}$) считается температура, при которой давление насыщенного пара вещества составляет примерно 1 Па.

Как правило, испарение большинства элементов происходит из жидкого состояния ($T_{исп.} > T_{пл.}$). Однако некоторые вещества могут испаряться из твердого состояния ($T_{усл.} > T_{пл.}$) – возгоняться.

Скорость испарения (т.е. количество вещества, покидающее 1см^2 свободной поверхности в 1 секунду при $T_{усл.}$) рассчитывают по формуле

$$v_{исп} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{T_{усл}}}, \quad (2.1)$$

где M – молекулярная масса, г/моль.

Скорость испарения связана с давлением насыщенных паров испаряемого вещества соотношением

$$v_{исп} = \frac{\alpha(p_u - p_k)}{\sqrt{2\pi MRT}}, \quad (2.2)$$

где α – коэффициент испарения; p_u , p_k – соответственно, давление насыщенных паров испаряемого вещества при температуре испарения и конденсации; T – температура испарения; R – универсальная газовая постоянная.

При $p_u \gg p_k$ $\alpha = 1$, получаем экспериментальную формулу

$$v_{исп} = 5,83 \cdot 10^{-2} p_u \sqrt{\frac{M}{T}}. \quad (2.3)$$

Процесс ТВН хорошо освоен, позволяет получать многие пассивные элементы, проводить металлизацию полупроводниковых структур, применяется при изготовлении фотошаблонов и др. С помощью ТВН можно получать пленки металлов, полупроводников, диэлектриков. Процесс обеспечивает высокие скорости роста пленок и степень чистоты, получение качественных пленок при сравнительно низких температурах подложек. Сравнительно легкая автоматизация процесса позволяет создавать сложные вакуумные установки и комплексы, управляемые с помощью ЭВМ.

К недостаткам метода относятся:

- изменение процентного соотношения компонентов при напылении сплавов и сложных веществ;

- недостаточная равномерность толщины пленок на больших подложках;
- трудность получения пленок тугоплавких материалов;
- высокая инерционность при использовании испарителей (после выключения нагрева испарителей парообразование продолжается, поэтому процесс напыления пленки прекращается с помощью механической заслонки);
- сравнительно невысокая адгезия пленок;
- длительность подготовки к процессу откачки по сравнению с напылением пленки (соответственно, 1 – 2 ч и 1 – 1,5 мин);
- трудность создания испарителей с большим ресурсом работы (более 50 – 100 ч);
- относительная сложность оборудования.

2.1.2.3. Типы и конструкции испарителей. Нагрев электропроводящего тела, обладающего высоким электрическим сопротивлением, при прохождении через него электрического тока называют резистивным. При этом, как правило, используют переменный ток.

Достоинства резистивного нагрева – высокий КПД, низкая стоимость оборудования, безопасность в работе (низкое напряжение на зажимах), малые габаритные размеры. Факторами, ограничивающими применение испарителей с резистивным нагревом, являются возможность загрязнения наносимой пленки материалом нагревателя, а также малый ресурс работы из-за старения (разрушения) нагревателя, что требует его периодической (иногда довольно частой) замены.

Испарители этого типа различных конструктивных вариантов могут быть с непосредственным или с косвенным нагревом испаряемого вещества.

Материалы, используемые для изготовления испарителей, должны отвечать следующим требованиям. Материал испарителя практически не должен испаряться при температуре протекания процесса ТВН. Для хорошего теплового контакта материал испарителя должен хорошо смачиваться расплавленным испаряемым веществом. Между материалом испарителя и испаряемым веществом не должны происходить никакие химические реакции, а также образовываться легкоиспаряемые сплавы, так как это приводит к загрязнению наносимых пленок и разрушению испарителей.

Для изготовления испарителей промышленных установок используют тугоплавкие металлы – вольфрам, тантал, молибден.

Следует особо отметить, что алюминий, применяемый для нанесения пленок, в расплавленном состоянии обладает высокой химической актив-

ностью и взаимодействует практически с любыми металлами, из которых изготавливают испарители. Это значительно снижает их срок службы. Поэтому такие испарители являются одноразовыми и после каждого процесса испарения их заменяют.

В испарителях с непосредственным нагревом ток в несколько десятков ампер проходит непосредственно через испаряемый материал. Такой метод испарения может быть применен только для сублимирующихся металлов, т.е. металлов, температура плавления которых выше температуры испарения (хром, титан).

Основное достоинство этих испарителей – отсутствие теплового контакта между их нагретыми элементами и испаряемым металлом, что обеспечивает высокую чистоту наносимой пленки. Однако они обеспечивают низкую скорость испарения, дают возможность испарять малое количество материала, который может быть использован только в виде ленты или проволоки, а также не позволяют испарять диэлектрики и большинство металлов. Сечение таких испарителей должно быть одинаковым на всем протяжении, иначе в месте утонения возникает перегрев и они перегорают. Испаритель с резистивным непосредственным нагревом показан на рис. 2.3.

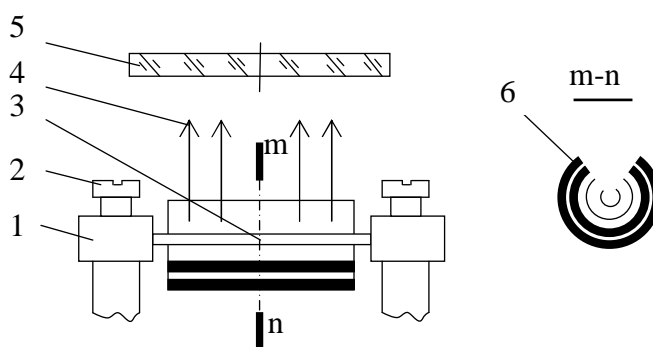


Рис. 2.3. Испаритель с резистивным непосредственным нагревом:
 1 – контактный зажим; 2 – винт; 3 – испаряемый материал; 4 – поток пара;
 5 – подложка; 6 – многослойный экран

Испаряемый материал 3 в виде проволоки или ленты вставляют в изготавливаемые из титана или нержавеющей стали и закрепляемые винтами 2 массивные контактные зажимы 1, к которым подводится электропитание. Для снижения тепловых потерь за счет излучения, а также направления потока пара 4 к подложке 5 служит многослойный экран 6.

Испарители с косвенным нагревом, в которых испаряемое вещество нагревается за счет теплопередачи от нагревателя, более универсальны, так как позволяют испарять проводящие и непроводящие материалы в виде

порошка, гранул, проволоки, ленты. Однако из-за контакта с нагретыми частями испарителя, а также из-за испарения материала подогревателя осаждаются менее чистые пленки.

Поверхность резистивных испарителей предварительно очищают, промывая в растворителях. Часто их также отжигают в вакууме. Форма испарителя с косвенным нагревом зависит от агрегатного состояния, в котором находится испаряемый материал. Их подразделяют на проволочные, ленточные и тигельные.

Проволочные испарители применяют для испарения веществ, которые смачивают материал нагревателя. При этом расплавленное вещество силами поверхностного натяжения удерживается в виде капли на проволочном нагревателе. Проволочные испарители изготавливаются V - и W-образной формы, а также спирале- и волнообразной.

Проволочный испаритель простейшей конструкции (рис. 2.4, а) используют для нанесения пленок алюминия, который хорошо смачивает вольфрамовый проволочный нагреватель – цилиндрическую проволочную спираль 2. Испаряемое вещество в виде скобочек (гусариков) 3 навешивают на спираль, которую отогнутыми концами 1 вставляют в контактные зажимы. По мере нагрева это вещество плавится и формируется на проволоке в виде капель. Снизу размещаются тепловой и ограничивающий экраны. Проволочные испарители предназначены для создания протяженного потока испаряемого материала, что достигается использованием одновременно нескольких навесок.

При плохой смачиваемости испаряемого вещества, а также для испарения навесок в форме гранул или кусочков применяют испарители в виде конической проволочной спирали 6 (см. рис. 2.4, б), закрепляемой на зажимах 4 токоподвода. Спираль окружена цилиндрическим тепловым экраном 5, а снизу размещается ограничивающий экран 7.

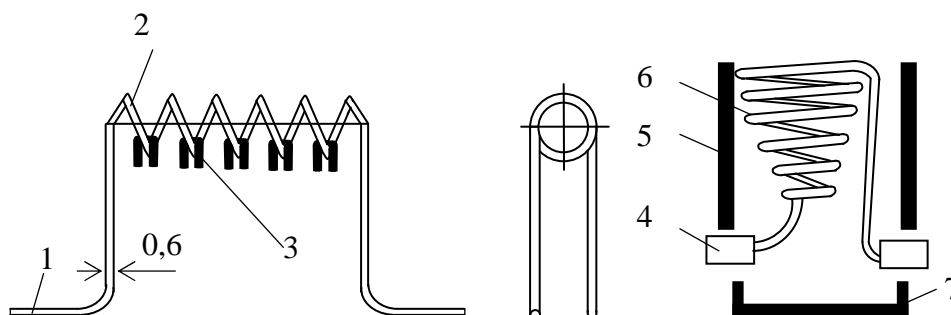


Рис. 2.4. Проволочные испарители косвенного нагрева с цилиндрической (а) и конической (б) проволочной спиралью: 1 – отогнутый конец спирали; 2, 6 – цилиндрическая и коническая спирали; 3 – испаряемый материал (гусарик); 4 – зажимы токоподвода; 5, 7 – цилиндрический тепловой и ограничивающий экраны

Наиболее распространенными материалами для изготовления проволочных испарителей является проволока диаметром 0,5–1 мм из вольфрама и тантала.

Существенным достоинством проволочных испарителей является простота их конструкции и возможность модификации под конкретные технологические условия. Кроме того, они хорошо компенсируют расширение и сжатие при нагреве и охлаждении. Недостаток этих испарителей – малое количество испаряемого за один процесс материала.

Ленточные испарители применяются для испарения металлов, плохо удерживающихся на проволочных испарителях, а также диэлектриков. Они изготавливаются с углублениями в виде полусфер, желобков, коробочек или лодочек. Наиболее распространенным материалом для таких испарителей является фольга толщиной 0,1 – 0,3 мм из вольфрама, молибдена и тантала. Испаритель с углублением в виде полусферы, предназначенный для испарения относительно малых количеств вещества, показан на рис. 2.5, *а*. Для снижения теплового потока из зоны испарения к зажимам токоподвода по краям полусферы имеются утонения сечения (шейки). Испарители лодочного типа (см. рис. 2.5, *б*) предназначены для испарения относительно больших количеств вещества. Чтобы скомпенсировать деформации испарителя, его профиль усложнен отгибом лапок, которыми он крепится к зажимам токоподвода.

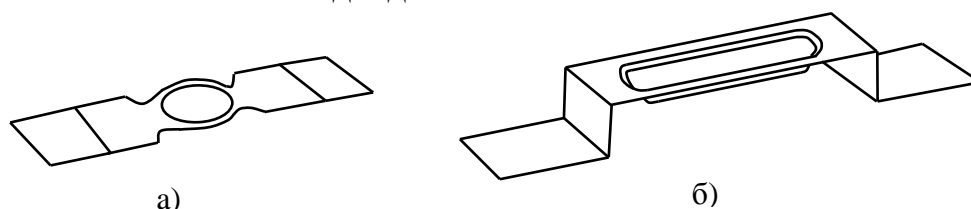


Рис. 2.5. Ленточные испарители косвенного нагрева из вольфрама, молибдена и тантала толщиной 0,1 – 0,5 мм: *а* – с углублением в виде полусферы; *б* – лодочного типа

Если для металлов, благодаря их высокой теплопроводности, испарение в вакууме есть явление поверхностное, то для таких неметаллических веществ плохой теплопроводности, как диэлектрики (например, SiO_2), существует большая вероятность их разбрызгивания при форсированном испарении. В этих случаях применяют испарители коробчатого типа усложненной конструкции (рис. 2.6), выполненные из ленты толщиной 0,1 мм в виде коробочки 1, в которую засыпают испаряемое вещество 5. Сверху коробочка закрывается однослойным или двухслойным экраном 3 с отверстиями, через которые проходят пары 2 наносимого материала.

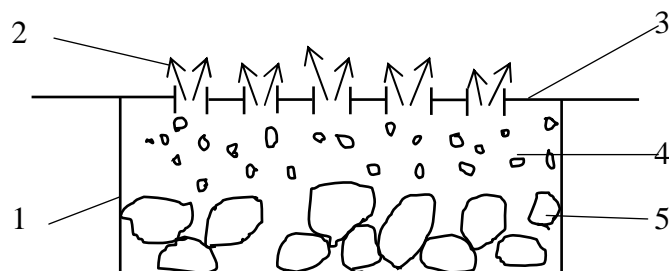


Рис. 2.6. Испаритель косвенного нагрева коробчатого типа: 1 – коробочка; 2 – поток паров наносимого вещества; 3 – экран; 4 – пары испаряемого вещества; 5 – испаряемое вещество

В случае применения двухслойного экрана отверстия располагают в шахматном порядке, что полностью исключает прямой пролет крупных частиц испаряемого вещества. Помимо предохранения от разбрызгивания такие испарители позволяют создавать над поверхностью испаряемого вещества ограниченное пространство, в котором пар 4 близок к насыщенному, что затрудняет обеднение соединения более легко испаряющимся компонентом.

Эффективную защиту от разбрызгивания капель, которым сопровождается процесс испарения некоторых веществ, обеспечивают лабиринтные испарители. Эти испарители имеют форму, исключающую прямой путь для выхода крупных частиц вещества в момент взрывного испарения. В результате поступающее в лабиринтный испаритель гранулированное вещество выходит из него только в виде пара в предпочтительном направлении в сторону подложек.

Лабиринтный испаритель для оксида кремния (рис. 2.7) выполнен в виде коробочки 1, по краям которой имеются лапки 2 для подсоединения к зажимам токоподвода. Сверху коробочка закрыта крышкой 5, имеющей боковой и нижней 6 экраны для снижения тепловых потерь излучением. В верхней части крышки имеются два патрубка. Через патрубок 3 в левую часть коробочки засыпают испаряемый материал 7, а затем этот патрубок закрывают круглой крышкой 4. Через правый патрубок 10 поступают пары наносимого материала, которые предварительно в коробочке проходят по лабиринту, образованному экранами 8 и 9, и из них отсеиваются макроскопические частицы.

В производстве часто бывает необходимо наносить пленки, состоящие не из одного вещества, а являющиеся сплавами. Это представляет наибольшую трудность в тонкопленочной технологии.

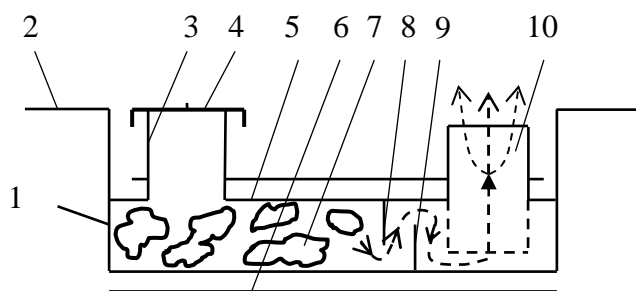


Рис. 2.7. Испаритель косвенного нагрева лабиринтного типа: 1 – коробочка; 2 – лапки; 3, 4 – патрубок для загрузки материала и его крышка; 5 – крышка испарителя; 6 – нижний экран; 7 – испаряемое вещество; 8, 9 – разделительные экраны; 10 – выходной патрубок

Вследствие различной упругости паров компонентов сплава состав пленки может заметно отличаться от исходного (эффект фракционирования сплава). Так, при нанесении сплава нихрома (Ni80 % + Cr20 %) при $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ на подложке образуется пленка, имеющая следующий состав: Ni – 60 %, Cr – 40 %.

Для получения состава пленок, соответствующего составу исходного сплава, применяют метод микродозирования (дискретное или взрывное испарение). Сущность этого метода (рис. 2.8) состоит в том, что из дозатора 4 на ленточный разогретый испаритель 5 дискретно сбрасываются небольшие порции порошка 1 испаряемого сплава с размерами частиц 100 – 200 мкм.

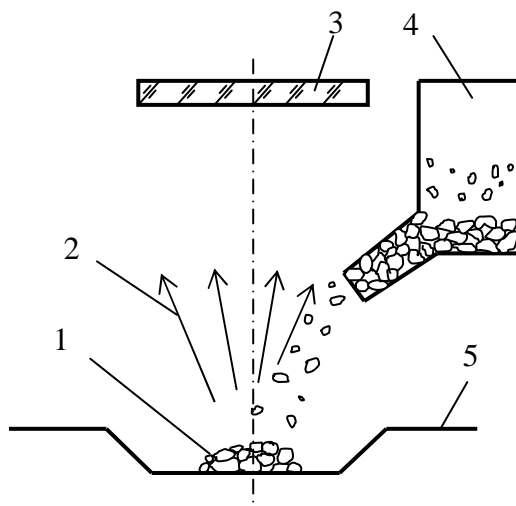


Рис. 2.8. Метод дискретного испарения: 1 – испаряемый порошок; 2 – пары наносимого вещества; 3 – подложка; 4 – дозатор; 5 – ленточный испаритель

Испарение микродоз происходит практически мгновенно и полностью, в результате чего на подложке 3 последовательно осаждаются очень тонкие слои. В пределах каждого слоя может наблюдаться неоднородный

состав (вследствие фракционирования сплава), однако уже в процессе нанесения взаимной диффузией атомов составляющих компонентов выравнивается концентрация каждого из них по толщине пленки.

Этот метод особенно эффективен при нанесении многокомпонентных сплавов (например, МЛТ-2М, нихром – оксид кремния). Достоинством его является также отсутствие загрязнений пленки материалом испарителя (малое время контакта микродозы сплава с испарителем).

Основной недостаток метода микродозирования – сложность наладки дозатора для подачи особо мелких порций испаряемого сплава. В условиях большого теплоизлучения (от перегретого металлического испарителя) устойчивую работу дозатора обеспечить трудно. Кроме того, имеется опасность не испарения, а разбрызгивания вещества в виде капель или твердых частиц.

Тигельные испарители используют, как правило, для испарения больших количеств сыпучих диэлектрических материалов. Тигли изготавливают из тугоплавких металлов, кварца, графита, а также керамических материалов (нитрида бора BN, оксида алюминия Al_2O_3 – алунда). Максимально допустимая температура испарителей из кварца составляет $1400\text{ }^{\circ}C$, графита – $3000\text{ }^{\circ}C$, оксида алюминия – $1600\text{ }^{\circ}C$.

Два типа испарителей с тиглями из керамики показаны на рис. 2.9. В испарителе первого типа (см. рис. 2.9, а) нагреватель в виде плоской улиткообразной спирали 1 располагается в полости керамического тигля 2, куда насыпается испаряемый материал. Такой испаритель позволяет испарять с высокими скоростями большое количество вещества.

В испарителе второго типа (см. рис. 2.9, б) нагреватель в виде конусообразной спирали 1 расположен с внешней стороны керамического тигля 2.

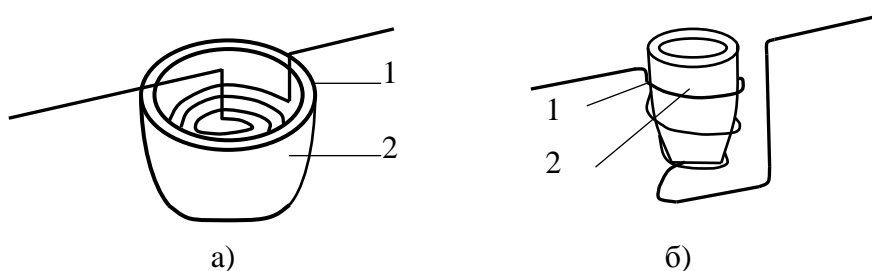


Рис. 2.9. Тигельные испарители прямого нагрева с внутренним (а) и внешним (б) спиральными нагревателями: 1 – спираль; 2 – тигель

При равной мощности питания первый испаритель нагревается до более высокой температуры, чем второй. Однако достоинством второго является отсутствие контакта испаряемого материала со спиральным на-

гревателем. Эксплуатационным недостатком тигельных испарителей является то, что они инерционны, так как малая теплопроводность материала, из которого изготавливают тигель, не обеспечивает быстрого нагрева испаряемого вещества.

2.1.3. Распыление ионной бомбардировкой

Осаждение пленок распылением материала в плазме газового разряда по сравнению с ТВН расширяет возможности получения пленок с заданными свойствами. Распыление позволяет осаждать пленки тугоплавких материалов, сплавов, сложных веществ и материалов с низким давлением паров.

Образование потока частиц происходит в результате бомбардировки поверхности мишени ионами аргона, ускоренными до энергий, достаточных для распыления. Материал распыляется в виде нейтральных атомов или молекул, и около 1 % его ионизируется электронами плазмы. Распыление, в отличие от испарения, не зависит от упругости пара осаждаемого вещества. Это позволяет наносить пленки тугоплавких материалов при относительно низких температурах. При получении пленок сплавов обычно сначала происходит распыление компонента с большим коэффициентом распыления. Приток недостающего компонента осуществляется диффузией, поэтому быстро наступает равновесие и состав потока распыленных атомов соответствует составу сплава. В результате только несколько первых атомных слоев пленки отличаются от основного состава. Нанесение пленок сложного состава можно осуществить также распылением нескольких различных катодов.

Распыление частиц происходит в плазме газового разряда. В результате столкновений с молекулами остаточного газа направленность потока распыляемых частиц теряется и они поступают на поверхность подложек под разными углами. Наряду с частицами распыленного вещества на подложки попадают также молекулы и ионы остаточных газов.

Конденсация, образование зародышей и рост пленок при ионном распылении существенно отличаются от этих этапов при термовакуумном напылении. Поток распыленного вещества имеет ряд особенностей:

- на один – два порядка увеличиваются энергии атомов, поступающих на подложки;
- на порядок меньше плотность потока частиц;
- наблюдается случайный характер направлений ударов атомов о поверхность подложек;
- в потоке наряду с нейтральными атомами присутствуют их ионы, а также молекулы остаточного газа.

Все это обуславливает повышение температуры подложки, увеличение скорости миграции по поверхности, интенсивную десорбцию осаждаемых молекул и остаточных газов.

Пленки осаждаются практически при любых плотностях потока и в широком температурном интервале подложек, т.е. при ионном распылении для конденсации не существует критической температуры подложек и критической плотности потока распыленного вещества.

Наряду с механизмом роста пленок из нейтральных частиц здесь участвует и зарядовый механизм роста: наряду с атомами распыленного источника на подложку попадают ионы инертного газа и относительно большое количество ионизуемых в межэлектродном пространстве атомов источника. Заряженные частицы за счет дополнительной электростатической энергии увеличивают поверхностную миграцию между зародышами и ускоряют их рост. Пленки, осаждаемые ионным распылением, становятся сплошными при меньших толщинах, чем пленки, полученные ТВН. Скорости осаждения пленок, как правило, ниже, чем при ТВН, из-за малых плотностей потока. Плотность пленок выше из-за большей энергии осаждаемых частиц.

Различают катодное (физическое и реактивное), ионно-плазменное, высокочастотное (ВЧ) и магнетронное распыление.

2.1.3.1. Физическое катодное распыление. Нанесение проводниковых и полупроводниковых пленок этим методом выполняют в вакуумных камерах диодного типа в плазме тлеющего разряда аргона. Подложки располагают на аноде (рис. 2.10), а катод является источником материала для образования пленки.

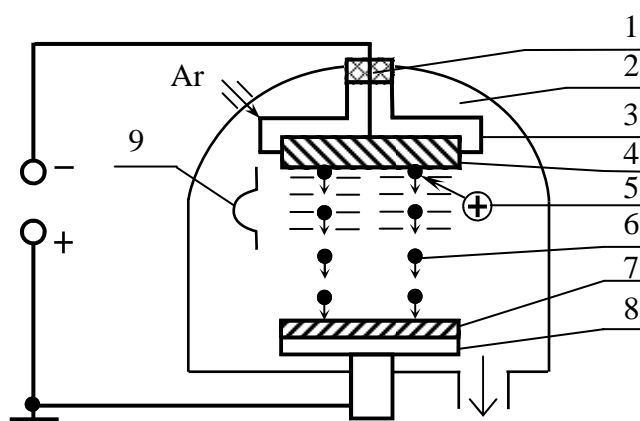


Рис. 2.10. Схема процесса получения пленок катодным распылением:
 1 – изолятор; 2 – вакуумная камера; 3 – экран; 4 – катод-мишень; 5 – ион аргона, бомбардирующий катод; 6 – частицы распыленного катода; 7 – подложка; 8 – анод; 9 – темное катодное пространство тлеющего разряда

В камеру вакуумной установки загружают подложки и производят откачку до давления $10^{-3} - 10^{-4}$ Па, затем напускают аргон до давления 1,3 – 13 Па. Далее процесс ведут при непрерывной откачке и поступлении через натекаТЕЛЬ аргона, что обеспечивает заданное давление газа. При подаче на катод-мишень отрицательного потенциала 1,5 – 4 кВ относительно заземленного анода в камере зажигается тлеющий разряд. Ионы аргона, попавшие в область катодного пространства, бомбардируют катод – начинается его распыление. Распыление сначала ведут на заслонку, а после очистки поверхности катода заслонку открывают – поток частиц осаждается на поверхности подложек. Процесс прекращают отключением напряжения катод – анод. После охлаждения подложки выгружают.

Преимущества катодного распыления:

- низкие температуры подложек в процессе нанесения пленок;
- бóльшая, чем при термовакуумном напылении, равномерность пленок по площади подложек, так как диаметр катода (300 – 350 мм) существенно больше расстояния катод – подложка (30 – 80 мм);
- безынерционность (распыление начинается при подаче на электроды напряжения и мгновенно прекращается при его снятии);
- отсутствие необходимости в частой замене источника частиц растущей пленки катода;
- неизменяемость стехиометрии состава пленки по сравнению с составом катода;
- высокая адгезия пленок к подложкам.

К основным недостаткам относятся:

- сравнительно невысокие скорости осаждения;
- загрязненность пленок молекулами остаточных газов;
- более сложное управление техпроцессом по сравнению с термовакуумным напылением.

2.1.3.2. Реактивное катодное распыление. В отличие от обычного физического, реактивное катодное распыление осуществляется в тлеющем разряде смеси инертного и активного газов. Частицы распыляемого катода химически взаимодействуют с активным газом или образуют с ним твердые растворы, и новое вещество поступает на подложки. Чтобы процесс образования вещества наносимой пленки не происходил на катоде, что весьма затрудняет горение разряда, применяют смеси аргона с содержанием активных газов не более 10 %.

Для получения пленок оксидов распыление производят в плазме аргон – кислород, нитридов – в плазме аргон – азот, карбидов – в плазме

аргон – угарный газ или аргон – метан. Вводя в камеру различные активные газы, можно получать пленки разнообразных соединений, которые практически невозможно получить при термовакуумном напылении. Например, ферритовые магнитные пленки получают при распылении сплава никеля с железом в плазме тлеющего разряда аргон – кислород; пленки силицида молибдена получают распылением молибденовой мишени в плазме $\text{Ar} + \text{SiH}_4$.

Реактивное катодное распыление позволяет не только получать разнообразные по составу пленки, но и контролируемо управлять свойствами пленок, например, удельным сопротивлением резистивных пленок. Например, при распылении танталового катода в плазме аргон – азот получают тонкие пленки TaN , сопротивление которых можно изменять концентрацией вводимого в камеру азота. Реактивное распыление широко применяется для формирования высокоомных резисторов.

Основная техническая трудность при реактивном катодном распылении – точное дозирование вводимого в камеру активного газа.

2.1.3.3. Ионно-плазменное распыление. Оно осуществляется при более низких давлениях (10^{-2} Па) в плазме несамостоятельного дугового разряда. Название этого метода принято условно; физическое катодное и реактивное катодное нанесение пленок также являются ионно-плазменными процессами. Пленки получают в трех- или четырехэлектродных вакуумных камерах (рис. 2.11). Термоэмиссионный катод служит для поддержания дугового разряда. Источником частиц материала наносимой пленки является дополнительный электрод-мишень. Подложки располагают напротив мишеней на карусели или барабане.

Воздух из камеры откачивают до предельного вакуума, включают ток накала катода, после разогрева катода между ним и анодом прикладывают напряжение и в камеру впускают инертный газ. Между анодом и катодом зажигается дуговой разряд. При подаче на мишень или подложку небольшого отрицательного потенциала можно произвести их ионную очистку. Для нанесения пленки на мишень подается отрицательный (по отношению к аноду) потенциал 200 – 1000 В. Электрическое поле мишени вытягивает из плазмы положительные ионы и ускоряет их до энергий в сотни электрон-вольт. Начинается распыление и формирование пленки на подложках.

Ионно-плазменное распыление по сравнению с катодным распылением осуществляется при более высоком вакууме, поэтому длина свободного пробега и энергия распыленных атомов больше. Благодаря этому за-

грязнения пленок молекулами остаточных и инертных газов меньше, скорость осаждения пленок больше и достигает нескольких сотен и даже тысяч ангстрем в минуту. Плотность пленок больше, адгезия пленок к поверхности подложек лучше. Процесс осаждения легче управляем: толщина пленки регулируется потенциалом мишени и временем. Можно проводить большое количество процессов осаждения пленок без смены мишени, что обеспечивает воспроизводимость свойств осаждаемых пленок. Например, время работы хромовой мишени составляет не менее 400 ч.

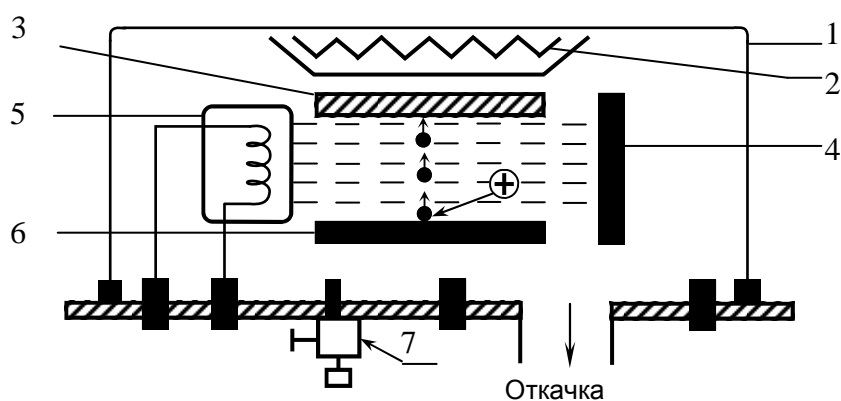


Рис. 2.11. Схема процесса ионно-плазменного распыления: 1 – вакуумная камера; 2 – нагреватель; 3 – подложка; 4 – анод; 5 – катод; 6 – мишень; 7 – игольчатый натекатель

Процесс осаждения пленок с заданными свойствами отвечает требованиям автоматизации и может быть применен в непрерывном цикле создания микросхем.

Недостатки ионно-плазменного распыления:

- ограниченные возможности реактивного распыления из-за малого срока службы термокатода в присутствии активных газов;
- катод является дополнительным источником загрязнений;
- сравнительная сложность устройства и эксплуатации оборудования.

Ионно-плазменное распыление широко применяется для изготовления пленочных пассивных элементов, получения маскирующих пленок на полупроводниковых пластинах, осаждения полупроводниковых слоев и магнитных пленок.

2.1.3.4. Магнетронное распыление. Достоинства метода:

- высокая скорость роста пленок, их хорошая адгезия и чистота;
- низкая температура нагрева подложек;
- возможность распыления проводников и диэлектриков;

- возможность получения сверхтонких (менее 20 нм) пленок;
- безынерционность процесса.

Метод магнетронного распыления применяется для получения:

- жидких кристаллов – сверхтонких прозрачных пленок;
- прецизионных фотошаблонов, изготовленных на базе тонких пленок хрома;
- пленок Al, его сплавов и тугоплавких металлов.

Рассмотрим магнетронно-распылительную систему с плоской мишенью (рис. 2.12). Магнетрон помещается под колпак вакуумной распылительной установки. Рабочим газом является аргон. Питание подается от источника постоянного тока. Над мишенью-катодом создается неоднородное электрическое поле и аномальный тлеющий разряд.

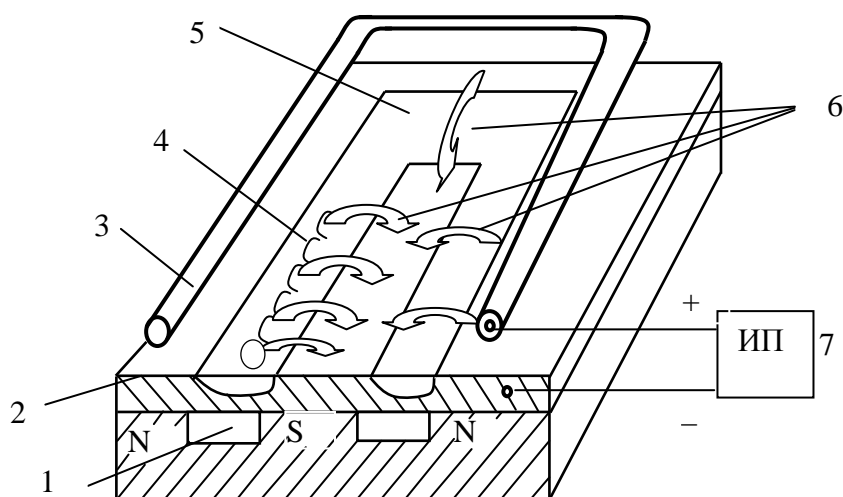


Рис. 2.12. Магнетронно-распылительная система с плоской мишенью:
 1 – постоянный магнит; 2 – мишень-катод; 3 – анод; 4 – траектория движения электронов; 5 – зона распыления; 6 – силовые линии магнитного поля; 7 – источник питания

Происходит образование плазмы, и ионы бомбардируют мишень-катод. Замкнутое магнитное поле локализует плазму непосредственно у поверхности мишени. Электроны, эмитированные анодом, захватываются и удерживаются магнитным полем, совершая сложное циклическое движение у поверхности мишени до тех пор, пока не столкнутся с атомами аргона. В результате столкновения электроны теряют большую часть энергии на ионизацию рабочего газа.

За счет этого увеличивается концентрация положительных ионов у поверхности мишени-катода, что приводит к сильной ионной бомбардировке мишени. Так как у поверхности мишени-катода есть магнитная ловушка,

то высокоэнергетические вторичные электроны не бомбардируют подложку и она не нагревается. Применение магнетронного распыления позволяет значительно увеличить скорость напыления пленок, например, средняя скорость напыления молибдена составляет 12 нм/с, а золота – 37 нм/с. Следует отметить, что скорость распыления зависит (практически линейно) от мощности источника питания и от расстояния подложка – мишень. Стабильность и воспроизводимость процесса зависит от следующих параметров магнетронно-распылительной системы:

- напряжения питания электродов (менее 1000 В);
- тока разряда (подбирается экспериментально);
- плотности тока мишени (40 – 200 мА/см²);
- удельной мощности (40 – 200 Вт/см²);
- индукции магнитного поля (0,04 – 0,1 Тл);
- рабочего давления под колпаком (10⁻² – 1 Па).

При уменьшении рабочего давления в системе и индукции магнитного поля ВАХ разряда сдвигается в область больших рабочих напряжений.

Рассмотрим разновидности магнетронно-распылительных систем.

1. Коаксиальная магнетронная система – рис. 2.13.

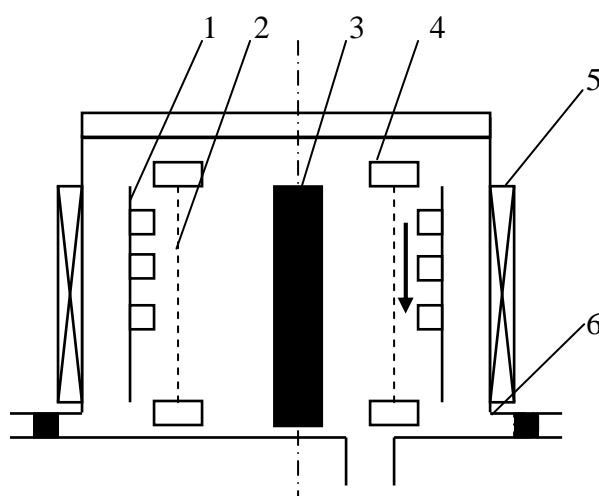


Рис. 2.13. Коаксиальная магнетронная система: 1 – подложкодержатель; 2 – анод; 3 – катод-мишень; 4 – экран; 5 – магнетронная система; 6 – колпак

Достоинства применения коаксиальной магнетронной системы:

- небольшая интенсивность бомбардировки подложек вторичными электронами, так как существует коаксиальное магнитное поле, применяются заземленные экраны по торцам цилиндрического катода и сетчатый цилиндрический анод;

- в данном методе температура нагрева подложек не превышает 50 °С.

Недостатком метода является достаточно низкая скорость распыления, обусловленная осаждением части материала на сетчатом аноде.

2. Планетарная магнетронно-распылительная система (рис. 2.14) позволяет повысить скорость напыления пленок.

В этом методе скорость напыления сравнима с вакуум-термическим напылением и обусловлена высокой плотностью протекающего тока. Недостатком метода является большой расход материала. Следует отметить, что существуют установки с неподвижным магнитом, подвижным магнитом, установки полунепрерывного и непрерывного типов.

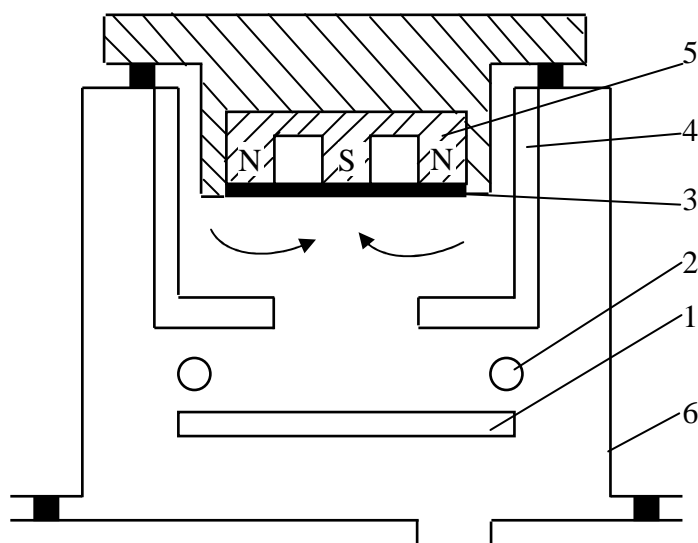


Рис. 2.14. Планетарная магнетронная система: 1 – подложкодержатель; 2 – анод; 3 – катод-мишень; 4 – экран; 5 – магнетронная система; 6 – колпак

2.1.4. Химическое осаждение пленок из растворов

Электрохимическое осаждение. Этот метод получения пленок отличается от предыдущих тем, что рабочей средой является жидкость. Однако характер процессов сходен с ионно-плазменным напылением, поскольку и плазма, и электролит представляют собой квазинейтральную смесь ионов и неионизированных молекул или атомов. А главное, осаждение происходит так же постепенно (послойно), как и напыление, т.е. обеспечивается возможность получения тонких пленок.

Электрохимическое осаждение исторически развилось значительно раньше всех других рассмотренных методов – еще в XIX веке. Уже десятки лет назад оно широко использовалось в машиностроении для разного рода тонких гальванических покрытий (никелирование, хромирование и т.п.).

В микроэлектронике электрохимическое осаждение не является альтернативой термическому и ионно-плазменному напылению – оно дополняет их и сочетается с ними.

В основе электрохимического осаждения лежит электролиз раствора, содержащего ионы необходимых примесей. Например, если требуется осадить медь, используется раствор медного купороса, а если золото или никель – растворы соответствующих солей.

Метод отличается простотой оборудования и проведения процесса: достаточно иметь ванну с подогревом (рис. 2.15) и вентиляционно-вытяжную систему. Здесь отсутствует необходимость иметь анод и катод, упрощается закрепление образцов, уменьшаются непроизводительные расходы металлов, что очень важно, если они являются благородными. Пленки можно наносить локально и на профилированные поверхности. Процессы химического осаждения обеспечивают высокую равномерность толщин пленок.

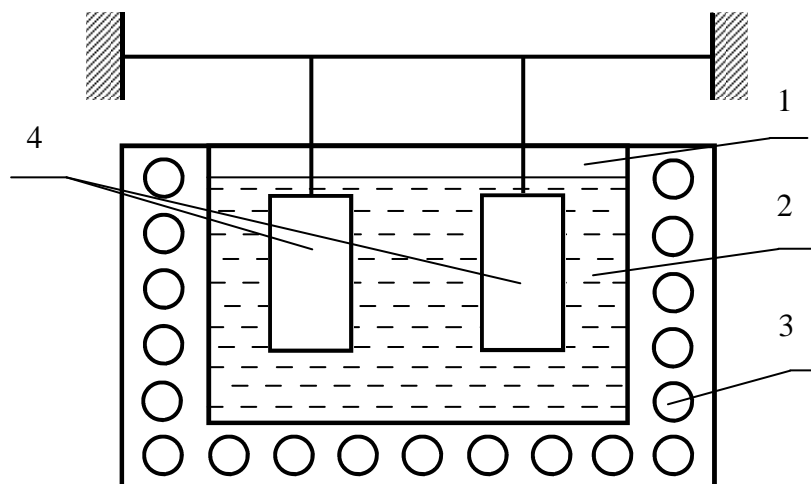


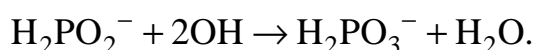
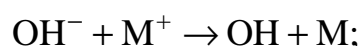
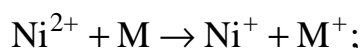
Рис. 2.15. Ванна химического осаждения пленок из растворов: 1 – ванна; 2 – раствор; 3 – электронагреватель; 4 – образцы, покрываемые пленкой

Большое преимущество электрохимического осаждения перед напылением состоит в гораздо большей скорости процесса, которая к тому же легко регулируется изменением тока. Поэтому основная область применения электролиза в микроэлектронике – это получение сравнительно толстых пленок (10 – 20 мкм и более). Качество (структура) таких пленок хуже, чем при напылении, но для ряда применений они оказываются вполне приемлемыми.

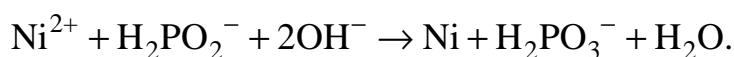
Метод основан на вытеснении металлов из растворов их солей или на восстановлении ионов металлов в растворах. В промышленном произ-

водстве метод наиболее часто применяют для получения пленок золота и никеля. Рассмотрим пример химических реакций при получении пленок никеля на пластине полупроводника.

Химическое никелирование состоит в каталитическом восстановлении никеля из раствора его соли. Процесс ведется в щелочной среде, взаимодействие идет поэтапно:



Суммарная реакция имеет вид



Начальная стадия процесса заключается в переходе электронов от металла-катализатора (М) к ионам никеля и превращении их в одновалентные ионы. Далее реакция диспропорционирования приводит к образованию металлического никеля. Возвращение электронов к катализатору осуществляется посредством ионов гидроксила, превращающегося при этом в радикал, восстанавливающийся затем гипофосфитом.

2.1.4.1. Анодирование. Один из вариантов химического ионно-плазменного напыления – анодирование. Этот процесс состоит в окислении поверхности металлической пленки (находящейся под положительным потенциалом) отрицательными ионами кислорода, поступающими из плазмы газового разряда. Для этого к инертному газу (как и при чисто химическом напылении) следует добавить кислород. Таким образом, анодирование осуществляется не нейтральными атомами, а ионами.

Химическое напыление и анодирование, вообще говоря, проходят совместно, так как в газоразрядной плазме (если она содержит кислород) сосуществуют нейтральные атомы и ионы кислорода. Для того чтобы анодирование превалировало над чисто химическим напылением, подложку располагают «лицом» (т.е. металлической пленкой) в сторону, противоположную катоду, с тем чтобы на нее не попадали нейтральные атомы.

По мере нарастания окисного слоя ток в анодной цепи падает, так как окисел является диэлектриком. Для поддержания тока нужно повышать питающее напряжение. Поскольку часть этого напряжения падает на пленке, процесс анодирования протекает в условиях большой напряженно-

сти поля в окисной пленке. В результате и в дальнейшем (при эксплуатации) она обладает повышенной электрической прочностью.

К числу других преимуществ анодирования относятся большая скорость окисления (поскольку поле в пленке окисла ускоряет взаимные перемещения атомов металла и кислорода) и возможность управления процессом путем изменения тока в цепи разряда. Качество окисных пленок, получаемых методом анодирования, выше, чем при использовании других методов.

2.1.5. Металлизация

В полупроводниковых ИС процесс металлизации призван обеспечить омические контакты со слоями полупроводника, а также рисунок межсоединений и контактных площадок.

Алюминиевые межсоединения. Наиболее широкое применение при изготовлении межэлементных соединений в кремниевых ИМС получила технология металлизации алюминием. Использование алюминия дает многие преимущества. Алюминий позволяет изготовить ИМС с металлизацией лишь одним металлом, что значительно упрощает технологию. Его испарение в вакууме – наиболее отработанный и легко осуществляемый процесс. Алюминий обладает хорошей адгезией к оксидам. Пленки алюминия легко обрабатываются методами фотолитографии для получения межэлементных соединений необходимой конфигурации. Испарение алюминия производят из тиглей с косвенным подогревом или с помощью электронного луча. В интегральных микросхемах пленки алюминия имеют толщину ~1 мкм. В многослойных структурах со многими уровнями металлизации первый слой металла часто делают более тонким.

Пленки, нанесенные на аморфную поверхность диоксида кремния, выращенного термическим окислением, являются поликристаллическими. Они имеют зеркально гладкую поверхность, однако под действием повышенных температур последующих технологических процессов происходит рост кристаллитов и поверхность становится шероховатой. Удельное сопротивление пленки Al толщиной 1 мкм составляет $3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см и на 10 – 20 % превышает удельное сопротивление чистого алюминия. Пленки алюминия на окисленных пластинах кремния при комнатных температурах обычно находятся под действием растягивающих напряжений порядка $(1 - 2) \cdot 10^5$ Н/см².

Создание определенного рисунка производится методом фотолитографии. В серийных ИМС ширина линий и зазоров между ними составляет

5 – 10 мкм. В СБИС эти размеры на порядок меньше. После получения нужного рисунка алюминиевое покрытие подвергают термообработке для получения низкоомного контакта к кремнию. Режим отжига составляет несколько минут при 550 °С. Эта температура ниже температуры появления жидкой фазы в системе Al – Si. Операция вжигания алюминия приводит к твердофазной реакции растворения Si в Al. Количество кремния, растворимого в алюминии, зависит от температуры и длительности термообработки и кристаллографической ориентации подложки. Растворение в направлении [111] происходит медленнее, чем в других направлениях. Чрезмерно высокая температура или отсутствие контроля процесса вжигания может привести к разрыву алюминия на ступеньках пленки диоксида вблизи контактных окон и площадок. Алюминий дает низкоомный контакт к кремнию с электропроводностью p- и n⁺-типа. Именно такие слои используются в интегральных микросхемах, изготавливаемых как по биполярной, так и по МДП-технологии.

Использование алюминия имеет свои недостатки. Электродиффузия ионов алюминия происходит при плотностях токов, меньших, чем в других металлах, вследствие чего в пленках появляются пустоты и образуются острые выступы, служащие причиной коротких замыканий в системах с несколькими уровнями металлизации. При одновременном использовании других металлов возможна гальваническая коррозия алюминия. Соединения алюминия с золотом хрупки, что уменьшает проводимость и приводит к повреждению пленок. Не решена проблема получения хорошего контакта между двумя пленками алюминия, а обычные методы пайки для крепления к ним выводов неприменимы. Если пленка алюминия покрыта диэлектриком, то при нагреве совместное действие собственных напряжений в диэлектрике и напряжений, обусловленных расширением алюминия, вызывает его растрескивание на краях металлических шин.

В случае подсоединения золотых проволочек к пленке алюминия методом термокомпрессии возможно образование интерметаллических соединений, если не выдерживать необходимый режим. Эти соединения со временем вызывают механическое повреждение контакта. При повышенных температурах алюминий взаимодействует с SiO₂ и фосфорно-силикатным стеклом, что может приводить к разрушению тонких пленок, используемых в МОП-транзисторах. Несмотря на отмеченные недостатки, металлизация алюминием нашла повсеместное применение, так как она позволяет снизить стоимость и упростить технологический процесс, не ухудшая надежности и параметров микросхем.

2.1.6. Осаждение из газовой фазы

Осаждение из газовой фазы можно определить как конденсацию газообразных (парообразных) элементов или соединений с образованием твердых осадков. Газовая фаза может иметь тот же состав, что и осадок. Это обычный случай физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ), при котором покрытия получают только за счет конденсации вещества. К ФОГФ относятся процессы термического вакуумного испарения и ионного распыления материалов.

При химическом осаждении из газовой фазы (ХОГФ) состав газовой фазы и состав осадка существенно различаются. Летучее соединение осаждаемого элемента подается к подложке, где подвергается термическому разложению (пиролизу) или вступает в восстановительные химические реакции с другими газами (или парами); при этом нелетучие продукты реакций осаждаются на поверхность подложки. Осадки образуются в результате большого количества химических реакций, протекающих в газовой фазе вблизи от поверхности подложки и на самой поверхности подложки, что в значительной мере усложняет процесс осаждения, но делает его гораздо более универсальным и гибким.

Химическое осаждение из газовой фазы – универсальный и энергетически экономичный (относительно ФОГФ) метод атомно-молекулярного формирования покрытий путем контролируемого осаждения вещества в виде отдельных атомов или молекул в целях получения пленок с требуемыми свойствами (заданной плотности, толщины, ориентации, состава и т.д.). При ХОГФ материал осаждается в виде порошка, если химическая реакция образования его частиц в твердом состоянии протекает только в газовой фазе, и в виде пленочного покрытия, если реакция образования твердых частиц материала происходит на поверхности подложки. Очевидно, что для получения функциональных слоев ИМС пригодна только вторая группа процессов химического осаждения из газовой фазы.

В настоящее время к ХОГФ материалов относят процессы, протекающие на границе раздела двух фаз: твердой (поверхности подложки) и газообразной (газа, пара или газовой низкотемпературной неравновесной плазмы) с участием большой совокупности инертных и химически активных нейтральных и заряженных газовых частиц, электронов и фотонов в широком (от 0,025 до 500 эВ) диапазоне энергий. Каждая из групп, в свою очередь, подразделяется на более мелкие подгруппы по виду активации, способу подачи реагентов, виду группы материалов, к которой относится осаждаемый слой, по химическому составу газовой фазы.

2.1.6.1. Применение процессов химического осаждения из газовой фазы. Классификация процессов ХОГФ приведена на рис. 2.16.



Рис. 2.16. Классификация процессов ХОГФ

Процессы ХОГФ только с термической активацией подразделяются на низкотемпературные процессы до 500 °С, которые выдерживает алюминиевая металлизация, и высокотемпературные процессы свыше 500 °С, которые могут быть использованы только на активной части изготовления ИМС. Кроме того, обе группы процессов ХОГФ могут разделяться по скорости нагрева подложки (пластины):

- на обычные равновесные термические процессы, в которых подложка нагревается до рабочей температуры в течение нескольких минут, приходя в тепловое равновесие с нагретым подложкодержателем или нагретой реакционной зоной;
- на быстрые термические процессы, в которых подложка достигает стационарной рабочей температуры (не приходя в термическое равновесие с подложкодержателем или реакционной зоной) с помощью лампового нагрева со скоростями 25 – 150 °С/с.

Следует отметить, что существуют чисто плазмохимические и чисто фотонно-химические процессы ХОГФ, в которых нет специального активирующего воздействия температуры на пластины (подложкодержатели).

Процессы ХОГФ с дополнительной (к термической) активацией подразделяются по виду активации:

- на плазмоактивируемые процессы;
- на фотонноактивируемые процессы – активируемые излучением;
- на радикальноактивируемые процессы – процессы, активируемые химически активными частицами (радикалами);
- на катализаторноактивируемые процессы – процессы, активируемые адсорбированными на поверхности газовыми частицами, играющими роль катализатора реакции осаждения).

По способу подачи реагентов ХОГФ подразделяются на процессы:

- с непрерывной подачей всех реагентов, участвующих в реакции осаждения функционального слоя;
- с дискретной, разнесенной во времени подачей каждого из реагентов, участвующих в реакции осаждения функционального слоя.

В случае использования жидких реагентов газ-носитель пробулькивается сквозь них или проходит над их поверхностью, захватывает некоторое количество жидких реагентов и подает их в реактор. Способ подачи жидкого реагента с помощью газа-носителя чувствителен к рабочему давлению, длине линии подачи реагента, уровню жидкого реагента в емкости и температуре емкости с жидким реагентом.

Способ прямой подачи жидкого реагента в реактор включает его нагрев в емкости, превращение в пар и подачу пара по нагретой линии в реактор. Этот способ исключает большинство проблем способа с использованием газа-носителя, легко количественно калибруется подача жидкого реагента, но скорость испарения жидкого реагента зависит от конструкции и материала емкости и испарителя (нагревателя). Чем выше температура испарителя, тем большее количество жидкого реагента может подаваться в реактор.

Процессы ХОГФ с дискретной подачей реагентов подразделяются:

- на процессы, в которых в промежутке между подачей каждого из реагентов, участвующих в реакции осаждения функционального слоя, происходит откачка системы или ее продувка инертным газом при том же давлении, что и при подаче реагентов, так что реагенты не встречаются в газовой фазе у поверхности подложки, а происходит периодическая самоостанавливающаяся реакция одного подаваемого реагента с адсорбируемым на поверхности подложки слоем другого реагента;
- на процессы, в которых в промежутке между подачей каждого из реагентов, участвующих в реакции осаждения функционального слоя, происходит очень быстрая продувка системы инертным газом при повы-

шенном давлении. В этом случае реагенты имеют возможность более длительного взаимодействия на поверхности подложки, так как скорости осаждения слоев в несколько раз выше, чем при атомно-слоевом осаждении.

По группе материалов, к которой относится осаждаемый слой, процессы ХОГФ подразделяются на процессы осаждения полупроводников, диэлектриков, металлов, силицидов и нитридов металлов.

К полупроводникам относятся:

- эпитаксиальные монокристаллические пленки кремния, германия и гетероструктуры кремний – германий;
- пленки нелегированного и легированного поликремния, аморфного кремния, аморфного гидрогенизированного (содержащего водород) кремния.

К диэлектрикам относятся:

- аморфные пленки двуокиси кремния;
- аморфные пленки силикатных стекол нелегированных или легированных фосфором (фосфоро-силикатное стекло – ФСС), легированных бором (боросиликатное стекло – БСС), легированных бором и фосфором (борофосфоросиликатное стекло – БФСС);
- стехиометрические и нестехиометрические пленки нитрида кремния, гидрогенизированного нитрида кремния;
- пленки диэлектриков с низкой диэлектрической постоянной, например, пленка фторолегированного силикатного стекла (ФЛСС);
- пленки диэлектриков с высокой диэлектрической постоянной, например, пленка окиси тантала (Ta_2O_5).

К металлам относятся пленки вольфрама, титана, тантала, алюминия и меди. К силицидам и нитридам металлов относятся пленки силицида (WSi_2) и нитрида (WN) вольфрама, силицида ($TiSi_2$) и нитрида (TiN) титана, нитрида тантала (TaN).

В случае если на поверхности подложки располагаются слои разных материалов, то процессы ХОГФ могут подразделяться на селективные и неселективные. При селективных процессах пленка осаждается только на участки подложки, где находится определенный материал. Например, осаждение пленки вольфрама на поверхность подложки со слоем двуокиси кремния, в котором вскрыты участки к монокремнию, происходит только на участках монокремния.

В неселективных процессах ХОГФ осаждение пленок происходит на всю поверхность подложки независимо от вида материалов на ее поверхности.

И наконец, процессы ХОГФ пленок материалов могут классифицироваться по химическому составу газовой фазы, т.е. по виду химических реагентов, используемых для осаждения пленки материала.

С операции ХОГФ могут выходить структуры трех видов:

1. Структуры с тонкими (1,0 – 100 нм) и толстыми (500 – 1500 нм) пленками, осажденными на гладкую поверхность подложки, используемые в качестве приборных, адгезионных, защитных, маскирующих и антиотражающих функциональных слоев.

2. Структуры с тонкими пленками, осажденными на рельефную поверхность подложки, используемые в качестве зародышеобразующих, смачивающих, адгезионных и барьерных функциональных слоев.

3. Структуры с толстыми пленками, осажденными на рельефную поверхность подложки, используемые в качестве заполняющих и планаризирующих рельеф функциональных слоев изоляции и межслойной металлизации.

2.1.6.2. Состав и параметры оборудования химического осаждения из газовой фазы. Оборудование ХОГФ пленок состоит из следующих основных функциональных систем:

1. Реактор (система осаждения), служащий для проведения процесса осаждения функциональных слоев на пластины (подложки) и состоящий из рабочей камеры и расположенных внутри или присоединенных к ней снаружи подложкодержателей, экранов, электродов, нагревательных элементов, источников стимулирующих воздействий и химически активных частиц (ХАЧ).

2. Газовая система, служащая для подачи требуемых потоков газов, паров или парогазовых смесей в рабочую камеру и автономные источники стимулирующих воздействий и ХАЧ, их распределения в пространстве и во времени.

3. Вакуумная или вентиляционная система, служащая для обеспечения требуемых остаточных и рабочих давлений, а также скоростей откачки или отвода поступающих реагентов и продуктов реакций в рабочей, транспортной и шлюзовой камерах, автономных источниках стимулирующих воздействий и ХАЧ.

4. Система возбуждения и поддержания плазмы разряда в рабочей камере при проведении плазмоактивируемых (плазмостимулированных) процессов осаждения и процессов автоматической очистки элементов рабочей камеры.

5. Система термостатирования испарителей, участков газовых каналов и откачных магистралей, электродов, стенок камер, подложкодержателей, служащая для измерения, регулирования и стабилизации их температуры.

6. Система загрузки – выгрузки пластин, кассет, контейнеров, транспортирования и позиционирования пластин внутри установки.

7. Система контроля момента окончания процесса осаждения функционального слоя, состоящая из датчиков сигналов на основе оптического эмиссионно-спектрального, лазерного интерферометрического или масс-спектрометрического методов, оптических и электронных устройств, а также специализированных программно-аппаратных вычислительных комплексов для обработки полученных сигналов по требуемому алгоритму.

8. Система управления, служащая для управления перечисленными выше системами, контроля режимов их работы и исправности входящих в них устройств и состоящей из управляющей ЭВМ.

На рис. 2.17 представлена классификация промышленных систем химического осаждения из газовой фазы, а на рис. 2.18 – типичные конструкции систем ХОГФ.

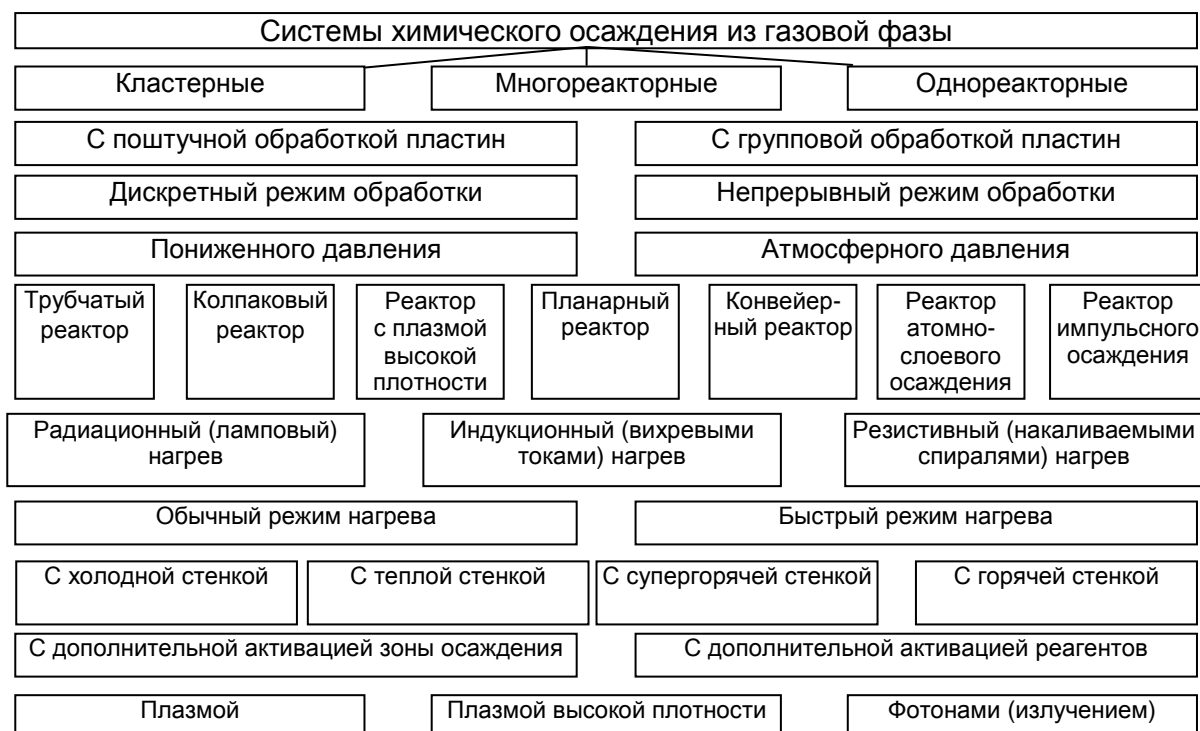


Рис. 2.17. Классификация промышленных систем ХОГФ

В 60-х и 70-х годах прошлого века первыми в производстве микросхем стали использоваться установки с трубчатыми реакторами (с горячей стенкой) ХОГФ атмосферного давления с групповой обработкой пластин, сконструированные на базе диффузионных печей, в которых системы подачи и распределения газов в реакционной зоне располагаются внутри трубы (см. рис. 2.18, а).

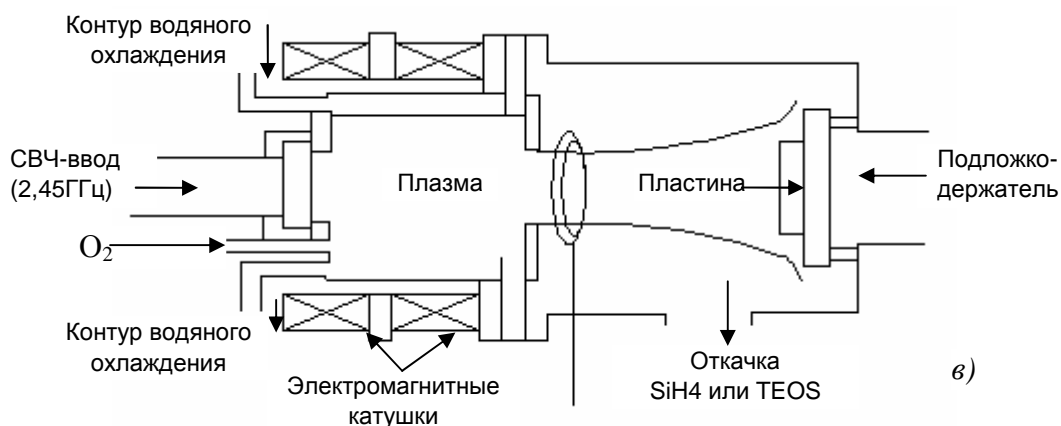
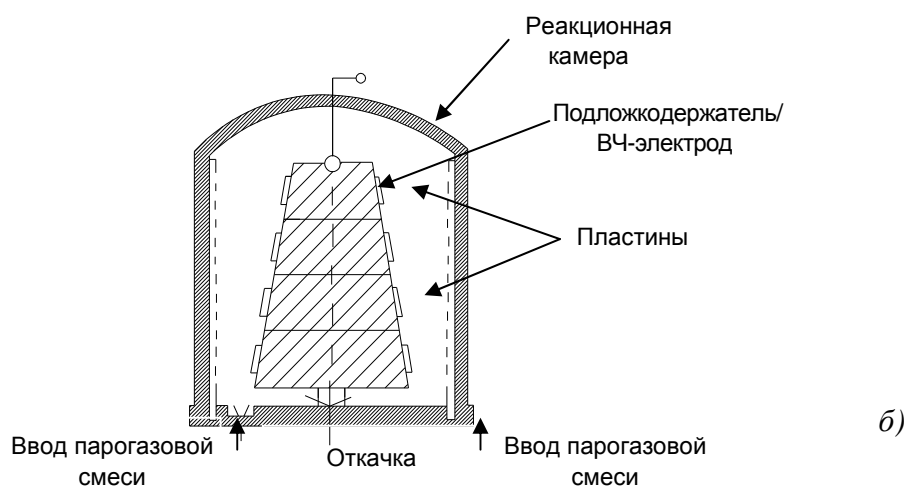
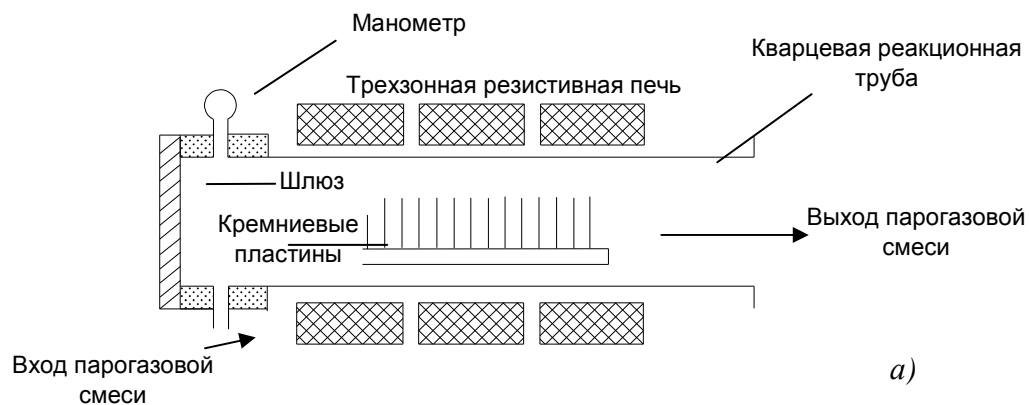


Рис. 2.18. Типичные конструкции систем ХОГФ: *а* – трубчатый реактор атмосферного давления с горячей стенкой и групповой обработкой пластин; *б* – реактор колпакового типа пониженного давления с холодной стенкой и групповой обработкой пластин с возможностью плазменной активации процессов осаждения и плазменной очистки внутренних поверхностей; *в* – планарный высоковакуумный реактор с холодной стенкой и индивидуальной обработкой пластин в плазме высокой плотностью с возможностью одновременного проведения процессов осаждения и травления, а также плазменной очистки внутренних поверхностей

Основным преимуществом этого оборудования, предназначенного для реализации высокотемпературных процессов ХОГФ ($T > 500$ °С), является температурная однородность при почти идеальных изотермических условиях. Это позволяет получать пленки указанных материалов с низкими механическими напряжениями и высокой адгезией.

Несмотря на низкие скорости осаждения и трудности обеспечения высокой равномерности толщины осаждаемых пленок по партии пластин, групповая обработка пластин и возможность монтажа нескольких одинаковых реакторов на одной установке обеспечивают приемлемую технологическую производительность такого оборудования.

Основным недостатком установок с такими реакторами является то, что осаждаемые на пластины пленки материалов также хорошо осаждаются и на горячие стенки реактора, формируя толстые осадки, которые могут отслаиваться и вызывать загрязнение пластин частицами. Это приводит к частым остановкам такого оборудования.

Второй вид оборудования ХОГФ разработан на базе реакторов колпакового типа пониженного давления с холодной стенкой и групповой обработкой пластин (см. рис. 2.18, б). Использование холодных стенок позволило значительно снизить осаждение пленок на их поверхность и повысить ресурс работы реактора до чистки. Пониженное давление обеспечило значительное увеличение скорости и равномерности осаждения пленок по партии пластин.

Середина 80-х и начало 90-х годов с точки зрения развития технологии производства ИМС характеризовались следующими факторами:

- увеличение диаметра обрабатываемых пластин до 200 мм;
- увеличение количества функциональных слоев изоляции и металлизации до пяти;
- повышение пленочной композитности (количества разных пленок, формирующих функциональный слой) слоев изоляции и металлизации до трех – четырех и необходимость их осаждения без ионно-плазменной очистки и переходных слоев;
- уменьшение размера критических (губительных) дефектов до 0,15 мкм и их плотности – до 0,3 деф. на см²;
- необходимость снижения термического (температурного) бюджета маршрута производства ИМС с многослойной алюминиевой металлизацией.

Указанные факторы привели к созданию новой серии оборудования ХОГФ для реализации низкотемпературных процессов осаждения при суб-

атмосферном и низком давлении с возможностью плазменной активации и очистки с компьютерным управлением и контролем режимов осаждения и очистки, а также работы устройств перемещения, ориентации и установки пластин.

В реакторе (см. рис. 2.18, в) в области над пластиной с помощью одной разрядной системы генерируется плазма высокой плотности, а с помощью другой разрядной системы подается напряжение смещения на подложкодержатель с обрабатываемой пластиной. При таких низких рабочих давлениях в реакторе контроль и стабилизация температуры пластины осуществляются с помощью ее электростатического прижима к подложкодержателю и подачи гелия под пластину.

Такой эффективный контроль температуры пластины в реакторе позволил вернуться к более простой химии на основе силана и кислорода для осаждения пленки в плазме высокой плотности. С помощью добавки аргона к смеси силана с кислородом и выбора напряжения смещения на подложкодержателе в реакторе осуществляются одновременно два процесса: осаждение пленки и ее ионное травление с суммарным превалированием процесса осаждения.

В настоящее время такой процесс используется в следующих функциональных узлах ИМС:

- в канавках монокремния при формировании щелевой изоляции;
- в канавочных конденсаторах при осаждении диэлектрика;
- в зазорах между затворными спейсерами при формировании первого слоя изоляции и т.д.

Первое десятилетие XXI века характеризуется введением в массовое производство ИМС с топологическими нормами 130 и 90 нм, которые ясно показывают необходимость:

- поддержания высокого совершенства транзисторов путем замены материала подзатворного диэлектрика, т.е. перехода от слоя термической двуокиси кремния к пленкам диэлектриков с более высокой диэлектрической постоянной и точными значениями толщины в диапазоне 2,0 – 10 нм;
- обеспечения высокого быстродействия путем замены алюминиевой металлизации на медную с барьерными слоями TaN и WN толщиной 20 – 40 нм, осаждаемых на рельеф диэлектрической поверхности, и замены межслойной изоляции на основе силикатного стекла на изоляцию из материалов с более низкой диэлектрической постоянной с тонкими защитными подслоями (толщиной 50 – 100 нм), осаждаемыми на рельеф металлической поверхности.

2.2. Толсто пленочная технология производства микросхем

2.2.1. Особенности технологии толсто пленочных структур

Понятия «тонко пленочная технология» и «толсто пленочная технология» характеризуют толщину пленок, а также способы их нанесения и применяемые материалы. Значительные успехи, достигнутые за последние годы в области материалов, технологии, конструирования и схемотехники, позволили повысить качество и расширить область применения толсто пленочных микросхем и гибридных микросборок от промышленной автоматики до бытовой аппаратуры. До недавнего времени при создании СВЧ-микросхем предпочтение отдавали тонко пленочным структурам. В настоящее время созданы микросхемы на толстых пленках, работающие в диапазоне частот 1 – 18 ГГц. Толсто пленочные ГИС выгодны при умеренно высоких мощностях рассеивания ($2,5 - 4,0 \text{ Вт/см}^2$), а также тогда, когда число резисторов велико, а число активных элементов сравнительно мало.

Рассмотрим преимущества толсто пленочной технологии по сравнению с тонко пленочной:

- трудоемкость толсто пленочной технологии в три раза ниже;
- толсто пленочная технология менее дорогостоящая, так как ниже стоимость производственных помещений, оборудования и материалов, меньше нерациональный расход материалов;
- высокий выход годных микросхем, достигающий 80 – 100 %;
- толсто пленочная технология технически более проста, не требует высококвалифицированных операторов;
- толсто пленочная технология менее чувствительна к загрязнениям окружающего воздуха, так как посторонние частицы выгорают при термообработке паст, а толщина пленок во много раз превышает размеры загрязняющих частиц;
- в толсто пленочной технологии возможны контроль и исправление брака после каждой операции;
- толсто пленочные элементы, обладая высокими техническими характеристиками и надежностью, могут работать в жестких условиях от минус 180 до плюс 300 °С при резком перепаде температур, что не выдерживают тонко пленочные элементы;
- относительно большая толщина пленок (обычно от 12 до 25 мкм) позволяет уменьшать вредные наводки и паразитные емкости, что очень важно для создания многоуровневой металлизации с высокой надежностью;
- толстые пленки выдерживают высокое рассеяние энергии и поэтому предпочтительнее тонких пленок при изготовлении мощных микросхем.

2.2.2. Пасты и подложки толсто пленочных микросхем

Пасты представляют собой тиксотронные (уменьшающие свою вязкость при увеличении давления) суспензии мелкодисперсных порошков функциональных материалов (металлов, оксидов металлов, солей) и стекла в органическом связующем. Таким образом, в состав паст входят функциональная, конструкционная и технологическая составляющие.

Функциональная составляющая придает пасте необходимые проводниковые, резистивные, диэлектрические свойства.

Для *проводниковых* паст в качестве функциональной основы используют серебро, палладий, золото, системы и сплавы на их основе. Проводящие пасты должны обеспечивать низкое электрическое сопротивление проводников, способность их к пайке, сопротивляемость к выщелачиванию при лужении. Они содержат порошок благородных металлов (серебро, смесь серебро – палладий, золото), который составляет 70 – 80 % от общей массы твердой фазы пасты. Палладий вводят для уменьшения коррозии, миграции и стоимости пасты. Также применяют неблагородные металлы – медь, никель, алюминий, молибден. Они обеспечивают не только меньшую стоимость паст, но и в ряде случаев – лучшие параметры и стабильность при высоких температурах. Медь, например, является единственным металлом с высокой электропроводностью, к которому можно подсоединять внешние выводы, как сваркой, так и пайкой. Кроме того, медь имеет хорошую адгезию к алюмокерамическим подложкам, высокие теплопроводность, стойкость к выщелачиванию, радиации и хорошие свойства в диапазоне СВЧ.

При изготовлении многослойных плат проводящий слой формируют с добавками тугоплавких металлов, например, марганец – молибден, т.к. температура обжига пакета плат достаточно высока. Типичный состав проводящей пасты: 12 % Pd + 75 % Au + 13 % стекло. Этот состав хорошо паяется и имеет удовлетворительную адгезию. Температура обжига паст не должна превышать температуру плавления соответствующих сплавов.

В *резистивных* пастах количество функционального материала задается требуемым удельным сопротивлением и поэтому варьируется в широких пределах: единицы – десятки процентов от общего количества твердой фазы. В них есть и металлические, и диэлектрические составляющие. Проводящим элементом пасты являются палладий, серебро, вольфрам, карбид вольфрама, рутений, а диэлектрические составляющие – оксиды металлов и стекла. Широкое применение нашли следующие резистивные пасты: серебряно-палладиевая, на основе оксида рутения; рутенаты свинца и висму-

та; оксиды таллия, кадмия, индия. Серебро в эти пасты добавляют для оптимизации температурного коэффициента сопротивления, дрейфа сопротивления и шумовых характеристик. Пасты на основе соединения рутения становятся преобладающими в толсто пленочной технологии, т.к. растворы на их основе обладают высокой стабильностью сопротивления и малочувствительны к температурным колебаниям.

Перспективным материалом резистивных паст являются полимерные резистивные пасты на основе лака. Проводящий наполнитель – углерод в виде коллоидно-графитового порошка. Из лака и порошка углерода изготавливают лакосажевую суспензию, которую наносят на подложку методом трафаретной печати. После нанесения пасту полимеризуют. При этом не нужны громоздкие печи, т.к. снижается температура отжига пасты. Однако температурный коэффициент сопротивления таких соединений весьма высок.

Диэлектрические пасты применяют:

- в качестве герметизирующего покрытия;
- как изолирующие слои в многослойных структурах;
- как диэлектрические слои.

Если паста используется как диэлектрический слой, то она должна обладать низкой диэлектрической проницаемостью (5 – 10) и высоким электрическим сопротивлением. Примеры диэлектрических паст – органический компаунд (полиуретан) или неорганическая композиция – легкоплавкие стекла.

Пасты для конденсаторов подбирают таким образом, чтобы они имели высокое значение диэлектрической проницаемости (15 – 500), высокое напряжение пробоя U_{np} , незначительный тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ при получении приемлемых габаритных размеров пленочных конденсаторов. Диэлектрические пасты для конденсаторов в качестве функциональной составляющей содержат порошки сегнетоэлектриков, например, титаната бария BaTiO_3 , оксида иттрия Y_2O_3 . Наиболее часто применяется паста на основе титаната бария марки ПК-1000-30.

Ее характеристики:

вязкость, Па·см	$(2...3) \cdot 10^5$
температура обжига, °С	600 – 650
удельная емкость, 10^3 пФ/см ²	3,7 – 7,0
$\text{tg } \delta$ (при $f = 10^3$ кГц)	0,035
ТКЕ, °С ⁻¹	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$
толщина слоя, мкм	25 – 30

После обжига диэлектрические пасты не должны иметь пузырьков, раковин в слое, так как это может привести к образованию проколов и трещин. Температурные коэффициенты линейного расширения материала диэлектрического слоя и соприкасающихся с ним слоев не должны сильно различаться, иначе могут возникнуть трещины.

Пасты для межслойной изоляции и защиты изготавливают на основе стекол, ситаллоцементов.

Основными технологическими параметрами в производстве толсто- пленочных конденсаторов и резисторов являются химический, гранулометрический состав паст и режимы их вжигания.

Припойные пасты заменяют таблетки припоя и применяются для монтажа активных элементов с жесткими выводами на подложки ГИС и для герметизации металлических корпусов.

Конструкционная составляющая пасты обеспечивает равномерное распределение функциональных частиц и адгезию пленки к подложке, в процессе формирования пленки она не удаляется и остается в готовом элементе. Стекло в виде частичек размером 1 – 3 мкм в процессе вжигания расплавляется и при последующем затвердевании формирует монолитную конструкцию элемента с равномерно распределенными в ней частицами функционального материала и одновременно создает прочное соединение элемента с подложкой. Обычно используют легкоплавкие стекла, содержащие окислы бора (свинцовоборосиликатные стекла), кремния, свинца, висмута, кадмия и олова. Стекла размалываются на шариковых мельницах до размеров, не препятствующих прохождению пасты через трафарет.

Технологическая составляющая – это временные органические связующие и растворители, которые вводятся для обеспечения равномерного распределения компонентов в процессе приготовления пасты, для получения определенной консистенции и придания пасте оптимальной вязкости. После нанесения пасты на подложку они полностью удаляются в процессе термообработки. При неполном удалении органических связующих в слое диэлектрика, например, углерода резко повышается электропроводность.

Подложки, применяемые для толстопленочных ГИС, должны обладать:

- хорошими диэлектрическими свойствами (диэлектрическая проницаемость должна быть минимальной);
- высокой теплопроводностью;
- высокой механической прочностью;
- химической стойкостью к материалам наносимых слоев;

- близкими по значению ТКЛР подложки и слоев;
- хорошей адгезией к наносимым слоям;
- минимальной шероховатостью (0,3 – 0,6 мкм).

Для материала подложек применяют:

- глиноземистую керамику;
- оксид алюминия (95 % Al_2O_3);
- электрокорунд (99 % Al_2O_3);
- титанаты.

Чаще всего применяется керамика 22 ХС. Состав 22 ХС: MnO (39,7 %) + TiO_2 (37,1 %) + Al_2O_3 (14,3 %) + SiO_2 (8,9 %). Для схем, работающих при повышенных мощностях, применяют бериллиевую керамику. Она имеет на порядок высшую теплопроводность, чем алюмооксидная керамика, но является токсичным и дорогим материалом.

Для повышения плотности монтажа находят применение многослойные керамические подложки. Такая подложка имеет несколько проводящих слоев на различных уровнях. Отдельные пластины складываются друг с другом, прессуются и спекаются ($T = 1650^\circ\text{C}$). Для создания гладкой поверхности пластина покрывается глазурью, сформированной на основе оксида висмута и свинцовоборосиликатного стекла. Такие многослойные подложки пригодны для использования в тонко- и толсто пленочных технологиях.

2.2.3. Типовой маршрут изготовления толсто пленочных структур

Основу толсто пленочной технологии составляет трафаретная печать, число повторений которой в процессе изготовления микросхемы (рис. 2.19) соответствует количеству технологических слоев.

Рассмотрим основные этапы изготовления пассивной части толсто пленочной микросхемы.

При очистке подложек сильные кислоты и щелочи не применяются, чтобы не вытравливать материал подложки. Чаще всего используют ультразвуковую очистку в водной среде, промывку в деионизованной воде и сушку.

Изготовление паст включает изготовление компонентов и получение их гомогенных смесей. Обычно изготовители микросхем получают готовые пасты с других предприятий.

Изготовление компонентов заключается в получении мелкодисперсных порошков составляющих и стекла определенного гранулометрического состава. Мелкодисперсные порошки серебра и палладия получают химическим восстановлением из соответствующих растворов при повышен-

ных температурах. Полученное восстановлением серебро или палладий тщательно промывают дистиллированной водой. Сверхтонкие порошки металлов для резистивных паст могут быть получены с помощью электролиза растворов так, чтобы катодный осадок получался очень пористым.

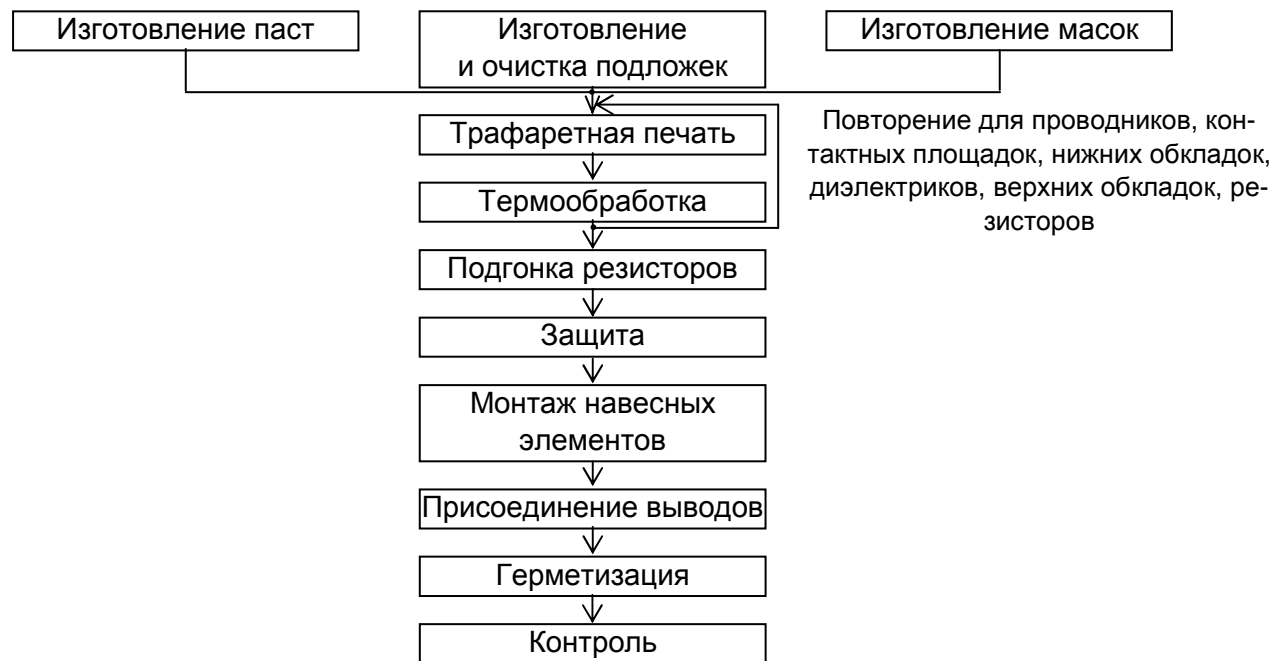


Рис. 2.19. Схема изготовления толсто пленочных микросхем

Стекло входит в состав паст также в виде мелкодисперсного порошка. После варки стекла производят фриттование – расплавленное стекло выливают в воду для растрескивания или распыляют сжатым воздухом. Затем производят помол в вибромельницах. Процесс можно интенсифицировать путем добавления жидкости, хорошо смачивающей частицы, подвергающиеся помолу. Жидкость, проникая в микротрещины частиц, оказывает расклинивающее действие и способствует получению более мелких частиц. Помол применяется также для получения мелкодисперсных порошков керамических наполнителей для диэлектрических паст.

После сушки порошок просеивают, упаковывают в тару и передают на операцию получения гомогенных смесей.

Приготовление гомогенных смесей микропорошков компонентов стекла и органических связующих выполняется их перемешиванием на специальной пастотерке. При перемешивании необходимо обеспечивать местный отсос воздуха и избегать высоких скоростей, так как возможно внедрение в пасту воздуха.

После перемешивания производится контроль вязкости пасты. Готовые пасты упаковываются в плотно закрывающуюся тару. По мере употребления и при хранении растворители испаряются, поэтому необходимо корректировать вязкость паст добавлением растворителей и дополнительным перемешиванием.

Нанесение паст проводят в определенной последовательности, т.к. у них температура обжига различна. Сначала наносят проводящую пасту (проводники, контактные площадки и нижние обкладки конденсаторов), затем – диэлектрик конденсаторов и изоляцию пересечения проводников. После этого наносятся верхние обкладки конденсаторов и пересекающиеся проводники. Последним наносится резистивный слой, имеющий минимальную температуру нанесения, т.к. повторный нагрев значительно изменяет сопротивление резистора. При этом должна учитываться способность паст выдерживать повторные нагревы без растекания.

Трафаретная печать осуществляется на специальных печатных автоматах или полуавтоматах продавливанием пасты через отверстия сетчатого трафарета. Трафарет представляет собой алюминиевую рамку, на которую натягивается сетка из нейлона или нержавеющей стали. На натянутую сетку наносится слой фоточувствительной эмульсии. Методом фотолитографии формируют необходимый рисунок. После проявления образуются окна в эмульсионном слое, обнажающие сетку, через которые при нанесении будет продавливаться паста.

В мелкосерийном производстве трафареты могут быть изготовлены на основе пигментной бумаги, в крупносерийном производстве применяют трафареты на основе сухих пленочных фоторезистов или биметаллические фольговые трафареты, в которых сетка получена методом травления.

Очищенная подложка закрепляется с помощью механического держателя или вакуумного прижима, сверху помещают держатель с требуемым трафаретом. На него подают соответствующую пасту и с помощью ракеля наносят ее на подложку. Перемещаясь по поверхности маски, ракель гонит впереди себя волну пасты и одновременно надавливает на маску. Маска прогибается и касается подложки. Под действием возникающего гидромеханического давления паста заполняет отверстия сетки в местах касания с подложкой и продавливается. По мере ухода ракеля маска выпрямляется, оставляя на подложке рисунок, нанесенный пастой. Лезвие ракеля изготавливают из прочных и упругих материалов, стойких к воздействию органических растворителей. Рабочую часть ракеля изготавливают из фторкаучука или полиуретана. Угол ракеля при вершине составляет 90° или 60° (рис. 2.20). Держатель ракеля применяют для обеспечения постоянства давления ракеля на трафарет.

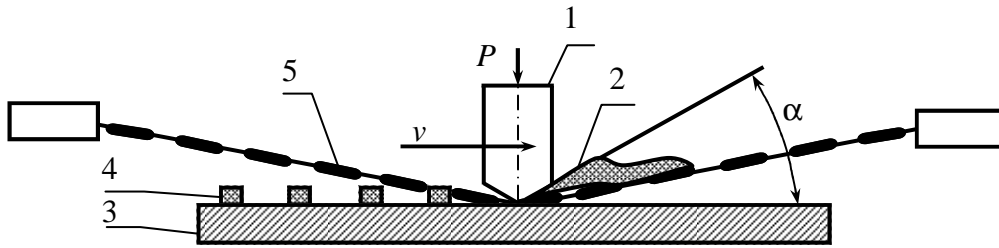


Рис. 2.20. Схема процесса бесконтактной трафаретной печати: 1 – ракец; 2 – паста; 3 – подложка; 4 – отпечаток пасты; 5 – маска; v – скорость движения ракеца; α – угол встречи ракеца с поверхностью подложки; P – давление

Скорость перемещения, давление ракеца, угол его наклона и плотность прилегания к поверхности трафарета влияют на толщину, профиль, четкость и воспроизводимость печатных рисунков.

Характер зависимости толщины и ширины линий в процессах сеткографии очень сложен (рис. 2.21) и определяется видом пасты, конструкцией сетки и параметрами техпроцесса. Изменение толщины может происходить, если сетка вдавливается в подложку.

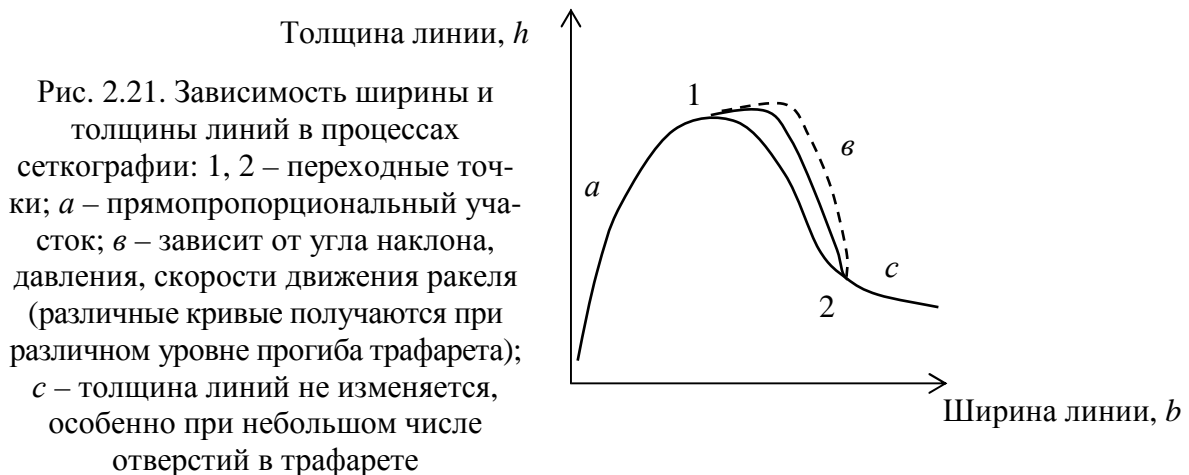


Рис. 2.21. Зависимость ширины и толщины линий в процессах сеткографии: 1, 2 – переходные точки; a – прямопропорциональный участок; b – зависит от угла наклона, давления, скорости движения ракеца (различные кривые получаются при различном уровне прогиба трафарета); c – толщина линий не изменяется, особенно при небольшом числе отверстий в трафарете

Распределение пасты между поверхностями трафарета и подложки зависит от степени их смачиваемости пастой и шероховатости поверхности подложки. Вязкость пасты должна иметь такое значение, чтобы, с одной стороны, паста оказывала сопротивление проталкиванию между маской и подложкой в процессе печати, а с другой – затекала под воздействием силы тяжести на края первоначально полученного изображения. Перенос пасты, определяемый толщиной элементов микросхемы, обычно возрастает:

- при большем давлении;
- при меньшем угле наклона ракеца;
- при большем объеме пасты перед ракецом;
- при меньшей скорости его движения.

Следует отметить, что размеры маски приблизительно в четыре раза превосходят размеры подложки. Поэтому в процессе нанесения пасты рабочая часть ракеля не доходит до краев маски. Этим обеспечивается обратимая деформация и равномерный прогиб маски в процессе нанесения паст. Необходимым условием получения качественного отпечатка с четким краем рисунка является использование паст с хорошими тиксотропными свойствами.

После нанесения на подложку паста подсушивается при температуре 100 – 200 °С, в результате чего удаляются летучие составляющие – органические растворители. Наибольший эффект достигается при использовании инфракрасной сушки. Инфракрасные лучи проникают вглубь слоя пасты и сушат его равномерно без образования затрудняющей сушку поверхностной корочки. Вжигание пасты производится в конвейерных печах (рис. 2.22) при температурах, зависящих от состава пасты и составляющих обычно 600 – 1800 °С.

Подложки, размещенные на конвейерной ленте, поступают в муфель печи. Навстречу движению подложек печь продувают сухим воздухом под давлением. Воздух с выделившимися при термообработке газами выходит через отверстие в муфеле в вытяжную вентиляционную систему. Для предотвращения попадания внутрь муфеля воздуха из производственного помещения у входа печи с помощью вентилятора устанавливается воздушная завеса. При обжиге органическая связка пасты выгорает, а стеклянный порошок плавится, смачивает частицы пасты и при охлаждении обеспечивает сцепление их между собой и с подложкой. Температура во время вжигания поддерживается с точностью ± 2 °С. Скорость движения конвейера составляет 25 – 250 мм/мин с точностью 1 %.

Процесс I (см. рис. 2.22) должен протекать с умеренной скоростью, т.к. при большой скорости происходит разрушение пленки – пузырение, отслаивание композиции от подложки и т.д.

При медленном выгорании в композиции может удерживаться углерод до вступления детали в горячую зону, где плавится стекло и возникают побочные реакции. Присутствие углерода приводит к появлению пузырчатости стекла или восстановлению некоторых оксидов композиции. Для отвода продуктов выгорания применяется вытяжка. Наиболее ответственной является зона максимального нагрева II, особенно для резистивных паст. Ее протяженность и точность поддержания температуры определяют разброс сопротивления резисторов. В идеальной печи вершина должна быть плоской.

В зоне охлаждения отсутствуют нагревательные элементы. Продолжительность зоны охлаждения III должна обеспечить оптимальную скорость остывания подложек для предотвращения образования трещин в пленке.

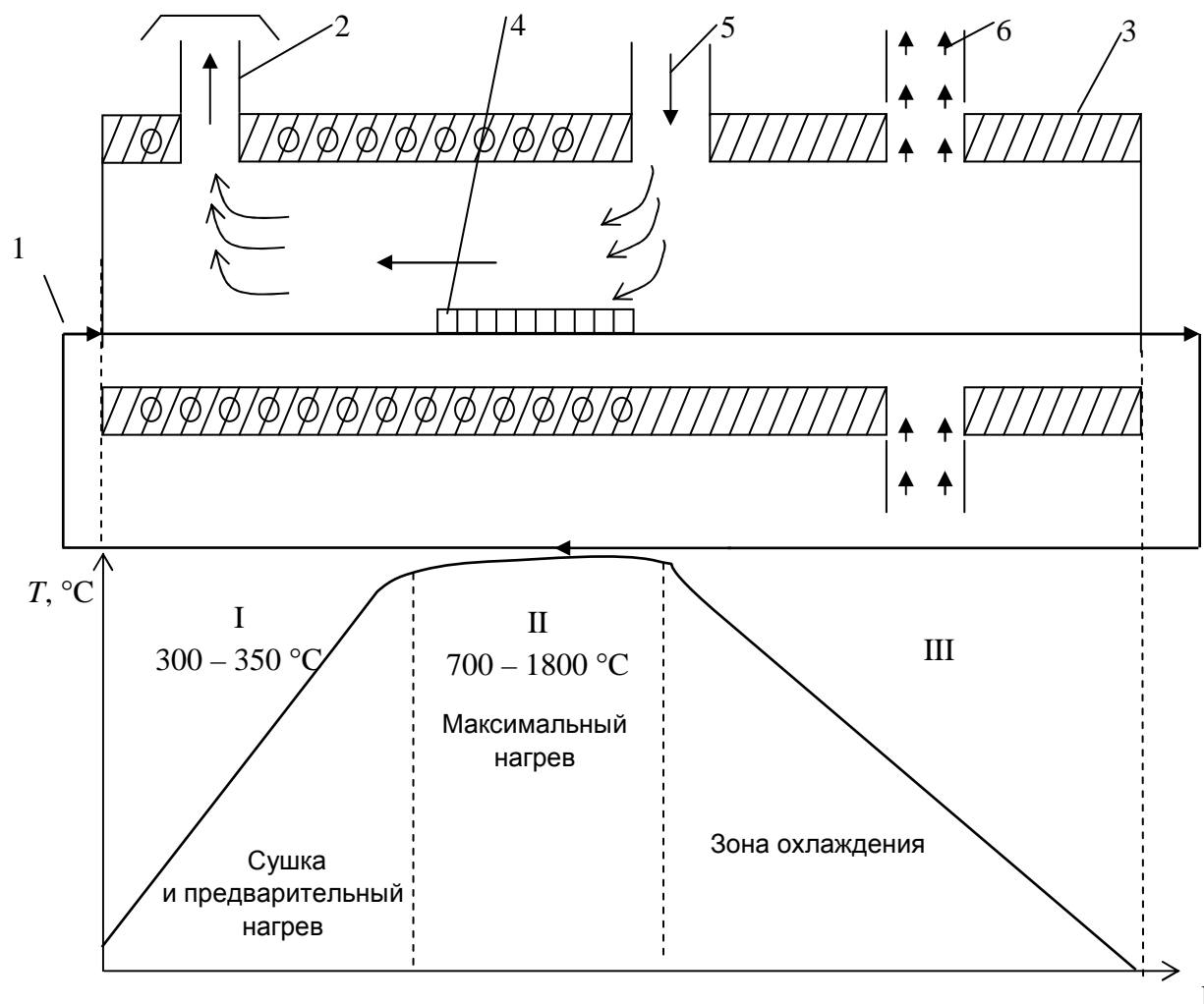


Рис. 2.22. Схема конвейерной печи для вжигания паст:

1 – лента конвейера; 2 – отток выходящих газов; 3 – корпус печи с нагревателем; 4 – кассета с подложками толсто пленочных ГИС; 5 – введение газов для создания рабочей атмосферы вжигания; 6 – воздушное охлаждение

Температура вжигания по-разному влияет на пасты разного состава. При этом сопротивление паст может повышаться или понижаться. Максимальная температура вжигания указывается в паспорте на каждую пасту. Рассмотрим режимы термообработки в процессе вжигания различных паст (рис. 2.23).

Скорость движения образцов в печи также влияет на электрофизические параметры слоев. При увеличении скорости (при условии постоянства температуры в печи) сопротивление слоев уменьшается.

Подгонка резисторов и конденсаторов толстопленочных структур принципиально не отличается от тонкопленочных. Резисторы подгоняют, удаляя часть их материала или изменяя его структуру, при этом сопротивление возрастает или уменьшается. Подгонка конденсаторов состоит в удалении части верхней обкладки, что приводит к уменьшению емкости.

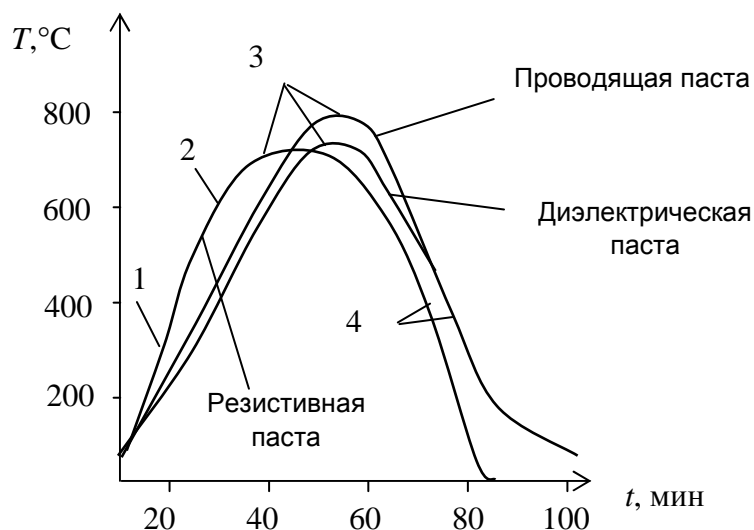


Рис. 2.23. Режимы термообработки:
 1 – сушка;
 2 – выжигание органической связи;
 3 – спекание;
 4 – охлаждение

Для присоединения навесных компонентов необходимо облуживание контактных площадок. При этом может происходить «припойное выщелачивание», в результате которого материал проводников теряет серебро. Это влияет на электропроводность и паяемость проводников. Для уменьшения выщелачивания в состав припоя необходимо вводить дополнительное серебро.

Армирование платы ГИС – это присоединение к облуженным контактным площадкам гребенки внешних выводов. При лужении проводников сопротивление резисторов может изменяться на 1 – 2 %. Поэтому точную подгонку прецизионных резисторов необходимо проводить после лужения.

Для защиты толстопленочных элементов от влаги и окружающей среды применяют глазуревые покрытия, которые наносят методом трафаретной печати. Наиболее широко применяют низкотемпературные стекла с большим содержанием свинца. Для увеличения стойкости глазури к химическим воздействиям в состав стекла добавляют тугоплавкие соединения. Регулирование ТКЛР стекла осуществляется введением оксида циркония. Процесс термообработки защитного покрытия проводят при температурах не более 500 °С. При более высоких температурах наблюдается изменение параметров резисторов. Правильно отожженные защитные пленки полупрозрачны и имеют матовую поверхность. Для удобства сборки различные структуры защищают пастами разного цвета.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Как классифицируют основные методы получения тонких пленок по способу генерации потока частиц в вакууме?
2. Какие требования необходимо учитывать при выборе метода получения тонких пленок?
3. Классифицируйте степени вакуума. Как влияет степень вакуума на процесс нанесения тонких пленок?
4. Приведите требования, предъявляемые к подложкам тонкопленочных ГИС.
5. Приведите типичные параметры подложек тонкопленочных ГИС.
6. Укажите материалы и требования к трафаретам, используемым в тонкопленочной технологии.
7. Укажите этапы, свойственные процессу термовакuumного напыления.
8. Что такое возгонка?
9. Что такое критическая температура конденсации? От каких факторов она зависит?
10. Что такое критическая плотность атомарного потока?
11. Охарактеризуйте процесс образования и роста зародышей на поверхности подложки.
12. Почему при термовакuumном напылении получаемые пленки имеют толщину до 1 мкм?
13. Приведите схему установки термовакuumного напыления. Охарактеризуйте процесс.
14. Какая температура испарения при термовакuumном напылении считается условной?
15. Приведите зависимости, позволяющие определить скорость процесса термовакuumного напыления.
16. Приведите достоинства, недостатки и области применения процесса термовакuumного напыления.
17. Приведите достоинства и недостатки резистивного нагрева веществ при термовакuumном напылении.
18. Какие требования необходимо соблюдать при выборе материала испарителя при термовакuumном напылении. Укажите основные применяемые для этих целей материалы.
19. Охарактеризуйте испарители с непосредственным нагревом. Опишите область их применения.
20. Приведите конструкцию испарителя с резистивным непосредственным нагревом.

21. Классифицируйте формы и области применения испарителей с косвенным нагревом.
22. Приведите достоинства и недостатки проволочных испарителей.
23. Укажите области применения, материалы и характерные особенности ленточных испарителей.
24. Поясните особенности лабиринтных и коробочных испарителей.
25. В чем сущность метода микродозирования при проведении процесса испарения веществ? Проиллюстрируйте ответ.
26. Приведите особенности и области применения тигельных испарителей.
27. Охарактеризуйте кинетику процесса распыления веществ ионной бомбардировкой.
28. Приведите схему процесса, технологические режимы и особенности получения пленок физическим катодным распылением.
29. Поясните преимущества и недостатки физического катодного распыления.
30. Приведите основное отличие реактивного катодного распыления от физического катодного распыления.
31. Приведите схему и особенности процесса ионно-плазменного распыления.
32. Поясните основные недостатки ионно-плазменного распыления.
33. Поясните области применения и достоинства метода магнетронного распыления.
34. Приведите принцип действия и схему магнетронно-распылительной системы с плоской мишенью.
35. Укажите типичные параметры магнетронно-распылительной системы с плоской мишенью.
36. Приведите конструкцию коаксиальной и планетарной магнетронной систем. Опишите их достоинства и недостатки.
37. В чем сходства и отличия электрохимического осаждения и ионно-плазменного напыления?
38. Приведите схему установки, применяемой для химического осаждения пленок из растворов.
39. Поясните основное преимущество и недостатки электрохимического осаждения перед напылением.
40. Охарактеризуйте процесс анодирования.
41. Поясните преимущества алюминия как основного материала межэлементных соединений в микросхемах.
42. Как выбрать параметры вжигания алюминия при его использовании в качестве материала межсоединений и контактов в полупроводниковых микросхемах?

43. Какие недостатки проявляются при использовании алюминия в микроэлектронных изделиях?
44. Поясните отличия физического и химического осаждения из газовой фазы.
45. Приведите классификацию процессов химического осаждения из газовой фазы.
46. Какие существуют методы активации процессов химического осаждения из газовой фазы?
47. Укажите способы подачи реагентов в рабочий реактор при химическом осаждении из газовой фазы.
48. Какие материалы пригодны для получения методами химического осаждения из газовой фазы?
49. Охарактеризуйте состав и параметры оборудования для химического осаждения из газовой фазы.
50. Какие виды реакторов применяются в системах химического осаждения из газовой фазы?
51. Приведите достоинства и недостатки систем химического осаждения из газовой фазы с трубчатыми реакторами.
52. Укажите направления, по которым развивается производство ИМС с топологическими нормами 130 и 90 нм.
53. Поясните основные преимущества толсто пленочной технологии изготовления микросхем по сравнению с тонко пленочной.
54. Что представляют собой пасты толсто пленочных микросхем? Какие составляющие входят в ее состав?
55. Перечислите материалы, применяемые в качестве функциональной основы проводящих паст.
56. Какие основные требования предъявляются к проводящим пастам?
57. Укажите типичный состав проводящей пасты.
58. Перечислите материалы, применяемые в качестве функциональной основы резистивных паст.
59. Для каких целей в резистивные пасты добавляют серебро?
60. Приведите основные преимущества, которые обеспечиваются применением рутения в резистивных пастах.
61. Какие основные требования предъявляются к диэлектрическим пастам, применяемым в качестве диэлектриков конденсаторов толсто пленочных ГИС?
62. В чем состоит основное назначение припойных паст в производстве толсто пленочных ГИС?

63. Укажите основное назначение и особенности конструкционной составляющей пасты в толсто пленочных ГИС. Какие материалы применяются для этих целей?

64. Укажите основное назначение и особенности технологической составляющей пасты в толсто пленочных ГИС.

65. Поясните требования, предъявляемые к подложкам в толсто пленочной технологии.

66. Из каких материалов изготавливают подложки толсто пленочных ГИС?

67. Приведите типичный состав керамики 22 ХС.

68. Охарактеризуйте процесс формирования многослойной керамической подложки, пригодной для использования как в тонко-, так и в толсто пленочных ГИС.

69. Приведите схему изготовления толсто пленочных микросхем.

70. Поясните особенности процесса очистки подложек, применяемых для изготовления толсто пленочных ГИС.

71. Что такое фриттование стекла при изготовлении компонентов толсто пленочных микросхем?

72. В какой последовательности наносятся пасты при формировании толсто пленочных микросхем? Ответ пояснить соответствующими примерами.

73. Приведите назначение и устройство трафаретов, применяемых при трафаретной печати.

74. Приведите схему процесса бесконтактной трафаретной печати. Поясните особенности этого процесса

75. Какие факторы влияют на толщину, профиль, четкость и воспроизводимость печатных рисунков в методе бесконтактной трафаретной печати?

76. Какие требования предъявляются к выбору вязкости паст, применяемых в толсто пленочной технологии производства ГИС?

77. Для чего пасту после нанесения на подложку следует подсушить?

78. Приведите схему конвейерной печи для вжигания паст. Охарактеризуйте особенности процессов нагрева и охлаждения.

79. Что такое «припойное выщелачивание» пасты? Какие методы борьбы с ним применяют?

80. Что такое армирование платы ГИС?

81. Какие покрытия применяют для защиты толсто пленочных элементов от влаги и окружающей среды? Охарактеризуйте методы их нанесения.

ГЛАВА 3. СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ

3.1. Разделение пластин и подложек

Сборочные операции микросхем являются операциями индивидуальной обработки в отличие от групповых операций технологического процесса по изготовлению кристалла полупроводниковой или платы (модуля) гибридно-пленочной микросхемы.

Основные сборочные операции при изготовлении микросхем, микропроцессоров и микросборок:

- разделение пластин и подложек на кристаллы и модули;
- установка навесных активных элементов на плату ГИС и крепление кристаллов и плат к корпусам микросхем;
- контактирование – создание внутренних и внешних выводов;
- герметизация микросхем;
- контроль электрических параметров и проведение испытаний;
- заключительные операции сборки ИМС – окраска, лакировка, маркировка, лужение выводов.

Сборочные операции представляют значительные трудности для полной автоматизации технологического процесса изготовления микроэлектронных изделий. Однако в последние годы разработан целый ряд автоматов и полуавтоматов с программаторами, которые позволяют в значительной степени автоматизировать трудоемкий процесс сборки ИМС. Процесс автоматизации сборки ИМС значительно облегчается, если использовать гибкие носители (например, на полиимидной пленке), групповую пайку и «шариковые» (столбиковые) выводы в ИМС.

Перед операцией разделения пластин на кристаллы (или подложек на модули) производится зондовый контроль микросхем с отбраковкой на автоматах и полуавтоматах (типа ЭМ-627 и ЭМ-630). В этих установках используются вычислительные управляющие комплексы, позволяющие перемещать пластину с определенным шагом под зондами, производить контроль электрических параметров по заданным тестам, производить пометку (краской) негодных кристаллов для последующей отбраковки. После разбраковки пластины поступают на операцию разделения на единичные структуры (кристаллы или платы). Важным для последующей сборки является сохранение после разделения ориентации, т.е. взаимного расположения кристаллов, плат. В наибольшей степени это относится к полупроводниковым пластинам. Именно поэтому пластины помещают на липкие

эластичные ленты и разделяют не на всю толщину, а скрайбированием наносят риски, механически ослабляющие материал.

Термин «скрайбирование» произошел от английского слова *scribe* – царапать. Скрайбирование осуществляется механическими, лазерными и электронно-лучевыми методами. Наибольшее распространение получили методы скрайбирования алмазным резцом и лазерным лучом. Алмазным скрайбером на пластины наносят риски (шириной 20 – 40 мкм, глубиной 10 – 15 мкм) со стороны структур в двух взаимно перпендикулярных направлениях по границам между отдельными ИМС (рис. 3.1).

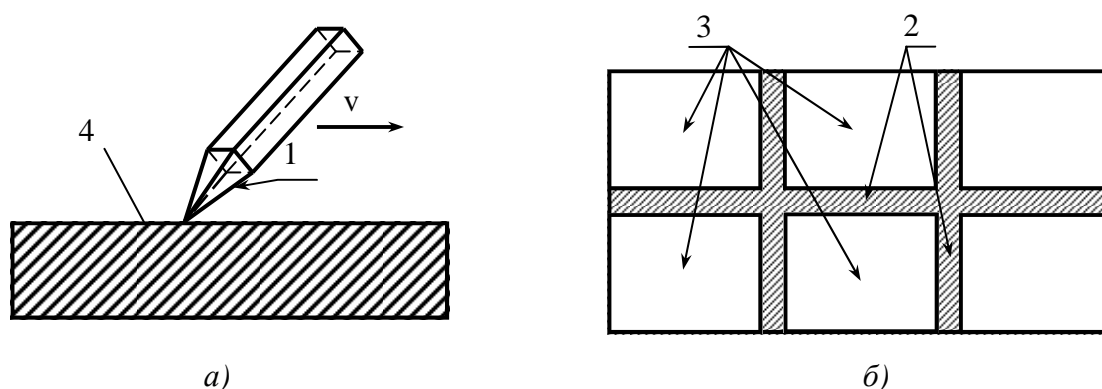


Рис. 3.1. Скрайбирование алмазным резцом: а – нанесение рисок; б – подложка с рисками; 1 – режущая грань резца; 2 – линии реза; 3 – отдельные платы; 4 – подложка

Для скрайбирования используются установки типа «Алмаз-М». Основной недостаток скрайбирования – неровный (рваный) край реза, который приводит при ломке к сколам и другим дефектам этого метода разделения. Преимущества метода механического скрайбирования:

- малая ширина риски, что позволяет более эффективно использовать площадь пластины полупроводникового материала;
- достаточно высокая производительность (более десяти пластин диаметром 76 мм в час);
- возможность быстрой переналадки оборудования.

Разделение с помощью лазерного излучения относится к бесконтактному способу, при котором отсутствует механическое воздействие на обрабатываемый материал. Разделение можно выполнить либо с предварительным получением рисок (лазерное скрайбирование), либо путем сквозного прохода всей толщи материала (лазерная резка). Образование рисок происходит в результате испарения материала сфокусированным лазерным лучом большой мощности. При сквозной резке имеет место также и плавление.

Благодаря большой глубине рисок (50 – 100 мкм) повышается процент выхода годных после разламывания. Оплавление материала по краям риски уменьшает вероятность отслаивания пленочных покрытий. Кристаллографическая ориентация не оказывает влияния на качество разделения и форму кристаллов. Получаемые кристаллы имеют практически вертикальные боковые поверхности, что весьма облегчает автоматическую сборку. С помощью лазерного луча можно производить резку сквозь слой оксида и металла. Лазерное скрайбирование успешно применяют также для разделения керамических подложек. Благодаря отсутствию механического воздействия в скрайбируемых материалах нет микросколов и микротрещин.

Размеры риски определяются диаметром лазерного луча, скоростью перемещения пластины или подложки относительно лазерного луча, мощностью, частотой и длительностью импульсов излучения. Обычно ширина риска 25 – 40 мкм, зона оплавления по периферии кристалла – около 10 мкм. Качество резки кристаллов остается высоким до толщин кремниевых пластин (400 – 450 мкм). При больших толщинах разламывание затрудняется, появляются сколы, трещины. Возможно раскалывание не по риске.

Арсенид галлия нельзя скрайбировать лазерным лучом из-за выделения токсичных соединений мышьяка.

К недостаткам лазерного разделения относятся:

- высокая стоимость и сложность оборудования;
- необходимость защиты поверхности специальной пленкой от загрязнений продуктами испарения и расплавления;
- возникновение зоны со структурными нарушениями кремния;
- сложность разделения толстых пластин диаметром более 100 мм.

После скрайбирования осуществляется ломка пластин на кристаллы (подложек на модули). Разламывание производят с помощью валика на толстом пружинящем основании – резине. При ломке валиком пластину помещают рисками вниз на гибкую (резиновую) основу и прокатывают по ней стальным или резиновым валиком (катком) в двух направлениях, параллельных линиям реза (рис. 3.2). Направление движения валика должно точно совпадать с направлением рисок. Пластины или подложку сначала разделяют на полосы, затем при повороте на 90° – на кристаллы или платы. При ручном разламывании валиком качество выполнения операции зависит от искусства оператора. При движении валика не вдоль рисок или при неблагоприятном распределении механической нагрузки возможно разламывание не по рискам, а также сколы и ломка кристаллов.

Указанных недостатков лишен способ разламывания пластин с помощью гибкой ленты. На обратную сторону пластины наносят быстро высыхающую эмульсию, которая, образуя пленку, удерживает кристаллы после ломки. Пластины размещают на стальной пружинной ленте и прижимают резиновой лентой. Совместно передвигаясь (пружинной лентой вниз), система приобретает определенный радиус кривизны. В этом месте и происходит ломка пластин на кристаллы.

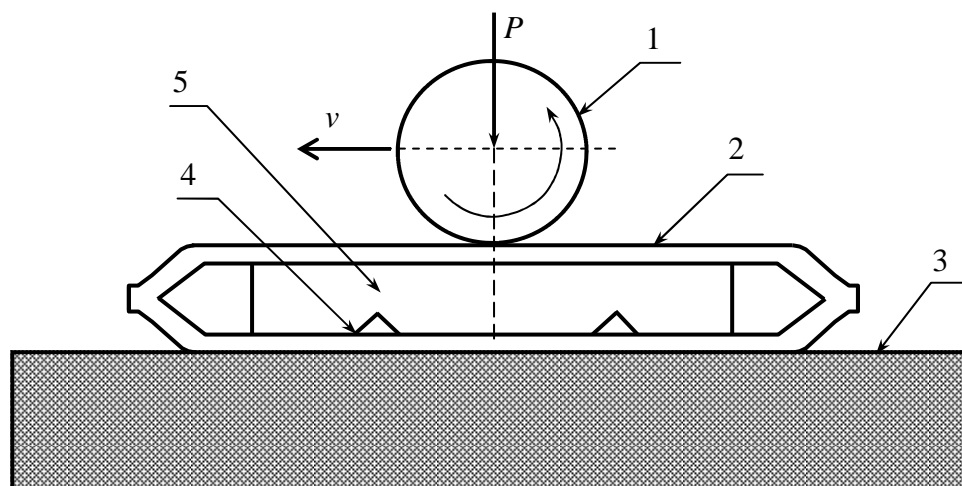


Рис. 3.2. Разделение скрайбированных пластин с помощью подпружиненного ролика:
1 – ролик; 2 – пленка полиэтилена; 3 – опора; 4 – линия разделения; 5 – пластина

Однако наиболее производительной является ломка на стальной полусфере (рис. 3.3). Пластина с кристаллами, обязательно квадратной формы и определенного размера, размещается на полусфере соответствующего диаметра и прижимается к ней гибкой резиновой мембраной (например, путем откачки воздуха из зазора сфера – мембрана). Разламывание происходит одновременно по всем рискам в результате обжатия пластины по сферической поверхности с помощью хорошо растягивающейся эластичной мембраны. Давление от мембраны на разделяемую пластину передается гидравлическим способом или сжатым воздухом. Но этот метод обладает существенным недостатком: для каждого типоразмера кристалла требуется полусфера только определенного диаметра.

Для толстых (более 400 мкм) пластин полупроводниковых материалов при разделении используются специальные способы резки, например, алмазным диском или ультразвуковым методом. Резка алмазным диском отличается высокой скоростью, высокой точностью резания, хорошей геометрией реза (без сколов), не требует специальной ориентации пластин по кристаллографическим плоскостям.

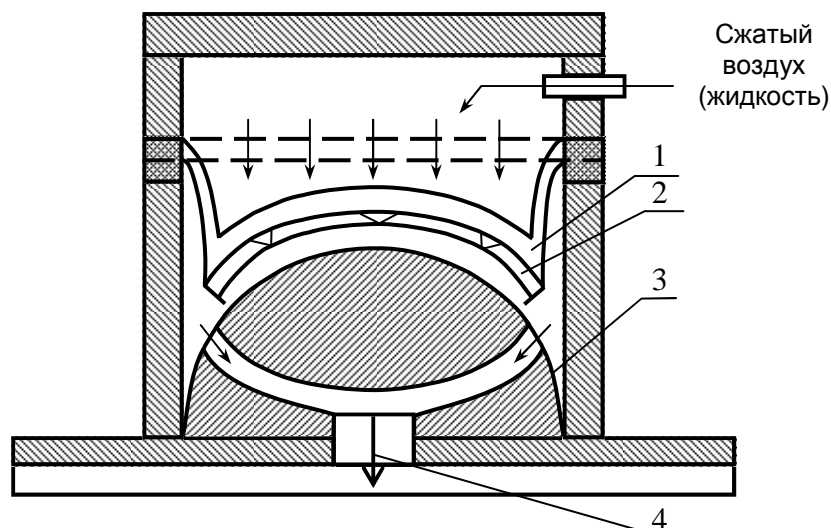


Рис. 3.3. Разделение скрайбированных пластин на полусфере: 1 – гибкая мембрана; 2 – пластина; 3 – полусфера; 4 – выход воздуха

Ультразвуковая резка осуществляется специальным инструментом с размером ячеек, равным размеру кристалла. Резка осуществляется частицами абразива, взвешенными в жидкости (масле) и совершающими колебательные движения с частотой более 15 кГц по направлению к пластине. Колебания рабочей среды обеспечиваются ультразвуковой установкой. Ультразвуковая резка используется, в основном, для разделения круглых или фигурных кристаллов, а также для образования выступов и углублений в полупроводниковых материалах.

После скрайбирования и разламывания пластин на кристаллы выполняют гидромеханическую очистку от загрязнений деионизованной водой, сушку, визуальный контроль. В процессе визуального контроля (с помощью микроскопа с увеличением 100 – 200^х) отсортировывают отмеченный маркерной краской брак по электрическим параметрам, а также образцы с механическими повреждениями. При равномерном растяжении эластичной ленты кристаллы раздвигаются, что делает удобным их захват инструментом для перемещения на следующую операцию – монтаж кристаллов.

Разделение путем сквозного химического травления применяется в настоящее время сравнительно редко в производстве полупроводниковых структур и предусматривает соответствующее предварительное маскирование поверхности, для чего проводится процесс фотолитографии.

Применение пластин большого диаметра (более 150 мм) и производство на них сверхбольших ИМС требует немеханических способов разделения. Поэтому сквозное анизотропное травление, лазерная резка и другие немеханические способы будут разрабатываться и совершенствоваться.

3.2. Присоединение кристалла к основанию корпуса

Присоединение кристаллов к основанию корпуса или на подложку модуля ГИС осуществляется пайкой, приплавлением с использованием эвтектических припоев, приклеиванием токопроводящими и нетокопроводящими клеями, с помощью стекол и пластмасс. При выборе способа крепления кристаллов принимают во внимание конструктивные особенности ИМС, ее электрические и тепловые характеристики, тип корпуса.

Основным требованием, предъявляемым к операции присоединения кристалла, является создание соединения кристалл – основание корпуса, обладающего высокой механической прочностью. Температуры и сжимающие усилия при выполнении монтажа не должны быть слишком высокими, чтобы не нарушить ранее полученные соединения, не ухудшить параметры структур, не разрушить их механическую целостность. В то же время они должны быть достаточны для прочного подсоединения. Нижний предел температур ограничен необходимостью после монтажа еще дважды (при подсоединении электродных выводов и герметизации) подвергать структуры тепловому воздействию, которое должно последовательно от операции к операции уменьшаться. Необходимо также при выборе способа монтажа учитывать условия эксплуатации микросхем.

Элементы ИМС занимают лишь приповерхностную часть кристаллов или расположены на поверхности платы, поэтому операции прямого монтажа не критичны по глубине проникновения соединяющего шва.

3.2.1. Пайка

Пайка – процесс соединения двух различных деталей без их расплавления с помощью третьего компонента, называемого припоем. Особенностью процесса пайки является то, что припой при образовании паяного соединения находится в жидком состоянии, а соединяемые детали – в твердом. Поэтому припой должен иметь температуру плавления намного ниже температур плавления материалов соединяемых деталей. Он должен хорошо смачивать соединяемые поверхности, растекаться, заполняя весь промежуток между ними. Поверхность припоя должна быть свободна от оксидов и загрязнений. Температура полученного паяного шва должна быть по возможности невысокой, чтобы не ухудшить параметры готовых структур. Припой не должен изменять своих свойств при рабочих температурах интегральных микросхем (125 °С для кремниевых).

Сущность процесса пайки состоит в следующем. Если между соединяемыми деталями поместить прокладки из припоя и всю композицию нагреть до температуры плавления припоя, то будут иметь место следующие

физические процессы. Сначала расплавленный припой смачивает поверхности соединяемых деталей. Далее в смоченных местах происходят процессы межатомного взаимодействия между припоем и каждым из двух смоченных им материалов. При смачивании возможны два случая – взаимное растворение смоченного материала и припоя или их взаимная диффузия. После охлаждения нагретой композиции припой переходит в твердое состояние. При этом образуется прочное паяное соединение между исходными материалами и припоем. Припой для выполнения пайки применяют в виде таблеток, прокладок, покрытий на соединяемые детали или локальные участки. Пайка совместима с толсто пленочной технологией, припойные пасты можно наносить трафаретной печатью.

Процесс пайки хорошо изучен, он прост и не требует сложного и дорогостоящего оборудования. При серийном выпуске изделий электронной техники припайка полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов производится в конвейерных печах, обладающих высокой производительностью. Пайка проводится в восстановительной (водород) или нейтральной (азот, аргон) среде. В настоящее время имеется целый ряд установок для монтажа кристаллов на подложку модуля ГИС или в корпуса приборов. Основным инструментом такой установки является рабочий наконечник с вакуумным захватом и фиксатором положения, управляемый программатором (мини-ЭВМ). Для каждого типоразмера кристаллов необходим свой наконечник, рабочая часть которого соответствует конфигурации и размеру обрабатываемого кристалла. Нагрев паяемой системы осуществляется снизу со стороны корпуса или сверху рабочим наконечником (термодом). Хорошие результаты при пайке дает наложение УЗ колебаний (УЗ пайка). Таким образом, на технологический процесс пайки и качество полученного паяного соединения деталей сильное влияние оказывают чистота соединяемых металлических поверхностей и применяемого припоя, состав атмосферы рабочего процесса и наличие флюсов.

Процесс присоединения кристалла пайкой подразделяют на низкотемпературный (до 400 °С) и высокотемпературный (выше 400 °С). В качестве низкотемпературных припоев используют сплавы на основе свинца и олова с добавками (до 2 %) сурьмы или висмута. Добавка сурьмы или висмута в оловянно-свинцовый припой позволяет избежать появления «оловянной чумы» в готовых приборах и ИМС при их эксплуатации и длительном хранении.

Применение низкотемпературных припоев требует специальной обработки тыльной поверхности пластин (кристаллов), т.е. нанесения металлических пленок, способных к облуживанию (например, структур V + Cu,

Cr + Au). Мягкие припои допускают при необходимости демонтаж кристаллов. В то же время относительно низкие температуры плавления, в основном не более 280 – 300 °С, ограничивают применение мягких припоев из-за необходимости нагрева на последующих сборочных операциях.

Наиболее широкое применение процесс пайки находит при сборке дискретных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров и др.). Это объясняется тем, что процесс пайки дает возможность получить хороший электрический и тепловой контакт между кристаллом полупроводника и кристаллодержателем корпуса, причем площадь контактного соединения может быть достаточно большой (для приборов большой мощности).

Особое место процесс пайки занимает при закреплении полупроводникового кристалла большой площади на основании корпуса из меди. В этом случае для снижения термомеханических напряжений, возникающих за счет разницы в температурных коэффициентах расширения полупроводниковых материалов и меди, широко используют молибденовые и молибденовольфрамовые термокомпенсаторы, имеющие площадь, равную площади полупроводникового кристалла, а ТКЛР – близкий к ТКЛР полупроводника. Такая сложная многоступенчатая композиция с двумя прослойками из припоя с успехом используется при сборке полупроводниковых приборов средней и большой мощностей.

Дальнейшее развитие процесс пайки получил при сборке интегральных микросхем по технологии «перевернутого кристалла». Эта технология предусматривает предварительное создание на планарной стороне кристалла с ИМС «шариковых выводов» или «контактных выступов», которые представляют собой бугорки из меди, покрытые припоем или оловом. Такой кристалл располагают на поверхности подложки или на основании корпуса так, чтобы бугорки соприкасались с ней в определенных участках. Кристалл переворачивается, и его планарная сторона посредством бугорков контактирует с поверхностью основания корпуса.

При кратковременном нагреве такой композиции происходит прочное соединение контактных выступов полупроводникового кристалла с основанием корпуса. Следует отметить, что те участки поверхности корпуса, с которыми соприкасаются «выступы», предварительно тоже облуживаются. Поэтому в момент нагрева происходит соединение припоя основания корпуса с припоем контактных выступов.

На рис. 3.4, а, б показаны варианты присоединения кристалла ИМС, имеющего медные облуженные или необлуженные контактные выступы, к подложке. С помощью объемных выводов одновременно подсоединяются и кристалл, и все выводы. Основными трудностями монтажа методом «пе-

ревернутого кристалла» являются сведение к минимуму разновысотности выступающих над кристаллом выводов и их совмещение с контактными площадками. Разновысотность приводит к необходимости создания достаточных деформаций для наиболее выступающих шариков или столбиков, чтобы обеспечить контактирование с самыми низкими выступами. При этом деформации не должны превышать допустимые нормы, так как возникающие после монтажа механические напряжения ведут к потенциальным отказам микросхем. Для уменьшения разновысотности применяют специальную форму выводов. Наличие высокого грибообразного выступа обеспечивает необходимый зазор между полупроводниковым кристаллом и подложкой при расплавлении припоя. Это позволяет проводить присоединение кристалла к подложке с высокой степенью точности.

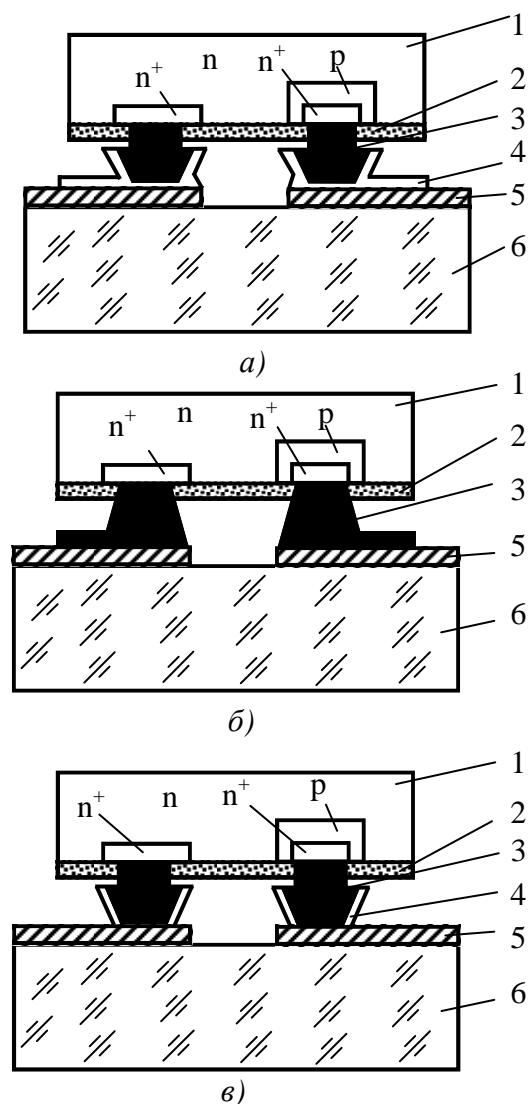


Рис. 3.4. Присоединение кристаллов к подложке методом припайвания:
а – медные облуженные выступы; *б* – медные необлуженные выступы;
в – выступы из сплава олово – свинец; 1 – кристалл; 2 – пленка SiO₂;
 3 – медный выступ; 4 – олово; 5 – металлическая пленка; 6 – подложка

На рис. 3.4, в показан вариант сборки кристаллов, имеющих мягкие столбиковые выводы из припоя на основе олово – свинец.

Присоединение такого кристалла к основанию корпуса проводят обычным нагревом без дополнительного давления на кристалл. Припой контактных выступов при нагревании и расплавлении не растекается по поверхности облуженных участков основания корпуса за счет сил поверхностного натяжения. Это, кроме того, обеспечивает определенный зазор между кристаллом и подложкой.

Основным производственным переходом в методе «перевернутого кристалла» является совмещение кристалла с корпусом, выполняемое, как правило, в два этапа.

Предварительная ориентация положения на специальных автоматах, например, ЭМ-433 обеспечивает поворот кристаллов вниз рабочей поверхностью и разворот в горизонтальной плоскости до соответствия координат выводов и контактных площадок.

Совмещение выводов с контактными площадками на установке присоединения выводов выполняется с помощью зеркальной оптики и проектора или с помощью направляющей фильеры.

Совмещение перевернутых кристаллов с балочными выводами выполнять проще, так как они выходят за пределы кристалла.

Рассмотренный метод присоединения кристаллов ИМС к основанию корпуса или к какой-либо плате позволяет в значительной степени механизировать и автоматизировать технологический процесс сборки.

3.2.2. Приплавление с использованием эвтектических сплавов

Этот способ присоединения полупроводниковых кристаллов к основанию корпуса основан на образовании расплавленной зоны, в которой происходит растворение поверхностного слоя полупроводникового материала и слоя металла основания корпуса.

В промышленности широкое применение получили два эвтектических сплава: золото – кремний (температура плавления 370 °С) и золото – германий (температура плавления 356 °С). Процесс эвтектического присоединения кристалла к основанию корпуса имеет две разновидности.

Первый вид основан на использовании прокладки из эвтектического сплава, которая располагается между соединяемыми элементами – кристаллом и корпусом. В этом виде соединения поверхность основания корпуса должна иметь золотое покрытие в виде тонкой пленки, а поверхность полупроводникового кристалла может не иметь золотого покрытия (для кремния и германия) или быть покрытой тонким слоем золота (в случае

присоединения других полупроводниковых материалов). При нагреве такой композиции до температуры плавления эвтектического сплава между соединяемыми элементами (кристалл – основание корпуса) образуется жидкая зона. В этой жидкой зоне происходит растворение слоя полупроводникового материала кристалла (или слоя золота, нанесенного на поверхность кристалла).

После охлаждения всей системы (основание корпуса – эвтектический расплав – полупроводниковый кристалл) происходит затвердевание жидкой зоны эвтектического сплава, а на границе полупроводник – эвтектический сплав образуется твердый раствор. В результате этого процесса создается механически прочное соединение полупроводникового материала с основанием корпуса.

Второй вид эвтектического присоединения кристалла к основанию корпуса обычно реализуется для кристаллов из кремния или германия. В отличие от первого вида для присоединения кристалла не используется прокладка из эвтектического сплава. В этом случае жидкая зона эвтектического расплава образуется в результате нагрева композиции: позолоченное основание корпуса – кристалл кремния (или германия). Рассмотрим подробнее этот процесс. Если на поверхность основания корпуса, имеющего тонкий слой золотого покрытия, поместить кристалл кремния, не имеющий золотого покрытия, и всю систему нагреть до температуры на 40 – 50 °С выше температуры эвтектики системы золото – кремний, то между соединяемыми элементами образуется жидкая фаза эвтектического состава. Так как процесс сплавления слоя золота с кремнием является неравновесным, то количество кремния и золота, растворившихся в жидкой зоне, будет определяться толщиной золотого покрытия, температурой и временем проведения процесса сплавления. При достаточно больших выдержках и постоянной температуре процесс сплавления золота с кремнием приближается к равновесному и характеризуется постоянным объемом жидкой фазы золото – кремний. Наличие большого количества жидкой фазы может привести к вытеканию ее из-под кристалла кремния к его периферии. При затвердевании вытекшая эвтектика приводит к образованию больших механических напряжений и раковин в структуре кристалла кремния, которые резко снижают прочность сплавной структуры и ухудшают ее электрофизические параметры.

При минимальных значениях времени и температуры сплавление золота с кремнием происходит не равномерно по всей площади соприкосновения кристалла с основанием корпуса, а лишь в ее отдельных точках. В результате уменьшается прочность сплавного соединения, увеличивают-

ся электрическое и тепловое сопротивление контакта, снижается надежность полученной арматуры.

Существенное влияние на процесс эвтектического сплавления оказывает состояние поверхностей исходных соединяемых элементов. Наличие загрязнений на этих поверхностях приводит к ухудшению смачивания контактирующих поверхностей жидкой фазой и неравномерному растворению.

3.2.3. Соединение стеклом и пластмассой

Для крепления кристаллов к корпусам или подложкам используются легкоплавкие бесщелочные свинцово-боросиликатные стекла. Монтаж кристаллов пайкой стеклом применяют при массовом производстве мало-мощных однокристалльных полупроводниковых приборов, в которых не требуется электрических контактов между нижней поверхностью кристалла и корпусом.

Основные недостатки соединений стеклом: отсутствие электрического контакта, плохой теплоотвод, нарушение механической прочности соединения вследствие растрескивания стекла (по причине нарушения технологического режима либо вследствие получения толстого шва, более 20 мкм). Для часто используемых сочетаний материалов подсоединяемых деталей необходимы стекла с требуемым значением ТКЛР. Однако, как правило, эти стекла являются тугоплавкими, т.е. непригодными для монтажа кремниевых кристаллов. В связи с этим соединения стеклом применяют в основном при монтаже плат из ситалла, поликора и керамики.

Технология монтажа стеклом включает нанесение методом трафаретной печати или напылением на место монтажа суспензии стеклянного порошка или стеклопасты на очищенную поверхность, сжатие соединяемых деталей в кассете, сушку, оплавление в печи в контролируемой атмосфере. Толщина стеклянного шва – не более 10 – 20 мкм. Рабочая температура присоединения не превышает 500 °С (при использовании тугоплавких боросиликатных стекол – 950 – 1000 °С). Спай металл – стекло получается высокопрочным, если на поверхности металла имеется окисная пленка.

Достоинствами присоединения кристаллов пластмассой являются низкая стоимость, возможность выполнения в многовыводных корпусах одновременно с пластмассовой герметизацией монтажа кристаллов и выводов.

По сравнению со стеклом пластмасса более широко применяется для монтажа кристаллов, так как обеспечивает достаточную прочность и надежность соединения, имеет низкую температуру отверждения, что ис-

ключает ухудшение параметров приборов и ИМС вследствие перегрева. В то же время пластмасса обладает низкой теплопроводностью, и при ее использовании невозможна замена дефектных кристаллов. В отдельных случаях (вследствие перегрева пластмассы) затруднено присоединение электродных выводов термокомпрессией, поэтому используют ультразвуковую сварку. В герметично закрытых корпусах возможно выделение из пластмассы газов.

3.2.4. Приклеивание

Приклеивание – процесс соединения элементов друг с другом, основанный на клеящих свойствах некоторых материалов, которые позволяют получать механически прочные соединения между полупроводниковыми кристаллами и основаниями корпусов (металлическими, стеклянными или керамическими). Прочность склеивания определяется силой сцепления между клеем и склеиваемыми поверхностями элементов.

Склеивание различных элементов интегральных схем дает возможность соединять самые разнообразные материалы в различных сочетаниях, упрощать конструкцию узла, уменьшать его массу, снижать расход дорогостоящих материалов, не применять припоев и эвтектических сплавов, значительно упрощать технологические процессы сборки ИМС.

Присоединение кристаллов к основанию корпуса с помощью приклеивания незаменимо при сборке и монтаже элементов ГИС.

При приклеивании кристаллов на основания корпусов применяют различные типы клеев: изоляционные, токопроводящие, светопроводящие и теплопроводящие. По активности взаимодействия между клеем и склеиваемыми поверхностями различают полярные (на основе эпоксидных смол) и неполярные (на основе полиэтилена) клеи.

Качество процесса приклеивания в значительной степени зависит не только от свойств клея, но и от состояния поверхностей склеиваемых элементов. Для получения прочного соединения необходимо тщательно обработать и очистить склеиваемые поверхности. Органические растворители, используемые для очистки, должны быть полностью удалены сушкой. Остаточный растворитель при отверждении клея создает пористость и внутренние напряжения. Количество дефектов в слое клея увеличивается с его толщиной, прочность соединения уменьшается. Поэтому рекомендуют слой клея ограничивать толщиной 0,05 – 0,1 мм.

Важную роль в процессе склеивания играет температура. Используемые клеевые материалы (кроме контактолов) требуют горячей сушки

при температуре от 60 до 200 °С в течение 1,5 – 2 ч, что резко снижает производительность процесса присоединения.

При склеивании элементов конструкций, которые не подвергаются в последующих технологических операциях воздействию высоких температур, можно использовать клеи холодного отверждения на эпоксидной основе. Для приклеивания кремниевых кристаллов к металлическим или керамическим основаниям корпусов обычно используют клей ВК-2, представляющий собой раствор кремнийорганической смолы в органическом растворителе с мелкодиспергированным асбестом в качестве активного наполнителя, или ВК-32-200, в котором в качестве наполнителя используют стекло или кварц.

Технологический процесс приклеивания полупроводниковых кристаллов проводят в специальных сборочных кассетах, обеспечивающих нужную ориентацию кристалла на основании корпуса и необходимое прижатие его к основанию. Собранные кассеты в зависимости от используемого клеящего материала подвергают определенной термической обработке или выдерживают при комнатной температуре.

Особые группы составляют электропроводящие и оптические клеи, используемые для склеивания элементов и узлов гибридных и оптоэлектронных ИМС. Токопроводящие клеи представляют собой композиции на основе эпоксидных и кремнийорганических смол с добавлением порошков серебра или никеля. Среди них наиболее широкое распространение получили клеи АС-40В, ЭК-А, ЭК-Б, К-3, ЭВТ и КН-1, представляющие собой пастообразные жидкости с удельным электрическим сопротивлением 0,01 – 0,001 Ом·см и диапазоном рабочих температур от минус 60 до плюс 150 °С. К оптическим клеям предъявляют дополнительные требования по значению коэффициентов преломления и светопропускания. Наиболее широкое распространение получили оптические клеи ОК-72Ф, ОП-429, ОП-430, ОП-3М.

Клеевое соединение даже из электропроводящих клеев обладает сравнительно высоким тепловым сопротивлением, малой механической прочностью (из-за разности ТКЛР материала подложки – корпуса и кристалла, низкой адгезии клея к корпусу и кристаллу, возникновения внутренних механических напряжений в клеевом шве). Особенно плохо ведут себя клеевые соединения при тепловых ударах, термоциклировании и динамических нагрузках.

Клеевые композиции на основе эпоксидных, полиэфирных, кремнийорганических смол сохраняют прочность при температурах более 270 °С (например, клеи К-400, К-350-61, ВК-4, ВК-8, ВК-32-300).

Токопроводящие клеи (контактолы) марок К-I, К-II, К-III, ВК-20Т изготавливаются на основе эпоксидного или нитроклеев с добавлением 26 % по массе мелкодисперсного порошка серебра.

Недостатки клеевых соединений: низкая теплопроводность, невозможность замены дефектных структур, возможно выделение газов в герметичный корпус.

3.3. Присоединение электродных выводов

В современных полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах, у которых размер контактных площадок составляет несколько десятков микрон, процесс присоединения выводов является одной из самых трудоемких технологических операций.

Основные требования, предъявляемые к контактным выводам и методам их создания:

- высокая механическая прочность (не ниже 70 % прочности присоединяемой проволоки);
- малое омическое сопротивление контакта;
- линейность вольтамперной характеристики контакта металл – полупроводник;
- высокая производительность процесса контактирования;
- возможность автоматизации.

Существуют две основных разновидности присоединения электродных выводов – проволочный монтаж и беспроводный монтаж.

3.3.1. Проволочный монтаж

Проволочный монтаж – это присоединение тонких алюминиевых и золотых проволочек. Эта операция является малопродуктивной, трудоемкой и ненадежной. Ее выполняют на специальных установках с визуальным наблюдением и ручным ориентированием инструмента, проволоки и мест присоединения. Половина всех отказов ИМС происходит из-за нарушения электрического контакта.

После совмещения свободного конца проволоки с площадкой на кристалле производится сварка. Затем изделие (коммутационная плата) перемещается таким образом, чтобы под сварочным инструментом находилась соответствующая площадка коммутационной платы; после совмещения инструмента с площадкой производится сварка и обрезка проволоки. Далее формируется перемычка для следующей пары контактов (рис. 3.5).

При перемещении платы с приваренным концом проволоки последняя сматывается с катушки неподвижной сварочной головки так, чтобы образовался небольшой избыток по длине. В результате упругости проволоки перемычка получает плавный изгиб вверх, который при температурных изменениях длины перемычки предотвращает замыкание ее на кристалл.

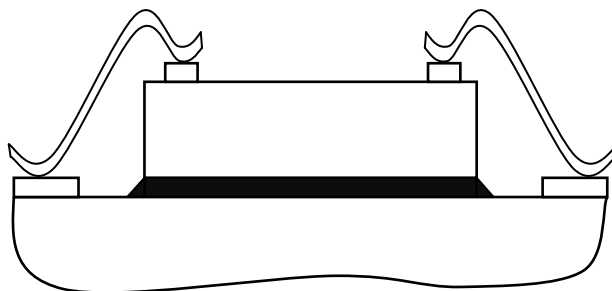


Рис. 3.5. Проволочный монтаж кристалла на коммутационную плату

В современных установках для микросварки рабочий цикл сварки автоматизирован (контролируется давление инструмента, нагрев, время выдержки). Что касается вспомогательных приемов (перемещения, совмещения), то существуют установки с ручным перемещением изделия и визуальным совмещением с помощью микроскопа, а также установки с автоматическими программируемыми перемещениями в сочетании с системой «машинного зрения», освобождающей оператора от зрительного напряжения.

Достоинством проволочного монтажа является возможность размещения перемычек при произвольном расположении любого количества монтажных площадок на коммутационной плате, т.е. гибкость в процессе ее конструирования. Недостаток заключается в высокой трудоемкости монтажа, т.к. сварные соединения можно получать только последовательно, индивидуально.

3.3.2. Ленточный монтаж

Отказ от проволоки и переход к плоским ленточным перемычкам позволяет изготовить их заранее и одновременно вне кристалла методом избирательного травления ленты. Однако взаимное расположение перемычек должно быть жестко predetermined расположением монтажных площадок на кристалле или плате. Ленточные перемычки толщиной 70 мкм остаются гибкими, поэтому для сохранения их взаимной ориентации они удерживаются в заданном положении изолирующими перемычками из полиимида (рис. 3.6). Таким образом, исходная лента для изготовления системы перемычек должна быть двухслойной: алюминий (70 мкм) и поли-

имид (40 мкм). Для исключения замыкания перемычек на кристалл их специально формуют перед монтажом.

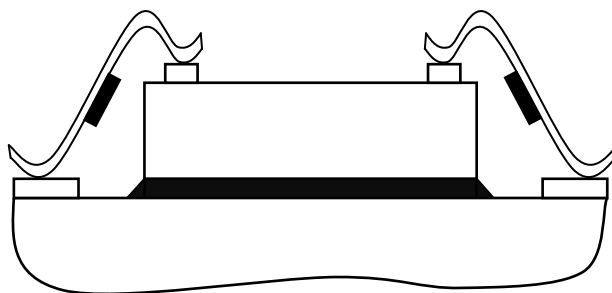


Рис. 3.6. Ленточный монтаж кристалла на коммутационную плату

Использование ориентированных ленточных перемычек позволяет существенно снизить трудоемкость монтажа. Во-первых, для совмещения всей системы перемычек с кристаллом достаточно совместить две пары «перемычка – площадка», расположенные по диагонали. После приварки всех перемычек на кристалле последний с системой перемычек переносится на коммутационную плату и аналогично производится совмещение свободных концов с площадками коммутационной платы, их приварка. Во-вторых, появляется возможность одновременной (групповой) приварки всех перемычек, расположенных в одном ряду.

К недостатку следует отнести ограничения, накладываемые на конструкцию коммутационной платы и самого кристалла по числу и характеру расположения монтажных площадок. Для смягчения этого недостатка приходится разрабатывать и изготавливать стандартный ряд систем перемычек, отличающихся числом и шагом расположения.

3.3.3. Сварка и пайка электродных выводов

К проволочным методам присоединения относят ультразвуковую сварку, термокомпрессионную сварку, микроконтактную сварку, пайку.

3.3.3.1. Ультразвуковая сварка – это процесс соединения двух материалов, находящихся в твердом состоянии, при незначительном нагреве с приложением определенного давления и колебаний ультразвуковой частоты. Ультразвуковые колебания возбуждаются в магнитострикционном преобразователе и с помощью волновода (концентратора), служащего для увеличения амплитуды, и сварочного инструмента передаются свариваемым деталям. Энергия колебаний преобразуется в сложные напряжения растяжения, сжатия и среза.

Косвенный нагрев инструмента облегчает пластические деформации и улучшает качество соединения. Температура нагрева составляет не более

50 – 60 % от температуры плавления соединяемых материалов. Вначале осуществляется сдавливание соединяемых деталей, далее пропускается импульс тока через инструмент, а затем (или одновременно) создаются ультразвуковые колебания (рис. 3.7).

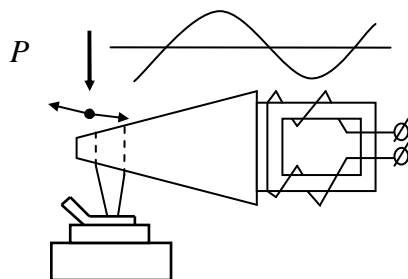


Рис. 3.7. Схема ультразвуковой сварки с косвенным импульсным нагревом

Деформация деталей в данном методе составляет не более 5 – 20 % от первоначальных размеров. Процесс происходит на частоте 18 – 250 кГц. Ультразвуковые колебания, воздействуя на соединение, нагревают его, освобождают от загрязнений и оксидов поверхности в зоне контакта, ускоряют пластическую деформацию выводов. В результате происходит сближение физически чистых поверхностей на расстояние действия межатомных сил, взаимная диффузия и прочное соединение двух материалов. При ультразвуковой сварке не используют припой и флюсы, что является ее основным достоинством. Кроме того, этим способом можно соединять разнородные, разнотолщинные и трудносвариваемые материалы.

Ограничением метода является требование высокой пластичности материала проводника.

Основными параметрами процесса являются амплитуда колебаний (порядка 5 – 10 мкм) и удельное давление (несколько килограммов на 1 мм²). Время сварки должно быть оптимальным: при малом времени физический контакт соединяемых поверхностей может оказаться малым, при большом времени наблюдается разрушение узлов схватывания.

В установке ЭМ-404 для ультразвуковой сварки использован инструмент капиллярного типа, который может совершать продольные или крутильные колебания в зависимости от установленного сменного волновода. Усилие инструмента на свариваемые элементы регулируется в пределах 20 – 150 г, время сварки выдерживается с точностью $\pm 0,02$ с. Ультразвуковой генератор может работать с частотой 58 – 65 кГц и с выходной мощностью 0,1 – 28 Вт. На установке можно приваривать золотые, алюминиевые и медные проволоки диаметром 20 – 100 мкм. Установка имеет нагревательную колонку, что позволяет работать с подогревом изделия.

3.3.3.2. Термокомпрессионная сварка. Она представляет собой сварку давлением с подогревом. Необходимое давление прикладывают к инструменту, а рабочая температура обеспечивается нагревом либо инструмента, либо рабочего стола с изделием, либо того и другого одновременно. Рабочая температура поддерживается постоянной в течение всего времени работы установки.

Пластические деформации, возникающие в зоне контакта соединяемых деталей, способствуют вытеснению адсорбированных газов и загрязнений. В результате обнажения чистых поверхностей становится возможным электронное взаимодействие соединяемых материалов (образование межатомных связей). Получению прочного соединения способствует высокая взаимная диффузия материалов и образование твердого раствора в тонкой приграничной области.

Во избежание разрушения соединения вследствие остаточных напряжений материал проволоки должен быть пластичным. С этой целью проволоку предварительно подвергают рекристаллизационному отжигу.

Наилучшей свариваемостью обладает пара серебро – золото, так как ей присуща высокая взаимная диффузия. При сварке золота и алюминия взаимная диффузия приводит к образованию интерметаллических соединений, некоторые из которых обладают хрупкостью или рыхлостью. Удовлетворительной сварки не удастся достичь на кремниевых подложках вследствие каталитического влияния кремния.

Термокомпрессионную сварку выполняют при невысоких удельных давлениях и температурах. Поэтому для получения больших пластических деформаций диаметр вывода не должен превышать 100 – 130 мкм. Важным условием выполнения качественного соединения является тщательная подготовка поверхности соединяемых деталей (травление, обезжиривание), а также защита их от окисления в процессе сварки (применение защитной среды азота или аргона).

Тип термокомпрессионного соединения (форма и размеры деформируемого участка вывода) зависит от размеров и конструкции инструмента (рис. 3.8). Возможны два основных типа соединения – внахлестку и встык.

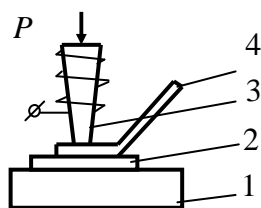


Рис. 3.8. Схема термокомпрессионной сварки: 1 – рабочий стол; 2 – подложка с тонкой пленкой; 3 – инструмент с нагревателем; 4 – проволочный проводник

Соединения внахлестку реализуют, например, на установке ЭМ-407. Рабочий стол (он же нагреватель) совершает перемещение в горизонтальной плоскости в пределах 15×15 мм. Перед сваркой соединяемые поверхности выставляют параллельно линии перекрестия окуляра микроскопа. Точность совмещения инструмента с контактной площадкой ±3 мкм. Температура нагрева рабочей зоны – до 400 ± 5 °С. Величина давления – 20 – 180 г, время выдержки при сварке – 1 – 10 с. Подъем инструмента после окончания выдержки – автоматический. При втором подъеме инструмента производится обрыв проволоки.

На установке ЭМ-405 соединения выполняют методом сварки встык. После сварки вывод отрезают ножницами. Оплавление шарика на конце проволоки, выходящей из инструмента, производится электрической дугой. Специальный механизм обеспечивает автоматическое подтягивание проволоки с шариком к торцу инструмента при его опускании. Первую сварную точку выполняют встык, вторую – внахлестку. Длина проволочной перемычки регулируется в пределах 3 – 8 мм. Режимы термокомпрессионной сварки для соединений, наиболее широко применяющихся в производстве микросхем, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Оптимальные режимы термокомпрессионной сварки

Материал подложки или пленки	Материал вывода	Температура нагрева, К	Удельное давление, $\delta \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^2$	Время, с	Деформация вывода, %
Кремний	Золото	623	14 – 15	5 – 10	60
Алюминий, напыленный на SiO ₂	Золото	523	10 – 11	0,5 – 5	50
Золото, напыленное на SiO ₂	Золото	573	10 – 11	0,5 – 3	50
Кремний	Алюминий	723	7	10	60 – 70
Алюминий, напыленный на SiO ₂	Алюминий	623	6 – 7	3 – 7	60

Микроконтактная сварка – это процесс соединения деталей из проводящих материалов при пропускании через них для разогрева импульса электрического тока и приложении некоторого давления. Рассмотрим две основных разновидности микроконтактной сварки – с косвенным импульсным нагревом и сдвоенным (расщепленным) электродом.

3.3.3.3. Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН). Отличается от компрессионной сварки тем, что разогрев рабочей зоны осуществляется только в момент действия импульса тока, проходящего непосредственно через инструмент. Благодаря этому имеется возможность получить более высокий локальный нагрев проводника и, следовательно, сваривать малопластичные материалы. Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом обладает более широкими технологическими возможностями и позволяет получать качественные соединения золотых, алюминиевых и медных проводников (диаметром до 100 мкм) с пленками многих материалов.

Для выполнения СКИН инструмент должен иметь V-образную форму (рис. 3.9), причем максимальная температура должна быть на рабочем торце. Для нагрева инструмента может быть использован импульс постоянного или переменного тока. Для смягчения термоудара на пленочную контактную площадку целесообразен сопутствующий подогрев изделия (т.е. рабочего стола).

В отличие от термокомпрессии процесс взаимной диффузии при СКИН играет более существенную роль в образовании соединения. При выполнении СКИН вначале прикладывается давление. Затем через инструмент подается импульс тока длительностью от 0,01 до нескольких секунд. Под действием температуры торца инструмента происходит локальный разогрев проволоки, уменьшение предела пластичности, осадка проволоки и соединение. При соединении, например, алюминиевой проволоки с алюминиевой, золотой или медной пленкой температура в зоне сварки должна составлять, соответственно, 400, 490 и 560 °С.

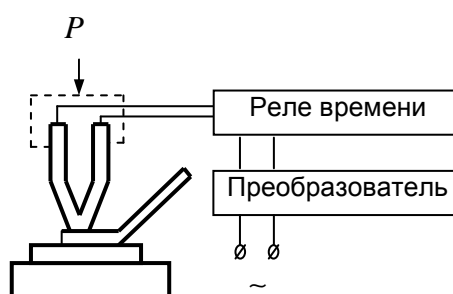


Рис. 3.9. Схема сварки давлением с косвенным импульсным нагревом

3.3.3.4. Сварка сдвоенным (расщепленным) электродом. Является разновидностью контактной точечной электросварки, приспособленной к особенностям соединений в микросхемах. Малые площади соединений и малая толщина пленок требуют локализации нагрева при одностороннем расположении электродов. Инструмент (рис. 3.10) представляет собой два электрода с шириной рабочей части (торца) каждого электрода 0,1 мм, разделенных изолирующей прослойкой толщиной порядка 0,05 мм.

В процессе сварки проволочный проводник на участке под инструментом является составной частью электрической цепи. Разогрев проводника осуществляется за счет выделения тепла в месте контактов проволока – электроды. В зависимости от условий сварки (длительности, мощности и скважности импульсов и времени выдержки под током) могут иметь место следующие механизмы соединения:

- соединение в твердой фазе в результате рекристаллизации соединяемых материалов и прорастания зерен через поверхность раздела;

- соединение ниже температуры рекристаллизации за счет электронного взаимодействия и атомного сцепления;

- соединение в жидкой фазе в результате расплавления.

Воспроизводимость качества соединения существенно зависит от повторяемости величины электрического сопротивления в месте контакта. Поэтому сварочные установки предусматривают автоматическое регулирование усилия давления (0,3 – 1 кг) инструмента по заданному контактному сопротивлению. Условием получения качественного соединения является также деформация проводника не менее 40 %.

В табл. 3.2 приводятся данные по выбору метода соединения проволочных проводников с тонкопленочными контактными площадками.

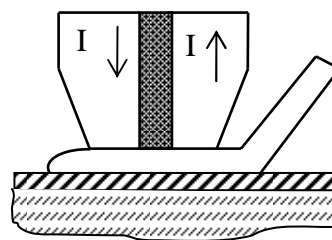


Рис. 3.10. Схема сварки сдвоенным электродом

Таблица 3.2

Свариваемость материалов при различных методах

Материал контактной площадки и подложки	Методы сварки и материалы проволочных выводов											
	Термокомпрессия нагретым инструментом			Сварка косвенным импульсным нагревом			Контактная сварка сдвоенным электродом			Ультразвуковая сварка		
	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu
Золотая пленка с подслоем нихрома на ситалле или стекле	++	+	-	++	++	+	++	-	++	++	++	+
Медная или никелевая пленка с подслоем нихрома на ситалле	++	+	-	++	++	+	++	-	+	++	+	+
Алюминиевая пленка на ситалле или стекле	++	+	-	+	+	-	+	-	+	++	+	-

Примечание. ++ – свариваются хорошо; + – свариваются удовлетворительно; -- не свариваются.

3.3.3.5. Разновидности пайки электродных выводов

Пайку можно выполнять:

1. Мягкими припоями на основе олова, свинца и индия в термических печах в атмосфере защитного газа и на воздухе. В этом методе детали определенным образом укладывают в кассеты. Припой в виде фрагментов определенных форм и размеров закладывают между соединяемыми деталями или осаждают на концы проволочек и расплавляют. Роль флюса выполняет водород или смесь азот – водород.

2. Пайка нагревом (прямым или косвенным) электрическим током. В этом случае через соединяемые детали пропускается импульс тока, приводящий к разогреву.

3. Пайка нагревом паяльником. Паяльник должен иметь миниатюрный наконечник. Как и при обычной пайке, необходимо использовать флюс.

4. Пайка газовым паяльником в атмосфере защитного газа.

Проволока для выводов изготавливается из чистого золота, сплава золото – серебро, алюминия. Диаметр проволоки составляет от 8 – 15 мкм до 50 – 60 мкм. Кроме проволоки используют алюминиевую плющенку толщиной 30 мкм и шириной 250 мкм.

3.3.4. Монтаж с помощью жестких объемных выводов

Жесткие объемные выводы формируются на кристаллах заранее и одновременно до разделения групповой пластины. В первом приближении они представляют собой выступы полусферической формы высотой порядка 60 мкм, покрытые припоем. Облуженными должны быть и ответные монтажные площадки на коммутационной плате. В отличие от проволочного и ленточного монтажа объемные выводы соединяют с площадками платы пайкой, а кристалл при этом оказывается в перевернутом положении, т.е. структурами вниз (аналогично рис. 3.4 – рис. 3.11).

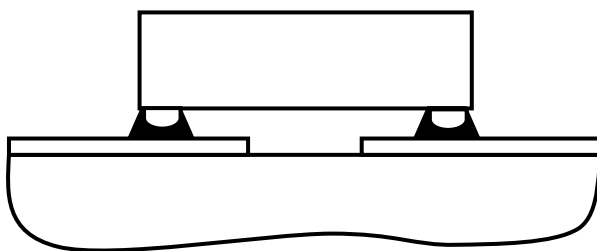


Рис. 3.11. Монтаж кристалла на коммутационной плате с помощью объемных выводов

Последовательность монтажа следующая. Кристалл, находящийся в кассете в ориентированном положении, забирается вакуумным присосом (пинцетом) и переносится в позицию монтажа с определенным зазором. В зазор вводится полупрозрачное зеркало, позволяющее оператору через микроскоп наблюдать одновременно площадки на коммутационной плате и выводы на кристалле. После совмещения зеркало выводится из зазора, а присос опускает кристалл на коммутационную плату и прижимает его. Далее из миниатюрного сопла подается горячий инертный газ, выполняющий одновременно функции нагревательной и защитной среды, затем холодный инертный газ, чем и заканчивается цикл монтажа.

Достоинства монтажа с помощью жестких объемных выводов:

- сокращение числа соединений вдвое, что повышает надежность изделия при эксплуатации;
- сокращение трудоемкости за счет одновременного присоединения всех выводов;
- уменьшение монтажной площади до площади, занимаемой кристаллом;
- отсутствие необходимости предварительного механического крепления кристалла.

Ограничением для использования данного метода является необходимость применения коммутационных плат с высоким разрешением, т.к. размеры площадок и шаг их расположения на плате и кристалле должны совпадать.

3.3.5. Сборка интегральных микросхем на ленточных носителях

В отличие от трудоемкой сборки с помощью проволочных электродных выводов сборка с использованием объемных выводов и плоских выводов на ленточных носителях значительно снижает стоимость микросхем за счет резкого повышения производительности, так как подсоединение выводов выполняется групповым способом и процесс сборки легко автоматизируется. Групповое подсоединение плоских выводов выполняют теми же способами, что и индивидуальное подсоединение проволочных выводов. Разница состоит в конструкции инструмента, который должен одновременно подсоединить все выводы. Сборка с помощью выводов на гибком ленточном носителе является наиболее эффективным методом группового подсоединения. Применение гибких ленточных носителей позволило создать так называемую рулонную технологию и полностью автоматизировать процессы сборки и герметизации.

Появление и совершенствование ленточных носителей выводов стимулировалось необходимостью:

- замены индивидуального подсоединения выводов групповым, для чего требуется точное фиксированное взаимное расположение выводов в соответствии с расположением контактных площадок на кристалле, к которым они будут подсоединяться;

- создания непрерывного автоматизированного технологического процесса сборки, для чего требуется непрерывная лента с краевой перфорацией, служащая средством транспортирования ориентировано расположенных выводов.

Выводы для одной интегральной схемы на ленте представляют кадр. Кадры расположены с определенным шагом. Лента является держателем выводов и средством их транспортирования в технологическом процессе сборки. Кристалл монтируют на посадочную площадку ленты и с помощью проволочных или плоских перемычек подсоединяют контактные площадки кристалла к выводам ленты. Производят герметизацию, и интегральную схему с выводами отделяют от поддерживающей части ленты. На жестких лентах изготавливают только внешние выводы ИМС.

3.4. Герметизация микросхем

3.4.1. Характеристика способов герметизации

Герметизация является завершающим технологическим процессом изготовления микросхем. Ее проводят для полной изоляции элементов, компонентов, кристаллов и электрических соединений от окружающей среды, содержащей влагу, а также активные вещества, способные вызвать коррозию, химические взаимодействия и, как следствие, привести к выходу изделий из строя.

Технологический процесс герметизации включает в себя три основных этапа:

1. Очистка
2. Герметизация:
 - 2.1. Корпусная
 - 2.2. Бескорпусная
 - 2.3. Комбинированная
3. Контроль герметизации

Технологические способы герметизации микросхем должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать прочность и сохранять герметичность во всем температурном диапазоне работы микросхемы;

- не вызывать нагрева активных элементов свыше 300 °С;
- не вызывать выделения газов и паров металлов внутри корпуса;
- выполняться в среде очищенного и осушенного воздуха, азота или инертного газа с точкой росы не более минус 25 °С;
- обеспечивать возможность механизации и автоматизации.

Для изготовления надежных в работе изделий необходимо, прежде всего, знать условия внешней среды, а именно: физические и биологические особенности мест, в которых эти изделия будут находиться и эксплуатироваться, т.е. совокупность всех природных, а иногда и искусственно созданных условий (факторов). Факторы, характеризующие физическое состояние среды (например, температура, содержание водяных паров в воздухе, солнечная радиация), называются основными, а факторы, вызванные атмосферными физическими явлениями или зависящие от них, например, микробиальная зараженность атмосферы, называются косвенными. На практике следует учитывать воздействие на аппаратуру и таких косвенных факторов, которые являются следствием образования «искусственного климата» (промышленное загрязнение атмосферы, местное повышение температуры от работающего рядом оборудования и т.д.).

Особенно опасно воздействие влаги на элементы микроэлектронных устройств. Поскольку воздух практически всегда содержит то или иное количество водяного пара, т.е. представляет собой паровоздушную смесь, то обычно одним из обязательных требований к разрабатываемому способу герметизации является обеспечение необходимой влагозащиты.

Воздействие на изделие одного или, тем более, одновременно нескольких климатических факторов очень усложняют проблему обеспечения его высокой надежности. Поэтому повышение надежности микросхем неразрывно связано с разработкой эффективных способов их герметизации.

Под разработкой герметизации обычно понимают комплекс мер по обеспечению работоспособности изделий при их изготовлении, хранении и последующей длительной эксплуатации. Для этой цели могут быть использованы широкая номенклатура материалов и разнообразные способы герметизации, реализованы различные конструктивные и технологические решения. При этом все герметизируемые микроэлектронные изделия можно подразделить на две принципиально различные группы:

- полые конструкции, в которых рабочая поверхность изделия не контактирует непосредственно с герметизирующим материалом;
- конструкции без внутренних газовых полостей, в которых герметизирующий материал контактирует с рабочей поверхностью изделия (монокристаллические конструкции).

К первой группе относятся металlostеклянные, керамические, пластмассовые и другие корпуса, вторая группа состоит из бескорпусных изделий и монолитных пластмассовых корпусов.

При выборе и разработке способа герметизации обычно решаются две задачи, а именно: обеспечивается защита микросхем от дестабилизирующего воздействия климатических факторов атмосферы и одновременно исключается возможное дестабилизирующее влияние самого герметизирующего материала или материалов конструктивных элементов на изделие. В связи с этим необходимо различать понятия внешней и окружающей среды.

Под внешней средой понимается среда, в которой производится хранение и эксплуатация микросхем, под окружающей же средой понимается ограниченная поверхностью герметизирующей конструкции и окружающая герметизируемое изделие среда (рис. 3.12).

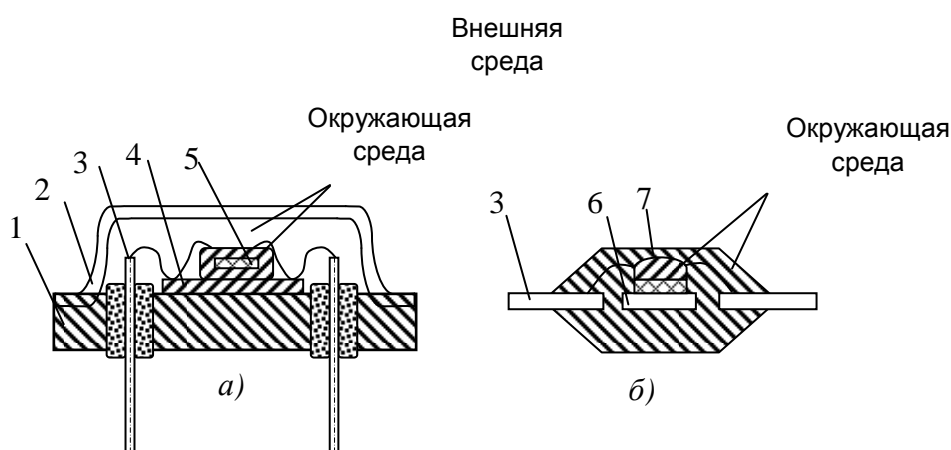


Рис. 3.12. Внешняя и окружающая среда в микроэлектронных изделиях:
а – полый металlostеклянный корпус; *б* – монолитный пластмассовый; 1 – основание; 2 – крышка; 3 – выводы; 4 – подложка; 5 – навесной компонент с герметизирующим покрытием; 6 – кристаллодержатель с интегральной микросхемой и эластичным подслоем; 7 – пластмассовая оболочка

Окружающая среда может быть газообразной (полые корпуса), жидкой (полые корпуса, заполненные, например, теплоотводящей жидкостью или вазелинами) или существовать в виде твердого покрытия (монолитные герметизирующие конструкции).

3.4.2. Корпусная герметизация

Корпуса предназначены для защиты элементов и компонентов ИС от климатических (влага, газы) и механических воздействий и светового облучения. Корпус обеспечивает эффективный отвод тепла от тепловыде-

ляющих элементов и компонентов микросхемы. Металлический корпус осуществляет также экранирование от воздействия электростатических, а в некоторых случаях и магнитных полей. Корпус имеет выводы, с помощью которых микросхему монтируют на печатную плату. Контактные площадки кристалла (платы) интегральной схемы электрически соединены с выводами корпуса.

В зависимости от материалов корпуса делятся на следующие типы (рис. 3.13): металлостеклянные, стеклянные, керамические, металлополимерные, пластмассовые, полимерные.

В металлостеклянных корпусах армирование и крышку выполняют из металла, а выводы изолируют от основания стеклом.

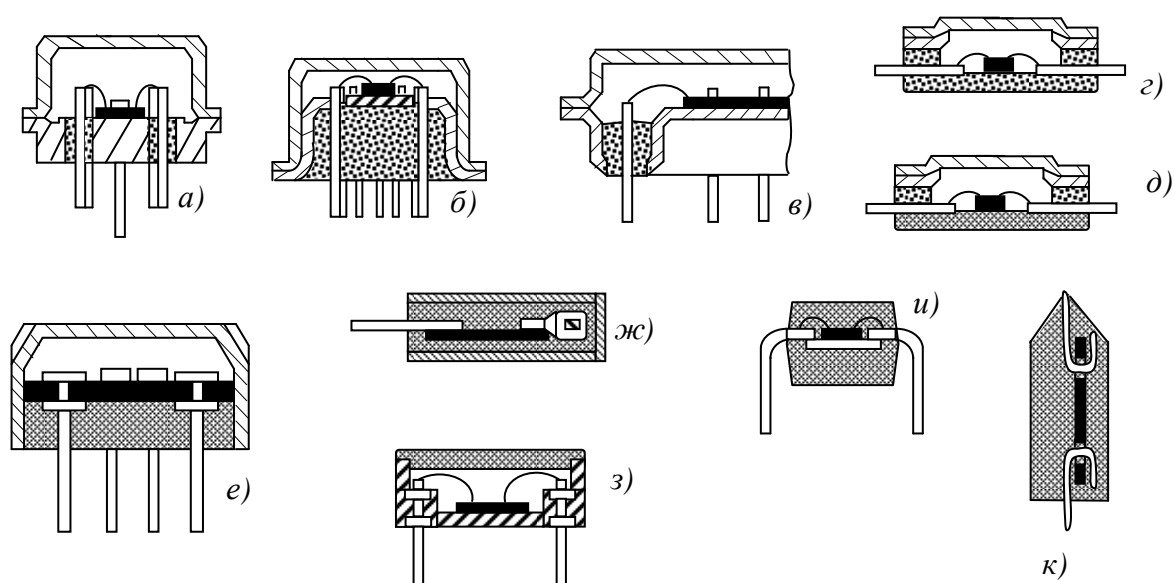


Рис. 3.13. Схемы конструкций корпусов микросхем: *а, б, в* – металлостеклянных; *з* – стеклянного; *д* – керамического; *е, ж* – металлополимерных; *з* – пластмассового; *и, к* – полимерных

Металлокерамические корпуса состоят из керамического основания с выводами и металлической крышки. Так как из-за высокой температуры спекания керамики армировать основание металлическими выводами невозможно, их в специальной технологической рамке впаивают в основание стеклом. Кроме того, к бортику керамического основания стеклом припаяют металлическую рамку, к которой сваркой или пайкой присоединяют металлическую крышку. Так как рамка и крышка должны при пайке хорошо смачиваться припоем на основе олова, их предварительно покрывают тонким слоем никеля, меди или золота. Выводы можно также присоединять к керамическому основанию с помощью проводящих паст.

Стеклянные корпуса более технологичны и состоят из стеклянного основания и металлической или стеклянной крышки. В процессе формовки основание армируют выводами и металлической рамкой, а затем спекают, в результате чего образуется металлостеклянный спай.

В керамических корпусах как крышка, так и основание выполнены из керамики. Это позволяет монтировать внешние выводы и выполнять герметизацию пайкой стеклом без рамки, что упрощает конструкцию.

Во избежание термических напряжений и растрескивания рассмотренные корпуса изготавливают из материалов, имеющих близкие по значению температурные коэффициенты линейного расширения – ТКЛР. Стекло, кроме того, в процессе сборки и герметизации приборов и ИМС не должно размягчаться при нагревании. Наиболее удачными парами материалов являются железо-никель-кобальтовый сплав 29НК (ковар) – стекло С48-2 или С49-2 (температуры размягчения 570 °С и 585 °С соответственно), железо-никель-медный сплав 47НД – стекло С89-8 или С90-1 (температуры размягчения 530 °С и 550 °С соответственно); керамика 22ХС или «Поликор» – стекло С72-4 (температура размягчения около 560 °С). При получении спаев стекло – металл металлическую поверхность предварительно оксидируют.

В пластмассовых корпусах крышки приклеивают к основаниям специальными клеями. Этот вариант герметизации применяют только при изготовлении малоответственных ИМС, так как он не обеспечивает вакуумплотную защиту.

К корпусу ИС предъявляется ряд требований, обусловленных ее назначением и электрическими параметрами, особенностями сборки как самих ИС, так и сборки ИС на печатных платах, назначением, особенностями конструкции и условиями эксплуатации аппаратуры, в которой используются ИС. К этим требованиям относятся:

- герметичность конструкции;
- высокая надежность;
- малые габариты;
- эффективный теплоотвод;
- малые паразитные электрические параметры выводов (активное сопротивление, индуктивность и емкость);
- высокая механическая прочность;
- простота монтажа на печатных платах;
- легкость съема с печатной платы при необходимости ремонта;
- низкая стоимость;
- защита от светового облучения.

К корпусу могут предъявляться требования, обусловленные специфическим назначением микросхемы: электростатическое и (или) магнитное экранирование, обеспечение возможности воздействия света при обработке оптической информации или при стирании информации в программируемых запоминающих устройствах ультрафиолетовым облучением и др.

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к корпусу:

- механическая прочность и герметичность, обеспечивающие надежную защиту микросхемы от воздействия окружающей среды и механических повреждений;
- высокая теплопроводность;
- возможность надежного электрического соединения контактных площадок микросхем с выводами корпуса;
- возможность надежного крепления микросхемы при монтаже в аппаратуре;
- простота изготовления и герметизации;
- низкая стоимость.

Первые два требования обычно находятся в противоречии с двумя последними. Интенсивность отказов ИС в трудоемких и дорогостоящих керамических корпусах в 3 – 10 раз ниже, чем в самых дешевых полимерных корпусах. Высокая интенсивность отказов микросхем в полимерных корпусах объясняется их низкой влагостойкостью. Молекулы воды, размеры которых порядка 3 Å, проникают внутрь корпуса не только по границам раздела корпус – вывод, но и через толщу полимера.

Рассмотрим проблему обеспечения герметичности корпуса. Элементы и компоненты микросхем, предназначенных для работы в условиях повышенной влажности и в атмосфере различных газовых сред, следует помещать в корпуса, обеспечивающие полную герметизацию. Герметичность корпуса достигается применением непроницаемых для влаги и газов материалов и вакуум-плотным соединением этих материалов.

Герметичность – это способность замкнутой конструкции не пропускать газ (жидкость). Герметичность характеризуется допустимой утечкой, измеряемой в единицах потока. Основным критерий герметичности корпуса – скорость утечки гелия при разности давлений снаружи и внутри корпуса 10^5 Па. Корпус высокого качества характеризуется скоростью утечки гелия не более $1 \cdot 10^{-8}$ см³/с.

В конструкциях корпусов широко используются соединения металлов с металлами, стеклом, керамикой и полимерами, керамики с керамикой и стеклом, стекла со стеклом и др. Высокотемпературные стекла и керами-

ку обычно соединяют с помощью промежуточного слоя легкоплавкого стекла. Определенные трудности возникают при образовании вакуум-плотных соединений металлов с керамикой и стеклом. Они обусловлены различными ТКЛР и коэффициентами теплопроводности.

При изготовлении корпуса, сборке микросхемы, эксплуатации детали конструкции подвергаются большим перепадам температуры. Из-за разницы ТКЛР и коэффициентов теплопроводности (разная скорость нагрева деталей) в элементах конструкции возникают большие механические напряжения, приводящие к растрескиванию соединений и нарушению герметичности.

Разница ТКЛР соединяемых материалов должна составлять не более $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Температурные коэффициенты линейного расширения материалов, применяемых при изготовлении герметичных корпусов, представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры материалов, применяемых для изготовления корпусов

Материал	Состав, %	ТКЛР, $\cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м \cdot °С)
Алюминиевая керамика	94 – 96 Al ₂ O ₃ , 6 – 4 MgO	6,4 – 7,9	19,6
Бериллиевая керамика	97 – 99 BeO	7,0	208
Боросиликатное стекло	–	4,6	1,1
Припайное стекло	58 PbO, 12 Ba ₂ O ₃ , 20 SiO ₂ , 8 ZnO, 2 – прочие окислы	4,0 – 12,0	–
Ковар	18 Co, 28 Ni, 54 Fe	4,7 – 5,5	16,7
Керамвар	25 Co, 27 Ni, 48 Fe	8,1	–
Припой	61 Sn, 39 Pb	21,5	–
Пластмассы	–	20 – 200	0,3 – 2,0

Для согласования ТКЛР металла со стеклом или керамикой используются буферные материалы с промежуточным значением ТКЛР. В роли буфера широко применяют так называемые припойные стекла, имеющие сравнительно невысокую температуру размягчения (~500 °С). При нагреве припойное стекло размягчается и смачивает соединяемые поверхности подобно тому, как припой смачивает соединяемые металлические детали. Температурный коэффициент линейного расширения припойного стекла находится в пределах $(4 – 12) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Его величина зависит от времени и температуры термообработки в процессе соединения материалов. Это обусловлено тем, что размеры кристаллов, образующихся после расплавления

стекла, зависят от температуры и длительности термообработки. Кристаллизующийся спай обеспечивает высокую механическую прочность соединяемых материалов. Допускается многократный изгиб выводов без нарушения герметизации. Возникающие на поверхности стекла микротрещины оканчиваются на гранях приповерхностных кристаллов и не распространяются вглубь спаев.

Для образования герметичных соединений керамики с керамикой и керамики с металлом используют также покрытые припоем слои вожженого металла (серебра) в керамику. Сочетания керамики, стекла и металлов с пластмассами не полностью обеспечивают герметичность соединений вследствие большой разницы в ТКЛР (см. табл. 3.3) и высокой влагопроницаемости пластмасс. Эпоксидные, фенольные и силиконовые пластмассы используются только в корпусах микросхем, предназначенных для работы в умеренных условиях (влажность менее 85 %).

В зависимости от конструкции корпуса в практике производства находят применение следующие способы герметизации: холодная сварка давлением, электроконтактная конденсаторная сварка, пайка, заливка компаундами, склеивание, опрессовка компаундами.

В зависимости от применяемых материалов и конструктивных особенностей микросхемы используют следующие методы соединений:

1. Сварка:

- 1.1. Холодная сварка.
- 1.2. Электроконтактная конденсаторная сварка (ЭКС).
- 1.3. Аргонно-дуговая сварка.
- 1.4. Микроплазменная сварка.
- 1.5. Термокомпрессионная сварка.
- 1.6. Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИП).
- 1.7. Сварка сдвоенным (расщепленным) электродом.
- 1.8. Ультразвуковая сварка.
- 1.9. Роликовая сварка.
- 1.10. Электронно-лучевая сварка.

2. Пайка:

- 2.1. Пайка припоями.
- 2.2. Пайка стеклом.

3. Заливка.

4. Склеивание.

5. Опрессовка.

6. Капсулирование.

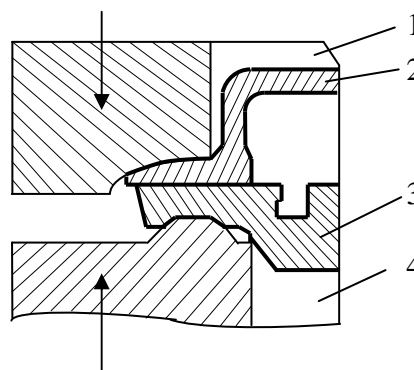
Часть приведенных методов герметизации микросхем применяются при присоединении электродных выводов и рассмотрены в предыдущих пунктах. Приведем более подробный анализ наиболее распространенных в настоящее время других методов.

3.4.3. Сварка

3.4.3.1. Холодная сварка. Это процесс получения неразъемного соединения, возникающего в результате пластической деформации двух деталей (металлостеклянный корпус). При сближении свариваемых деталей на расстояние действия межатомных сил между поверхностными атомами образуются металлические связи. Степень деформации свариваемых деталей должна быть 75 – 85 %, т.е. их суммарная толщина после сварки составляет 15 – 25 % от первоначальной. Усилие сжатия при холодной сварке зависит от пластичности материалов соединяемых деталей и контактной площади рабочего инструмента (пуансона), обычно выполняемого из инструментальной стали X12, ХВГ, ШХ13 или твердого сплава ВК20. Так, для соединения деталей из меди М0 или М1 удельное давление должно быть 1500 – 1800 Н/мм², а для соединения деталей из меди с коваровыми, стальными изделиями или элементами из сплава 47НД – 2000 – 2500 Н/мм².

В зависимости от свойств свариваемых материалов применяют двухстороннюю либо одностороннюю холодную сварку. Двусторонней сваркой соединяют детали из материалов примерно одинаковой пластичности, а односторонней – различной пластичности. Причем в первом случае (рис. 3.14) пуансоны одновременно деформируют фланцы крышки и корпуса и поэтому во избежание подрезки более пластичного фланца крышки воздействующий на него верхний пуансон должен иметь плоскую широкую торцевую поверхность.

Рис. 3.14. Односторонняя холодная сварка корпуса ИМС:
1, 4 – верхний и нижний пуансоны; 2, 3 – крышка и основание корпуса



Холодная сварка проста, доступна и применяется в основном для герметизации металлостеклянных корпусов транзисторов и диодов средней и большой мощности, а также корпусов ИМС из металлов, обладающих высокой теплопроводностью.

Специфическим условием получения качественного герметичного соединения является высокая пластичность материала, по крайней мере, одной из соединяемых деталей. Обычно баллон (корпус ИМС) выполняют из меди М1, а ножку – из ковара, обеспечивающего хорошее согласование ТКЛР со стеклянными изоляторами коваровых выводов. Поскольку холодная сварка связана со значительной деформацией (относительная деформация до 80 %), толщина соединяемых деталей должна быть не менее 0,3 мм, а на ножке должна выполняться защитная канавка, разгружающая хрупкие стеклянные изоляторы. Коваровую ножку делают достаточно толстой (1 мм), чтобы обеспечить необходимую прочность и герметичность стеклянных изоляторов.

Важным условием получения качественного шва является чистота и отсутствие окислов на соединяемых поверхностях. Целесообразно медный баллон предварительно никелировать. В процессе сдавливания хрупкая никелевая пленка разрушается, обнажая чистую поверхность меди.

3.4.3.2. Электроконтактная конденсаторная сварка (ЭКС). Это процесс получения неразъемного соединения нагревом свариваемых кромок до пластичного состояния и их последующим сжатием (осадкой). Для нагрева свариваемых кромок через них пропускают электрический ток. Кроме сварочного тока, который обычно составляет несколько десятков тысяч ампер, и длительности его прохождения основным параметром электроконтактной сварки является усилие сжатия электродов, которое в зависимости от свариваемых материалов составляет 1 – 20 кН. Монолитные электроды изготавливают из бронзы БрБ2, БрХБ или БрНБТ; основание – из меди М1, М2 или М3, а рабочую часть – из сплава ВМ.

Наиболее распространена электроконтактная сварка неподвижными электродами, при которой соединяемые детали устанавливают в специальное гнездо нижнего электрода, а верхний электрод при опускании центрирует их и сжимает с удельным давлением 50 – 100 Н/мм². При роликовой электроконтактной сварке соединяемые детали перемещаются между двумя вращающимися роликами.

Электроконтактной сваркой чаще всего герметизируют корпуса полупроводниковых приборов и микросхем круглой и прямоугольной формы со штыревыми выводами.

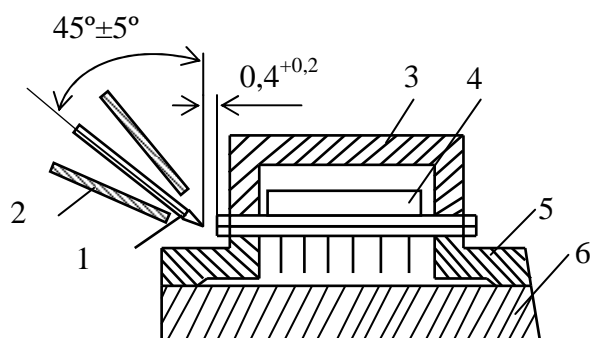
Для герметизации ИМС широко используют корпуса с боковыми выводами и стеклянными или керамическими изоляторами, расположенными непосредственно под зоной герметизации или вблизи нее. В этом случае герметизация с приложением давления невозможна, поэтому применяют ультразвуковую, электронно-лучевую или лазерную сварку, а также аргонно-дуговую.

Электроконтактная конденсаторная сварка допускает соединение тонкостенных (0,15 мм) баллона и ножки, получаемых штамповкой. В круглом металлоглазном корпусе прочность и герметичность выводов увеличены за счет заполнения стеклом полый тонкостенной коваровой ножки. Глубоко расположенный сварной шов исключает возможность выплескивания металла внутрь корпуса. Материал ножки – ковар, баллона – ковар, никель, сталь 10 (с защитным покрытием).

Методом конденсаторной сварки герметизируют также металлоглазные корпуса квадратной и прямоугольной формы.

3.4.3.3. Аргонно-дуговая сварка. При аргонно-дуговой сварке, которая является одним из видов электродуговой, аргон, обтекающий электрод и зону соединения, предохраняет расплавленный металл от воздействия кислорода и азота, содержащихся в воздухе. Неплавящийся вольфрамовый электрод служит для возбуждения и поддержания горения дуги. При герметизации этим способом (рис. 3.15) кромки крышки и основания корпуса микросхемы под воздействием теплоты электрической дуги оплавляются с образованием сварочной ванны. Охлаждаясь, металл в месте сварки кристаллизуется, и образуется сварочный шов.

Рис. 3.15. Взаимное расположение электрода и корпуса ИМС при аргонно-дуговой сварке:
1 – электрод; 2 – сопло;
3, 5 – теплоотводы крышки и основания;
4 – корпус микросхемы; 6 – плата



Основное преимущество аргонно-дуговой сварки – возможность местного (локального) нагрева деталей, а недостаток – повышенные требования к точности их совмещения и изготовления оснастки. Аргонно-дуговой сваркой герметизируют металлоглазные корпуса со штыревыми выводами, когда периметр соединения больше 50 мкм, а суммарная толщина фланцев – 0,2 – 0,6 мм.

3.4.3.4. Микроплазменная сварка. Является разновидностью аргонно-дуговой, локализация и стабилизация плазменного луча достигается с помощью сопла 2 (рис. 3.16) с диаметром выходного отверстия менее 1 мм.

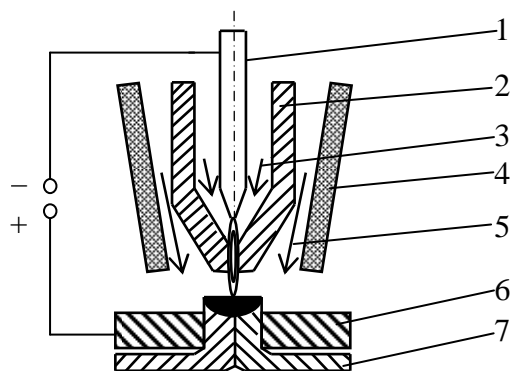


Рис. 3.16. Микроплазменная горелка: 1 – электрод; 2 – сопло; 3, 5 – плазмообразующий и защитный газы; 4 – корпус плазмотрона; 6 – теплоотвод; 7 – фланцы корпуса микросхемы

Так как возбуждение дугового разряда между электродом 1 и свариваемым изделием (фланцы корпуса 7 микросхемы) через узкое сопло невозможно, вначале возбуждают вспомогательную дугу между электродом 1 и соплом 2, включенным через токоограничительный резистор. Образующаяся при этом низкотемпературная плазма возбуждает новую дугу между электродом и изделием. При одинаковых полярностях потенциалов изделия и сопла и электрода вспомогательный разряд шунтируется и гаснет. Ток основной дуги составляет 1,5 – 30 А, ток вспомогательной – до 6 А. Плазмообразующим и защитным газом чаще всего служит аргон.

3.4.3.5. Роликовая сварка. Ею можно сваривать корпуса большого размера и любой конфигурации. Одним из вариантов сборки корпуса является сварка плоских корпусов двумя роликами, которые прокатываются по одной поверхности на небольшом расстоянии друг от друга. В этом случае сварка ведется по принципу односторонней контактной сварки с параллельным расположением электродов (роликов).

3.4.3.6. Электронно-лучевая сварка. Этот вид сварки для герметизации стали применять сравнительно недавно. Однако этот способ будет, безусловно, широко использоваться благодаря ряду преимуществ перед другими способами герметизации.

При электронно-лучевой сварке зазор между соединяемыми изделиями должен быть минимальным, например, при сварке деталей толщиной 0,3 мм – не более 0,02 мм. Для уменьшения допусков на размеры зазора и воздействия сварки на металлоглазненные спаи необходимо разрабатывать специальную конструкцию корпусов и проводить подготовку кромок. Наиболее рациональная форма кромок корпуса под сварку приведена на рис. 3.17. При такой форме соединение происходит за счет взаимного расплавления металла крышки и основания. Глубина проплавления может достигать 0,5 мм, что обеспечивает герметичность изделия.

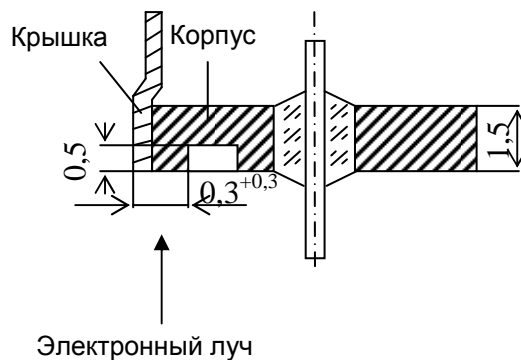


Рис. 3.17. Форма кромок металлоглазненного корпуса под электронно-лучевую сварку

3.4.4. Пайка

Герметизацию пайкой применяют в стеклянных и керамических корпусах с плоскими планарными выводами. В первом случае стеклянное основание получают в форме (прессование стеклянного порошка с последующим оплавлением) одновременно с системой выводов и коваровой рамкой. Во втором случае вначале изготавливают керамическое основание с пазами под выводы, а затем выполняют пайку стеклом коваровых выводов и рамки. В обоих случаях для облегчения изготовления основания корпуса плоские выводы объединены в общую систему с помощью технологической рамки. Впоследствии после выполнения внутреннего монтажа (перед электрическим контролем) технологическая рамка отрезается штампом, вследствие чего разобьются выводы микросхемы.

Золотое покрытие на коваровой рамке позволяет получать надежное паяное соединение с крышкой корпуса (никель, никелированная медь и др.). При герметизации на коваровую рамку укладывают рамку из припоя ПОС-61 толщиной 0,15 – 0,2 мм, устанавливают крышку и корпус с микросхемой помещают на нагреватель, снабженный вибратором (50 Гц). Наличие бортика по контуру рамки исключает проникновение припоя внутрь корпуса.

Для пайки корпусов применяют автоматические и полуавтоматические установки. На установке АГМП-1 (автомат герметизации микросхем пайкой) пайку выполняют в среде инертного газа. Корпуса устанавливают в кассеты, обеспечивающие регулируемое усилие прижима на крышку корпуса в пределах 3 – 10 г. Кассеты, содержащие по 10 корпусов каждая, помещают в магазин (емкость магазина 20 кассет). Расплавление рамки припоя осуществляется импульсным нагревом в диапазоне регулируемых температур $(150 \dots 450) \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Во избежание термоудара изделие подвергают предварительному нагреву в пределах $(100 \dots 200) \pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$. Время пайки (регулируемое) – 5 – 15 с с дискретностью 1 с.

Вибрация может быть наложена со смещением по времени от начала пайки на 2 – 12 с. Расход инертного газа давлением 1,5 – 2 ат составляет 0,5 м³/ч. Производительность установки – 450 корпусов в час.

Пайка припоями выполняется при температурах 170 – 350 °С. Перед пайкой изделие облуживают расплавленным припоем или помещают припой между соединяемыми деталями в виде прокладок, таблеток, колец и др. Далее корпуса герметизируют, применяя различные способы нагрева, необходимые для оплавления припоя.

При кондуктивном методе нагрева детали корпуса ИМС с прокладкой припоя между ними, предварительно обработанной раствором или расплавом флюса (канифоли), зажимают с небольшим усилием между двумя нагревательными плитами. Недостаток этого метода – значительный нагрев основания корпуса, на котором расположена ИМС, а также необходимость применения флюса, остатки которого трудно полностью удалить и они могут попасть внутрь корпуса.

При обдуве струей горячего газа (азота или аргона) корпуса со стороны крышки применение флюса исключается, так как пайка проводится в инертной атмосфере.

Конвективный нагрев применяют при крупносерийном и массовом производстве. Собранные детали корпусов сжимают и фиксируют на все время пайки, которую проводят в конвейерных печах с защитной средой. Скорость движения конвейера и температурный режим печи (подъем температуры до заданной, выдержка и охлаждение) обеспечивают оптимальный цикл пайки.

Этот метод пайки достаточно прост и доступен, однако из-за высокой теплопроводности припоя необходимо нагревать весь корпус. Кроме того, прочность паяного шва обычно ниже прочности соединяемых материалов (меди, никеля и особенно кобальта).

Пайку стеклом применяют не только для контакта кристаллов с корпусами и крепления внешних выводов к керамическим основаниям, но и для соединения керамических крышек с основаниями. Это значительно упрощает конструкцию корпусов и сборку ИМС. При такой пайке в качестве припоев используют низкотемпературные стекла.

3.4.5. Заливка

В металлополимерных корпусах герметизацию микросхемы и изоляцию выводов от корпуса осуществляют путем заливки металлического корпуса эпоксидным компаундом. В конструкции, изображенной на рис. 3.13, *е*, корпус представляет собой дюралевый колпачок квадратной

или прямоугольной формы, в который устанавливается керамическая подложка с микросхемой и торцевыми выводами круглого сечения. Специально сформированные выступы на внутренней поверхности колпачка удерживают подложку на некотором расстоянии от дна.

В другой конструкции (см. рис. 3.13, *ж*) в корпусе типа «пенал» располагается ситалловая подложка с тонкопленочной гибридной схемой, изолированной от стенок корпуса. В данном случае активные навесные приборы помещены в кассету из алюминиевой фольги (с изолированной прокладкой), которая приклеена к подложке. Такая конструкция обеспечивает дополнительную герметизацию активных приборов и защиту их от непосредственного воздействия компаунда.

В металлополимерных корпусах целесообразно использовать свободную заливку компаундами холодного отверждения, которые обеспечивают относительно малую усадку, а время выдержки для полимеризации не является лимитирующим фактором.

3.4.6. Склеивание

Один из вариантов пластмассовых корпусов показан на рис. 3.13, *з*. Основание и крышка корпуса изготовлены из стеклопластика АГ-4 методом прессования. Основание армировано торцевыми выводами круглого сечения. Герметизацию осуществляют путем склеивания крышки с основанием.

Надежная герметизация изделий для защиты от влияния внешней среды в корпусах этого типа определяется тремя основными параметрами: герметичностью выводов в основании корпуса, герметичностью соединения крышки с основанием и скоростью натекания паров воды во внутренний объем при их диффузии через стенки корпуса (т.е. влажностными параметрами материала корпуса).

Пластмассовые корпуса, выполненные из разных материалов, резко отличаются по своим защитным свойствам. Нарушение герметичности корпусов в основном происходит в узле вывод – основание из-за механического разрушения пластмассы вокруг вывода вследствие возникновения внутренних напряжений. Для уменьшения этих напряжений необходимо, чтобы материал вывода имел как можно большее значение ТКЛР, а материал корпуса – минимальное значение ТКЛР и такие значения модуля упругости, которые обеспечивали бы необходимую жесткость конструкции и одновременно некоторую податливость материала при воздействии механических нагрузок (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Сравнительные характеристики некоторых металлов и пластмасс

Материал	ТКЛР, К ⁻¹	Модуль упругости, Н/м ²
Ковар	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{11}$
Медь	$16 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{11}$
Латунь	$18 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{10}$
Пластмасса К124-38	$(19 \dots 36) \cdot 10^{-6}$	$7,15 \cdot 10^9$
Пластмасса В4-70	$37 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^9$
ЭФП-60АК	$48 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^9$

Этим требованиям в большей степени удовлетворяет латунь. Ее ТКЛР близок к ТКЛР материалов марок К124-38 и В4-70, которые получили наиболее широкое применение при изготовлении пластмассовых корпусов.

3.4.7. Опрессовка компаундами

Наиболее дешевыми являются полимерные корпуса, получаемые путем опрессовки микросхемы компаундом. Полимерные корпуса используют в основном для толсто пленочных гибридных и полупроводниковых интегральных микросхем, работающих в нормальных климатических условиях.

Опрессовку микросхем осуществляют методом литья под давлением во временные формы компаундов горячего отверждения. Ввиду давления и высокой температуры требуется предварительная защита собранного узла (особенно проволочных перемычек) с помощью компаундов холодного отверждения.

На рис. 3.13, и показан вариант микросхемы в полимерном корпусе, где кристалл механически связан с контактной рамкой посредством ситалловой подложки. Ситалловую подложку приклеивают к системе плоских выводов, связанных технологической рамкой, а кристалл наклеивают на ситалловую подложку. Другой вариант заключается в том, что один из плоских выводов изготавливают более длинным и его конец находится в центре системы выводов. На этот вывод непосредственно монтируют кристалл.

После монтажа проволочных перемычек между контактными площадками кристалла и выводами корпуса производят предварительную защиту кристалла с перемычками каплей компаунда. Когда отверждение компаунда завершено, узел направляется на заливку под давлением. После герметизации технологическая рамка отделяется в штампе, а выводы формируются.

Наилучшими герметизирующими свойствами обладают компаунды на фенольно-эпоксидной основе. Они характеризуются минимальным содержанием загрязняющих ионов, имеют температуру стеклования выше 150 °С и усадку в форме не более 0,6 – 0,8 %. В результате прессования в материале корпуса имеют место незначительные сжимающие усилия, что уменьшает интенсивность отказов из-за тепловых деформаций.

Прессование (заливку под давлением) выполняют на механизированных или полуавтоматических установках при усилии прессования до 2000 кг и скорости впуска материала до 20 мм/с. Время выдержки изделий под давлением прессования – 20 – 40 с, а время выдержки в замкнутой форме при температуре прессования (вне пресса) – от 3 до 5 мин.

Для толсто пленочных микросхем присоединение плоских выводов контактной рамки можно осуществлять путем введения их в отверстия керамической платы, загибки их на контактные площадки платы и последующего облуживания методом погружения (см. рис. 3.13, к).

Выводы в технологических рамках целесообразно выполнять в отрезках ленты длиной до 250 мм на несколько микросхем. Это упрощает механизацию и автоматизацию монтажа, а также загрузку многоместных форм для заливки под давлением.

Большой экономический эффект дает метод беспроводного монтажа полупроводниковых кристаллов на контактной рамке, позволяющий использовать групповые методы присоединения выводов.

3.4.8. Капсулирование

В настоящее время капсулирование широко используется для герметизации элементной базы и блоков МЭУ. В зависимости от особенностей конструкции изделий, в частности, расположения выводов существуют два вида корпусов с использованием металлической капсулы (такие корпуса часто называют металлополимерными):

- с вертикальным расположением выводов (рис. 3.18, а) – в этом случае поверхность изделия контактирует с герметизирующим компаундом;
- с выводами в одной плоскости с подложкой (см. рис. 3.18, б, в) – в этом случае герметизирующий материал не контактирует с поверхностью изделия.

Наиболее широкое распространение получили корпуса первого вида, где надежная герметизация изделий от воздействий внешней среды опре-

деляется герметичностью узлов вывод – компаунд (подложка) и капсула – компаунд, а также адгезией компаунда к поверхности платы.

Большинство штыревых выводов в рассматриваемых конструкциях изготавливается из луженых меди или латуни, к которым адгезия герметизирующих полимерных материалов, даже эпоксидных, недостаточно велика. После воздействия на корпуса термоциклов нередко наблюдается отслаивание компаунда от поверхности выводов. Поэтому герметичность металлополимерного корпуса в целом во многом определяется герметичностью выводов. Качественная металлизация площадки платы около выводов и хорошее лужение обеспечивают герметичность корпусов.

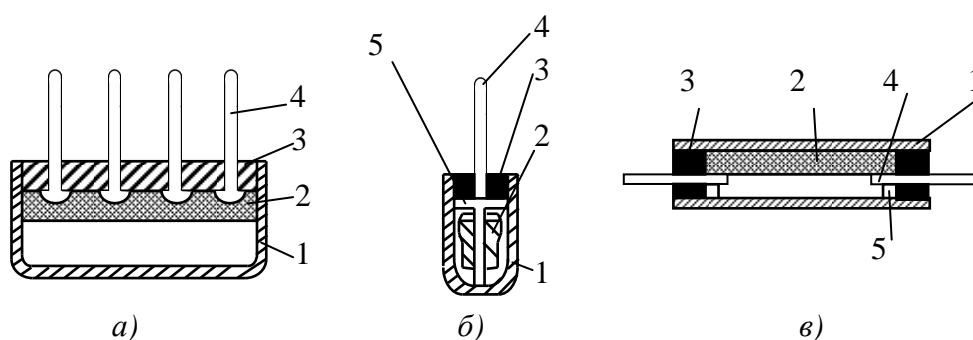


Рис. 3.18. Примеры герметизации способом капсулирования:
 а – изделие со штыревыми выводами; б – односторонний пенальный корпус;
 в – двусторонний; 1 – капсула; 2 – подложка; 3 – герметизирующий компаунд;
 4 – вывод; 5 – прокладка

Герметичность узла капсула – компаунд определяется механическими характеристиками соединяемых материалов и адгезией герметизирующего компаунда к поверхности капсулы. Увеличение модуля упругости одного из материалов приводит к увеличению механических напряжений и нарушению герметичности корпусов.

В узле подложка – компаунд при большой разнице ТКЛР материалов и большом значении модуля упругости компаунда могут появиться трещины в компаунде и подложке. Уменьшение адгезии герметизирующего компаунда к поверхности подложки уменьшает механические напряжения в компаунде и подложке, однако существенно повышаются напряжения на границе компаунд – капсула, что приводит к резкому снижению герметичности этого узла. Поэтому особенно большое внимание следует обращать на качество очистки подложек перед герметизацией изделий.

При герметизации капсулированием изделие помещается в корпус (капсулу) выводами наружу. Свободный торец капсулы и выводы залива-

ются компаундом. При использовании металлических капсул (чаще анодированный алюминий) влагостойкость корпусов резко возрастает, поэтому часто под капсулированием понимается герметизация в металлополимерные корпуса. Для герметизации изделий микроэлектроники часто применяются металлополимерные корпуса из жидкого компаунда ЭК-16 Б.

Процесс герметизации заливочными компаундами, в частности, компаундом ЭК-16 Б недостаточно пригоден для организации автоматизированного производства малогабаритных изделий, герметизация которых требует небольших количеств компаунда. Это объясняется трудностью дозировки небольших порций компаунда ($0,1 - 0,2 \text{ см}^3$) и низкой жизнеспособностью компаунда.

Эффективнее применять порошкообразные компаунды. В этом случае появляется возможность осуществлять предварительную дозировку компаунда путем изготовления калиброванных по массе и размерам таблеток. Герметизация порошкообразными компаундами в виде таблеток позволяет автоматизировать процесс сборки и герметизации изделий. Схема этого процесса состоит в следующем: укладка подложек с изделием в капсулу, укладка в свободный торец капсулы таблетки, расплавление таблетки и ее отверждение.

Прессование таблеток производится при давлении $45 - 50 \text{ МПа}$. В зависимости от конструкции изделия таблетки могут иметь разнообразную форму. Особенно высокие требования к растекаемости таблеток предъявляются при сложной конструкции изделий. Для герметизации таких изделий готовятся таблетки сложной формы с выборкой под выводы, при этом зазор между таблеткой и капсулой должен быть минимальным.

3.4.9. Бескорпусная герметизация

Выбор конструктивно-технологического варианта исполнения бескорпусной защиты определяется назначением и требованиями, предъявленными к защищаемой микросхеме. Например, если предусматривается защита сборочной единицы, в состав которой входит бескорпусная микросхема, то предварительно проводится лишь промежуточная технологическая защита микросхемы, обеспечивающая стабильность ее параметров на этапе изготовления. Если же бескорпусная микросхема выпускается в виде самостоятельного изделия, то ее защита осуществляется с учетом всего комплекса климатических и механических воздействий, предусмотренных техническими условиями эксплуатации на данную микросхему.

Особые требования в случае бескорпусной защиты предъявляются к химической частоте и термостойкости герметизирующих покрытий, к их физико-механическим свойствам, влагопоглощению. Кроме того, герметизирующие материалы должны обеспечивать не только высокую жесткость создаваемой конструкции, но и устойчивость ее к различным видам воздействий.

Для бескорпусной защиты полупроводниковых структур используются в основном неорганические и органические полимерные материалы. Более высокой надежностью характеризуются покрытия из неорганических материалов, однако бескорпусная защита на основе органических материалов гораздо дешевле.

Бескорпусную герметизацию выполняют обволакиванием герметиком, заливкой полимером, а также опрессовкой расплавленным термопластическим или термореактивным материалом.

Обволакивание – наиболее простой способ, при котором каплю герметика наносят на сборку или кратковременно погружают сборку в герметик. Этот способ используют для предварительной защиты изделий перед заливкой или опрессовкой.

Заливку выполняют в специальные литьевые формы многократного использования из силиконовой резины. Заливка может быть свободной или в вакууме.

Литьевое прессование является наиболее совершенным способом создания бескорпусных оболочек, применяемым в серийном производстве. Этот способ основан на использовании разъемных пресс-форм и пресс-порошков, получаемых из эпоксидных и кремнийорганических смол или их композиций.

В настоящее время наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалам монолитных корпусов, образуемых литьевым прессованием, эпоксидные пресс-порошки типа «Премикс».

Технологический цикл при герметизации изделий литьевым прессованием включает следующие операции:

- размещение изделий в специальной пресс-форме;
- заполнение индивидуальных полостей с изделиями в пресс-форме герметизирующим расплавленным составом на специальных пресс-установках при сравнительно низких давлениях;
- выдержка определенное время под давлением при повышенной температуре для отверждения материала;

- разъем пресс-формы и извлечение загерметизированных изделий;
- удаление литников.

Этим способом можно одновременно герметизировать несколько сотен изделий.

Герметизация литьевым прессованием стала широко применяться после появления термореактивных смол, прессуемых при низких давлениях. Использование небольших давлений дает возможность герметизировать изделия, чувствительные к механическим воздействиям – полупроводниковые приборы и микросхемы с гибким проволочным монтажом, миниатюрные изделия с проволочной обмоткой и т.д.

Герметизирующий материал (пресс-порошок) используется в виде предварительно изготовленных таблеток или гранул, что способствует повышению качества опрессовки, ликвидирует операцию взвешивания порошка, упрощает операцию дозировки материала. Для получения порошков преимущественно используются эпоксидные смолы, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с другими смолами. Материалы на основе этих смол обеспечивают:

- высокие влагозащитные свойства герметизирующих оболочек;
- отверждение материала после расплавления порошка при сравнительно низких температурах;
- высокую устойчивость к воздействию механических нагрузок;
- возможность автоматизации производственных процессов.

В зависимости от типа порошкового материала герметизация производится при температурах 130 – 160 °С. Время выдержки в пресс-форме после заполнения ее герметизирующим материалом составляет 3 – 5 мин, а общий цикл герметизации с учетом сборки пресс-формы, укладки в нее кассет с изделиями и т.д. не превышает 10 мин.

Несмотря на то, что для герметизации литьевым прессованием используется сравнительно дорогое оборудование и сложные пресс-формы, являющиеся неотъемлемой частью оборудования, этот способ, когда технически возможно и выгодно, следует использовать для изготовления изделий массового производства.

Повысить эксплуатационные свойства изделий можно и при их герметизации порошковыми материалами на основе обычных технически чистых эпоксидных смол. Для этой цели часто используют многослойные, в частности, двухслойные герметизирующие оболочки. В этом случае, как

правило, нижний слой, прилегающий к поверхности изделия, выполняется из эластичных и химически чистых материалов (например, кремнийорганический каучук), верхний слой – из жестких и механически прочных материалов.

При комбинированной герметизации предварительно изготавливают крышку в виде металлического колпачка, в которую устанавливают сборку с выводами, заливая их компаундом. Так обычно герметизируют толсто-пленочные гибридные схемы невысокой степени интеграции. Основные материалы, применяемые при бескорпусной герметизации, представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Материалы для бескорпусной герметизации и способы их нанесения

Изделие	Назначение герметизации	Герметизирующие материалы	Способы нанесения материалов
Полупроводниковые приборы и ИС	Стабилизация параметров на стадии производства	SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , фосфорно-силикатные и боросиликатные стекла	Термическое окисление, пиролиз, азотирование
	Герметизация изделий бытового и общепромышленного назначения	Компаунд ЭКМ, эмали ЛЩ-97, ЭП-91	Погружение, нанесение с иглы
Тонкопленочные ИС	Стабилизация параметров на стадии производства	SiO ₂ , GeO, легкоплавкие халькогенидные стекла	Вакуумное напыление
	Герметизация изделий бытового и общепромышленного назначения	Лаки ФП-525, УР-231, эмаль ФП-545	Распыление из пульверизатора, погружение, полив
		Эластичные компаунды типа «Виксинт», КТ-102	Заливка
Толсто-пленочные ИС	Герметизация изделий бытового и общепромышленного назначения	Тиксотропный компаунд Ф-47	Обволакивание погружением с механической вибрацией
		Порошковые компаунды ПЭП-177, ПЭК-19	Обволакивание напылением в электростатическом поле, вихревое напыление

3.5. Контрольные вопросы к главе 3

3.1. Перечислите основные сборочные операции, применяемые при изготовлении микросхем, микропроцессоров и микросборок.

3.2. Для каких целей перед операцией разделения пластин на кристаллы (или подложек на модули) производится зондовый контроль микросхем с отбраковкой? Как он осуществляется технически?

3.3. Классифицируйте методы скрайбирования.

3.4. Приведите преимущества и недостатки скрайбирования алмазным резцом.

3.5. Укажите преимущества и недостатки скрайбирования лазерным лучом.

3.6. Почему арсенид галлия нельзя скрайбировать лазерным лучом?

3.7. Опишите процесс ломки пластин на кристаллы с помощью валика.

3.8. В чем состоит сущность способа разламывания пластин с помощью гибкой ленты?

3.9. Охарактеризуйте процесс ломки пластин на кристаллы на стальной полусфере. Укажите достоинства и недостатки этого метода.

3.10. В каких случаях для разделения пластин на кристаллы применяются специальные способы резки – алмазным диском или ультразвуковым методом? Охарактеризуйте эти методы.

3.11. Перечислите методы присоединения кристаллов к основанию корпуса или на подложку. Что следует учесть при выборе способа крепления?

3.12. Какое основное требование предъявляется к операции присоединения кристалла к основанию корпуса?

3.13. Что такое пайка? Поясните особенность процесса пайки.

3.14. Поясните сущность процесса пайки. В каком виде применяют припой в процессе пайки?

3.15. Классифицируйте припои по температуре плавления. Охарактеризуйте добавки, применяемые в оловянно-свинцовых припоях.

3.16. Укажите основной ограничивающий фактор по применению мягких припоев при монтаже кристалла в корпус.

3.17. Для каких целей при монтаже кристалла в корпус применяют молибденовые и молибденовольфрамовые термокомпенсаторы?

3.18. Охарактеризуйте метод «перевернутого кристалла», используемый при сборке интегральных микросхем.

3.19. Какие трудности возникают при монтаже методом «перевернутого кристалла»?

3.20. На чем основан способ присоединения полупроводниковых кристаллов к основанию корпуса эвтектическими сплавами? Какие основные эвтектические сплавы нашли применение в производстве микросхем?

3.21. Опишите метод посадки кристалла в корпус с использованием прокладки из эвтектического сплава.

3.22. Опишите метод посадки кристалла в корпус с использованием жидкой зоны эвтектического расплава.

3.23. Какие виды брака возникают при несоблюдении параметров технологического процесса посадки кристалла в корпус эвтектическим методом?

3.24. Укажите основные недостатки и достоинства соединений стеклом при монтаже кристаллов в корпус.

3.25. Почему соединение стеклом применяют в основном при монтаже плат из ситалла, поликора и керамики?

3.26. Опишите технологию монтажа кристаллов стеклом.

3.27. В каком случае спай металл – стекло получается высокопрочным?

3.28. Опишите достоинства и недостатки соединения пластмассой при монтаже кристаллов в корпус.

3.29. Приведите классификацию клеев: а) по активности взаимодействия между клеем и склеиваемыми поверхностями; б) по типам применяемых клеев.

3.30. Какой толщины клеевой шов наиболее предпочтителен при монтаже кристаллов в корпус ИМС? Ответ пояснить.

3.31. Приведите типичный состав и примеры марок токопроводящих клеев.

3.32. Приведите примеры марок и особенности оптических клеев, используемых в оптоэлектронных ИМС.

3.33. Укажите недостатки клеевых соединений.

3.34. Укажите основные требования, предъявляемые к контактными выводам и методам их создания.

3.35. Опишите процесс проволочного монтажа кристалла на коммутационную плату.

3.36. Укажите достоинства и недостатки проволочного монтажа кристаллов на коммутационную плату.

3.37. Почему при ленточном монтаже кристалла на коммутационную плату следует использовать двухслойную ленту? Поясните назначение этих слоев.

- 3.38. Проиллюстрируйте ленточный монтаж кристалла на коммутационную плату.
- 3.39. Охарактеризуйте процесс ультразвуковой сварки электродных выводов.
- 3.40. Проиллюстрируйте ультразвуковую сварку с косвенным импульсным нагревом. Приведите типичные параметры этого технологического процесса.
- 3.41. Укажите достоинства и недостатки ультразвуковой сварки электродных выводов.
- 3.42. В чем сущность термокомпрессионной сварки электродных выводов?
- 3.43. Как повысить пластичность проволоки, используемой при термокомпрессионной сварке?
- 3.44. Перечислите основные условия, необходимые для выполнения качественного сварного соединения методом термокомпрессии.
- 3.45. Приведите схему термокомпрессионной сварки.
- 3.46. Дайте определение микроконтактной сварки. Приведите ее основные разновидности.
- 3.47. Укажите основное отличие сварки давлением с косвенным импульсным нагревом от термокомпрессионного способа.
- 3.48. Приведите схему сварки давлением с косвенным импульсным нагревом.
- 3.49. Опишите особенности сварки сдвоенным (расщепленным) электродом.
- 3.50. Приведите схему сварки сдвоенным (расщепленным) электродом.
- 3.51. Какое условие необходимо обеспечить для получения качественного соединения при сварке сдвоенным (расщепленным) электродом?
- 3.52. Приведите разновидности пайки электродных выводов. Какие материалы в основном используются для выводов?
- 3.53. Укажите последовательность технологических операций при монтаже кристалла на коммутационную плату с помощью объемных выводов.
- 3.54. Поясните достоинства монтажа кристаллов с помощью жестких объемных выводов.
- 3.55. В чем основные преимущества от использования ленточных носителей при сборке интегральных микросхем?
- 3.56. Поясните требования, которые необходимо обеспечивать в процессе герметизации микросхемы.

- 3.57. Какие задачи решаются при выборе и разработке способа герметизации микросхемного изделия?
- 3.58. Охарактеризуйте термины «внешняя среда», «окружающая среда».
- 3.59. Какие функции в микросхемах выполняют корпуса?
- 3.60. Классифицируйте корпуса микросхем по виду применяемых материалов.
- 3.61. Укажите особенности металлокерамических, керамических и стеклянных корпусов.
- 3.62. Приведите примеры материалов корпусов с использованием стекла.
- 3.63. Какие требования, обусловленные специфическим назначением микросхемы, предъявляются к ее корпусу?
- 3.64. Укажите основные требования, предъявляемые к корпусу микросхемы.
- 3.65. Что такое герметичность корпуса ИМС? Приведите основной критерий герметичности.
- 3.66. Для каких целей при герметизации применяют припойные стекла?
- 3.67. Почему высокотемпературные стекла и керамику при изготовлении корпусов микросхем обычно соединяют с помощью промежуточного слоя легкоплавкого стекла?
- 3.68. Перечислите основные виды сварки, применяемые при корпусной герметизации.
- 3.69. Охарактеризуйте процесс получения неразъемного соединения методом холодной сварки. Какую степень деформации свариваемых деталей необходимо обеспечить в этом методе?
- 3.70. Для каких целей находит применение холодная сварка в микросхемном производстве?
- 3.71. Чем активизируется электроконтактная конденсаторная сварка? Охарактеризуйте области ее применения.
- 3.72. В чем сущность роликовой электроконтактной сварки?
- 3.73. Поясните основное назначение аргона, применяемого в методе аргонно-дуговой сварки.
- 3.74. Укажите основные преимущества и недостатки аргонно-дуговой сварки.
- 3.75. Проиллюстрируйте метод микроплазменной сварки. Поясните его принцип действия.
- 3.76. Каким методом можно сваривать металлические корпуса большого размера и любой конфигурации?

3.77. Поясните особенности электронно-лучевой сварки. Какая максимальная глубина проплавления может быть обеспечена в этом методе?

3.78. Укажите особенности герметизации пайкой стеклянных и керамических корпусов с плоскими планарными выводами.

3.79. Охарактеризуйте технические характеристики автомата, применяемого для герметизации микросхем пайкой.

3.80. Охарактеризуйте различные способы нагрева, применяемые для оплавления припоя.

3.81. Возможно ли соединение керамических крышек с основаниями корпусов микросхем методом пайки стеклом?

3.82. Охарактеризуйте особенности заливки корпусов микроэлектронных изделий компаундами.

3.83. Какие материалы нашли наиболее широкое применение при изготовлении пластмассовых корпусов микросхем? Приведите основные требования, предъявляемые к ним.

3.84. Какие микросхемы наиболее целесообразно герметизировать методом опрессовки?

3.85. Как защищают кристалл микросхемы при опрессовке компаундами?

3.86. Охарактеризуйте технологический процесс герметизации микросхем капсулированием.

3.87. Почему порошкообразные компаунды более технологичны при герметизации микросхем, чем заливочные?

3.88. Какие материалы находят применение для бескорпусной защиты полупроводниковых структур и микросхем?

3.89. Охарактеризуйте обволакивание, заливку, литьевое прессование как методы бескорпусной герметизации.

3.90. Приведите последовательность операций, включаемых в технологический цикл при герметизации изделий литьевым прессованием.

3.91. Приведите типовые технологические режимы литьевого прессования.

3.92. Для каких целей используют многослойные герметизирующие оболочки?

3.93. Перечислите основные герметизирующие материалы и способы их нанесения в полупроводниковой технологии.

3.94. Перечислите основные герметизирующие материалы и способы их нанесения в тонкопленочной гибридной технологии.

3.95. Перечислите основные герметизирующие материалы и способы их нанесения в толстопленочной гибридной технологии.

ГЛАВА 4. ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОСХЕМ

4.1. Электронная гигиена

Соблюдение электронной гигиены – один из основных моментов обеспечения надежности технологических процессов и качества микросхем.

Электронная гигиена – система способов, средств и условий, исключающих или уменьшающих загрязнение микросхем на всех стадиях их изготовления. Электронная гигиена регламентирует проектирование технологий, исключающих или уменьшающих загрязнение обрабатываемых объектов; обеспечение в производственных помещениях чистой воздушной атмосферы; применение в технологических процессах чистых и сверхчистых газовых и жидких сред; содержание производственных помещений и оборудования в чистоте; личную гигиену обслуживающего персонала.

Чистота воздушной среды характеризуется наличием пыли, влаги, посторонних газов.

Запыленность воздушной среды существенно ухудшает качество и снижает процент выхода годных микросхем (особенно микросхем высокой степени интеграции). Механические частицы приводят к царапинам, разрывам межэлементных соединений, электрическим коротким замыканиям элементов, ухудшают адгезию пленок, являются причиной трещин, сквозных пор, неравномерной толщины пленок.

Если размеры элементов микросхемы близки к размерам пылинок, а количество элементов в микросхеме велико, то запыленность воздуха оценивают количеством пылинок в единице объема воздуха. В соответствии с установленным стандартом запыленность воздушной среды производственных помещений на предприятиях микроэлектроники оценивают количеством частиц размером не менее 0,5 мкм в одном литре воздуха. В соответствии с этим производственные помещения делятся на 8 классов чистоты (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Разделение производственных помещений или рабочих объемов по запыленности воздушной среды

Класс чистоты	Максимальное число частиц размером более 0,5 мкм в 1 л воздуха	Вид рабочего объема или помещения
1	0	Пылезащитные камеры
2	5	Пылезащитные камеры
3	35	Пылезащитные кабины

Класс чистоты	Максимальное число частиц размером более 0,5 мкм в 1 л воздуха	Вид рабочего объема или помещения
4	350	Чистые комнаты
5	1000	Чистые комнаты
6	3500	Чистые помещения
7	10000	Зона обслуживания
8	35000	Зона обслуживания

Запыленность воздушной среды уменьшается за счет:

1) исключения попадания микрочастиц пыли в производственное помещение (размещение предприятий вдали от крупных промышленных городов в зеленых зонах; обеспечение герметичности помещений и рабочих объемов оборудования; избыточное давление в помещениях и в рабочих объемах; многоступенчатая фильтрация поступающего в помещение воздуха; контроль входа и выхода);

2) исключения появления микрочастиц (использование в конструкциях и в отделке промышленных зданий и помещений износостойких и пылеотталкивающих материалов; скрытые проводки; применение устройств и одежды, не образующих и не притягивающих пыль; местная вентиляция для выделения пылевых частиц; соблюдение работниками правил электронной гигиены);

3) удаления микрочастиц (применение высокоэффективных систем вентиляции и кондиционирования воздуха, уборка помещений, оборудования, постоянная и периодическая очистка оснастки, внутренних стенок и устройств рабочих камер промышленных установок).

Температура и влажность воздушной среды оказывают значительное влияние на качество и воспроизводимость технологических процессов. Колебания температуры изменяют линейные размеры оснастки и обрабатываемых объектов, скорости химических реакций, скорости испарения применяемых материалов, показания контрольно-измерительных приборов, параметры структур и готовых микросхем. Именно поэтому для каждой чувствительной к колебаниям температуры технологической операции устанавливаются нормы допусков на отклонения от оптимальной температуры воздушной среды. Например, для получения топологического рисунка с шириной линии 1 мкм и менее необходимо поддерживать температуру с точностью $\pm 0,1$ °С.

Влажная среда нежелательна при проведении практически всех технологических операций. Адсорбируясь на различных поверхностях, влага и растворенные в ней вещества приводят к образованию нежелательных

окислов и труднорастворимых соединений. При термической обработке на таких поверхностях могут образоваться неровности (эрозия), приводящие к ухудшению параметров. Влажность воздуха производственных помещений поддерживают минимальной, но не ниже санитарной нормы для работающих.

В соответствии с требованиями к условиям производства микросхем помещения разделяют на три категории, нормы температуры и относительной влажности для которых приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Разделение производственных помещений по температурно-влажностным параметрам воздушной среды

Категория микроклимата	Температура, °С		Относительная влажность, %
	Летом	Зимой	
I	$22 \pm 0,5$	$22 \pm 0,5$	45 ± 5
II	20 ± 1	23 ± 1	50 ± 5
III	20 ± 2	23 ± 2	50 ± 10

Чистые помещения, комнаты и локальные объемы позволяют проводить прецизионные техпроцессы. Для успешного проведения всего технологического процесса в одном производственном помещении параметры воздушной среды должны поддерживаться на уровне, требуемом для выполнения самой чувствительной к этим параметрам операции. Обеспечение высокого качества среды всего производственного помещения связано с большими экономическими затратами. Поэтому технологический процесс делят на группы операций, требующих близких значений параметров воздушной среды. В соответствии с этим производство делят на ряд технологических участков, занимающих отдельные помещения.

Ответственные операции выполняют в чистых комнатах, помещениях ограниченного объема с классами чистоты 4 и 5, удовлетворяющих требованиям по температурно-влажностным и другим параметрам. Классы чистоты 4 и 5 получают в чистых помещениях – производственных помещениях класса чистоты 6, предназначенных для размещения группы чистых комнат. Более высокие классы чистоты получают в локальных рабочих объемах (пылезащитных кабинах и пылезащитных камерах), служащих для выполнения прецизионных процессов. Пылезащитные кабины предназначены для размещения технологического оборудования, обрабатываемых объектов и оператора, когда нет выделений загрязняющих веществ. Пылезащитные камеры отвечают более жестким требованиям, они предназначены для обеспыливания оборудования и обрабатываемых объ-

ектов и предотвращения выноса загрязняющих веществ из камеры в зону дыхания оператора. Допустимые колебания температуры в них не более $\pm 0,2$ °С.

К локальным рабочим объемам относятся также химические скафандры для прецизионных операций, в процессе проведения которых выделяются загрязняющие вещества. Герметизация таких скафандров снижает производительность труда из-за неудобства работы в перчаточных выводах; использование отсекающей воздушной завесы перед открытым рабочим проемом решает проблему защиты оператора от вредных выделений, не снижая производительность выполнения операции. Чистота воздушной среды в локальных рабочих объемах достигается за счет непрерывной подачи потока очищенного воздуха.

Модульные чистые комнаты являются наиболее прогрессивными. Модульные комнаты, дифференцированные по классам чистоты, состоят из стандартных элементов – фильтрующий потолок, фильтрующие стены, перфорированный пол, двери, клапаны для удаления дыма, фильтрующие блоки и др. В свою очередь, варианты сочетания разных чистых комнат, связанных между собой чистым проходным коридором и чередующихся с зонами обслуживания, позволяют получать чистые помещения различных планировок. Чистые помещения модульного типа отличаются гибкостью изменения планировок в соответствии с необходимым изменением технологии.

Чистота воды является одним из факторов, влияющих на качество проведения технологических процессов. В производстве микросхем вода применяется в больших количествах для составления различных растворов, промывок, а также в качестве реагента и защитной среды. Природная вода содержит большое количество механических частиц (гидрозолей), растворенных минеральных солей, примесей меди, серебра, золота, бактерий и т.п. В производстве микросхем применяют воду, очищенную от загрязнений. Показателем степени чистоты воды является ее удельное сопротивление. Сопротивление воды сильно зависит от температуры, поэтому принято указывать значение удельного сопротивления при 20 °С. Собственное удельное сопротивление идеально чистой воды равно 25 МОм·см.

В производстве микросхем различают первую, вторую и третью степень чистоты воды, которым соответствуют значения удельного сопротивления 18, 10 и 1 МОм·см (вода марок А, Б и В, соответственно).

Кроме удельного сопротивления определяют содержание в воде кремниевой кислоты, микрочастиц, микроорганизмов, меди, железа и т.п. Для производства микросхем воду подвергают предварительной, окончательной и финишной очистке.

Предварительную очистку воды от взвешенных и коллоидно-растворенных частиц выполняют методами дистилляции, сорбции с помощью специальных фильтров, реагентной коагуляции, электрокоагуляции и др. Предварительно очищенная вода имеет растворимые соли и другие примеси.

Для окончательной очистки воды от растворимых веществ в настоящее время применяют очистку ионно-обменными смолами (деионизацию) и метод обратного осмоса.

Финишную очистку выполняют непосредственно на рабочем месте перед использованием воды.

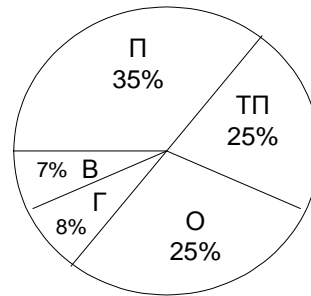
Чистота оборудования, помещения и личная гигиена работающих – важнейшая составная часть электронной гигиены. Необходимость уменьшения загрязнений от оборудования учитывается, начиная с его проектирования (выбор материалов, конструкций, рельефа поверхностей и др.) и кончая регламентацией очистки внешних и внутренних частей оборудования. В чистых комнатах для сохранения ламинарности и, следовательно, чистоты потока воздуха оборудование размещается так, чтобы расстояния между рабочими местами были не менее 1 – 1,2 м, а расстояния от стен до оборудования – не менее 0,5 – 0,8 м. Для уменьшения влияния тепла, выделяемого оборудованием, на конвективный перенос частиц пыли оборудование встраивается в стенные панели. Такая расстановка позволяет проводить профилактическую очистку оборудования извне чистой комнаты.

В воздухе чистых комнат имеются частицы размерами от сотых до нескольких десятых долей микрометра, которые не улавливаются фильтрами установок очистки и не контролируются при анализе запыленности. Эти частицы могут оседать и накапливаться в помещении. Для их удаления необходима периодическая влажная уборка, иногда с добавлением 5 % глицерина, чтобы пыль не срывалась с поверхностей.

Вода для влажной уборки полов, стен, потолков должна быть чистой, лучше деионизированной, с удельным сопротивлением не менее 0,5 МОм·см.

Основным источником микрочастиц пыли является работающий персонал (рис. 4.1).

Рис. 4.1. Основные источники микрочастиц пыли:
 П – обслуживающий персонал;
 ТП – технологический процесс;
 О – оборудование, оснастка, средства автоматизации;
 Г – газы и химикаты;
 В – воздушная среда



Полное управление состоянием воздушной среды в производственных помещениях, необходимое для прецизионной технологии производства микросхем, возможно лишь при условии создания полностью автоматизированных линий с заменой человека роботом. Однако, по мнению специалистов, сейчас только около 40 % производственных процессов могут быть роботизированы и в ближайшие годы не удастся полностью исключить человека из производства. Именно поэтому обслуживающий персонал должен соблюдать правила личной электронной гигиены.

Источниками загрязнений от работающего персонала являются, главным образом, кожа человека и одежда. Через кожу человека выделяются пары воды, солей, жира и других веществ. В результате постоянного обновления верхнего покрова кожи происходит отслаивание отживших частиц. В зависимости от вида деятельности число частиц пыли, отделяемой от одежды человека, может меняться в широких пределах.

По этим причинам работы в чистых комнатах ведутся в специальной рабочей одежде, изготовленной из материала с минимальным пылевыведением. Прежде чем попасть в чистое помещение, работники проходят промежуточное помещение, гардеробные, обдувочные шлюзы. На предприятиях микроэлектроники также проводится постоянный контроль условий труда.

Службы электронной гигиены, охраны труда, окружающей среды и противопожарной безопасности осуществляют контроль выполнения действующих инструкций и состояния условий труда в подразделениях предприятия и на каждом рабочем месте. Строгое соблюдение всех правил и выполнение работ в соответствии с указаниями НТД обеспечивает четкую технологическую дисциплину при изготовлении микросхем и способствует качественному выполнению всех технологических процессов.

4.2. Принципы исследования и моделирования технологических процессов

При исследовании технологических процессов необходима замена однозначной зависимости между параметрами ТП и изделий более свободной, многофакторной связью между ними. Это обусловлено стремительным развитием технологии и переходом от изучения простых систем и связей к сложным многоуровневым системам и явлениям, когда важен результат не отдельного события, а общий эффект их совокупности.

Каждый ТП имеет определенное число степеней свободы, т.е. направлений, в которых он может изменяться. Понятие числа степеней свободы, хорошо известное в термодинамике, можно распространить на любой ТП и выразить соотношением

$$S = L - M, \quad (4.1)$$

где S – число степеней свободы системы; L – число параметров, описывающих систему (общее число переменных); M – число связей между параметрами (т.е. число независимых уравнений).

Очевидно, что для однозначного описания элемента процесса необходимо меньшее число переменных, чем для полного описания всего процесса.

Число степеней свободы элемента процесса можно характеризовать числом технологических факторов при условии, что каждый из факторов создает одну степень свободы процесса, т.е. может изменять этот процесс только в одном направлении. Следовательно, определение неизвестных параметров, входящих в уравнение (4.1), адекватно выбору технологических факторов, влияющих на изменение ТП. Как правило, число естественных законов, определяющих процесс, меньше числа технологических факторов. Технологические факторы, влияние которых определяется естественными законами, дают *детерминированную* составляющую в изменении ТП, а та часть, которая не является следствием естественных законов (случайные факторы), вносит *стохастическую* составляющую в изменение ТП и производства в целом.

Действия влияющих факторов на ТП различны на разных уровнях производственной иерархии. На рис. 4.2 показана схема иерархии, из которой видно, что аппаратурно-процессная единица (АПЕ) является ее низшей (первой) ступенью. В настоящее время для анализа ТП широко применяются методы теории систем, многофакторного (регрессионного) анализа, планирования эксперимента и др.

Стохастические взаимодействия, возникающие в результате случайных возмущений ТП, проявляются как на первой ступени производственной иерархии – на уровне АПЕ, так и на второй – на уровне цеха (или участка), представляющего собой совокупность взаимосвязанных АПЕ. При взаимодействии АПЕ появляются дестабилизирующие возмущения, статистически распределенные во времени. Для анализа функционирования системы (или подсистемы) первой и второй ступеней иерархии ТП используются методы теорий систем, массового обслуживания, графов, надежности и др.

Если в результате исследования ТП осуществлена его полная автоматизация с использованием ЭВМ на первой и второй ступенях производственной иерархии, то говорят о построении автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП).

Третья, высшая степень иерархической структуры предприятия по производству ИМС (см. рис. 4.2) является системой оперативного управления совокупностью цехов, организацией и планированием производства, запасами и потоками исходных материалов и комплектующих изделий, а также сбытом готовой продукции. Реализация этой системы на ЭВМ получила название автоматизированной системы управления производством (АСУП).

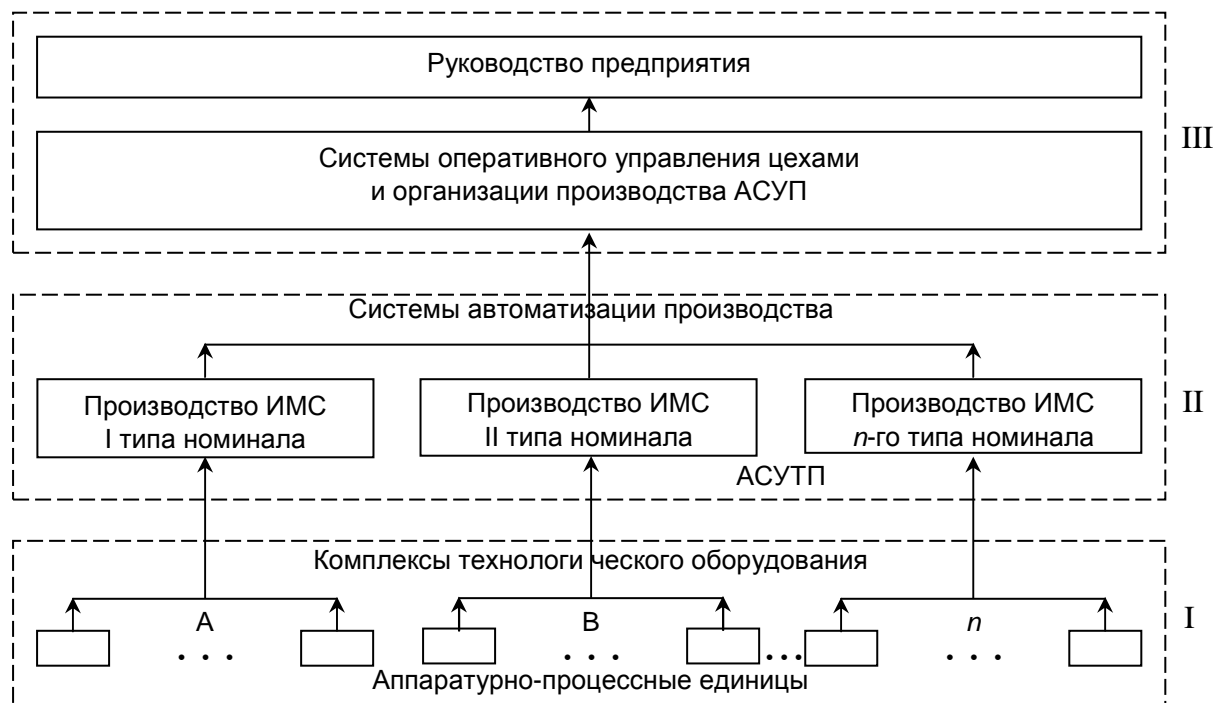


Рис. 4.2. Производственная иерархия технологического процесса изготовления ИМС:
I, II, III – ступени производственной иерархии

Одно из основных требований, предъявляемых к ТП в производстве ИМС, – получение заданного процента выхода годных изделий, определяемого, прежде всего, высокой точностью проведения данного процесса с экономически приемлемыми показателями. Выполнение этого требования затрудняется сложностью технологии ИМС и обусловлено большим числом параметров интегральной схемы, которые необходимо обеспечить с высокой точностью, а также большим числом взаимосвязей между физическими характеристиками ИМС и технологическими факторами производства. Следует учитывать, что изменение одного из параметров часто приводит к нелинейным изменениям других.

На ТП оказывает влияние значительное число факторов, которые трудно или невозможно воспринять без соответствующей обработки и схематизации. Поэтому для анализа ТП создаются модели, т.е. упрощенные системы, которые отражают ограниченные в нужном направлении стороны рассматриваемого процесса.

Различают два вида моделирования – физическое и математическое. *Физическое моделирование* состоит в отыскании критериев подобия исследуемой модели и объекта. Практически это означает изучение данного физического процесса в малом масштабе при варьировании некоторых физических величин. Использование критериев подобия оправдало себя при анализе детерминированных процессов, описываемых определенными физическими законами.

Для анализа недетерминированных процессов с многосторонней стохастической взаимосвязью между технологическими факторами составляют структуру модели в виде системы конечных или дифференциальных уравнений, отражающих взаимное влияние различных параметров ИМС и технологических процессов. При адекватности модели и процесса с помощью алгоритма решения можно рассчитать любую совокупность параметров, определяющих данный ТП или какую-либо из его стадий. Проверку адекватности модели и процесса проводят сравнением фактических и рассчитанных результатов. Поэтому после составления первого варианта модели процесс продолжают исследовать для того, чтобы установить лучшее соответствие между моделью и реальным процессом, т.е. для оптимизации модели. С этой целью связанные математически параметры изменяют в любой последовательности и полученный результат проверяют на адекватность модели изучаемому объекту. Таким образом устанавливают взаимное влияние технологических параметров и оптимальные варианты модели.

При *математическом моделировании* ТП часто используют принцип изоморфизма математических моделей для физических явлений, имеющих разную физическую природу. Приведем основные дифференциальные уравнения, описывающие эти явления.

Перенос количества движения при вязком течении жидкости по закону Ньютона

$$P = \eta_B \frac{\partial v}{\partial x}; \quad (4.2)$$

перенос тепла (тепловой поток) по закону Фурье

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (4.3)$$

перенос вещества (диффузионный поток вещества) по закону Фика

$$j_D = -D \frac{\partial C}{\partial x}; \quad (4.4)$$

перенос электрического заряда по закону Ома

$$j_e = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x}; \quad (4.5)$$

скорость превращения вещества в химической реакции

$$j_R = -K \frac{\partial C}{\partial \tau}; \quad (4.6)$$

скорость осаждения вещества в слое

$$j_{oC} = \rho_m \frac{\partial \sigma}{\partial \tau}, \quad (4.7)$$

где P , q , j_D , j_e – плотности потоков импульса, тепла, компонента, электрического заряда, соответственно; η_B , λ , D , σ – коэффициенты динамической вязкости, теплопроводности, диффузии, электропроводности, соответственно; K – константа скорости химической реакции; ρ_m – плотность вещества; v , T , C , U , σ – скорость, температура, концентрация, электрическое напряжение, толщина осажденного слоя, соответственно.

Во все эти уравнения входят градиенты скорости dv/dx , температуры dT/dx , концентрации dC/dx , напряжения dU/dx и др. Следовательно, при введении соответствующих пересчетных коэффициентов любое явление можно смоделировать переносом какого-либо параметра, например, электрического заряда. Принцип аналогий различных явлений позволяет моделировать ТП различной природы на ЭВМ. Виды математических моделей определяются конкретными условиями проведения ТП и производства в целом.

В моделях с распределенными параметрами основные переменные процесса изменяются во времени и в пространстве, а в моделях с сосредоточенными параметрами – только во времени. Соответственно, в первом случае основные переменные описываются уравнениями в частных производных, а во втором – обыкновенными дифференциальными уравнениями.

При изготовлении ИМС в процессе создания структуры изделия необходимо осуществить взаимосвязь технологических параметров, составить модель установившегося во времени ТП (*статическое моделирование*) или неустановившегося, например, при переходе от одного режима к другому (*динамическое моделирование*). Для составления статической модели процесса необходимо проанализировать физико-химическую сущность, целевое назначение, основные уравнения и особенности данного процесса. Статическая модель строится с учетом всех влияющих технологических факторов. Для составления динамической модели процесса находится взаимосвязь всех основных переменных при изменении их во времени. Все эти характеристики определяются теоретическим или экспериментальным путем. Последний связан с получением информации на выходе процесса при внесении возмущения на его входе или в другом месте и изучением прохождения этого возмущения через весь объект.

Полная математическая модель ТП включает характеристики основных технологических факторов процесса, связи между этими факторами, ограничения на процесс, критерии оптимизации, функции оптимизации связей между основными технологическими факторами в динамике. На рис. 4.3 представлена схема проведения процесса математического моделирования и результаты каждой его стадии.

Постановка задачи моделирования – наиболее важная стадия, поскольку не существует общих правил для всех случаев. Проблемы производства ИМС настолько разнообразны, что для успеха анализа необходимо точно установить граничные условия для каждой конкретной задачи. Правильная постановка задачи определяет не только цель, но и пути ее решения. Общая схема формализации задач анализа ТП сводится к выбору некоторых систем технологических параметров и функций. Чтобы отдать предпочтение тому или иному параметру или функции, необходимо:

во-первых, четко определить характеристики показателя качества изделия, на достижение которого направлен данный ТП;

во-вторых, выяснить условия работы рассматриваемой технологической системы и вытекающие из них ограничения, которым должны удовлетворять искомые параметры и характеристики.

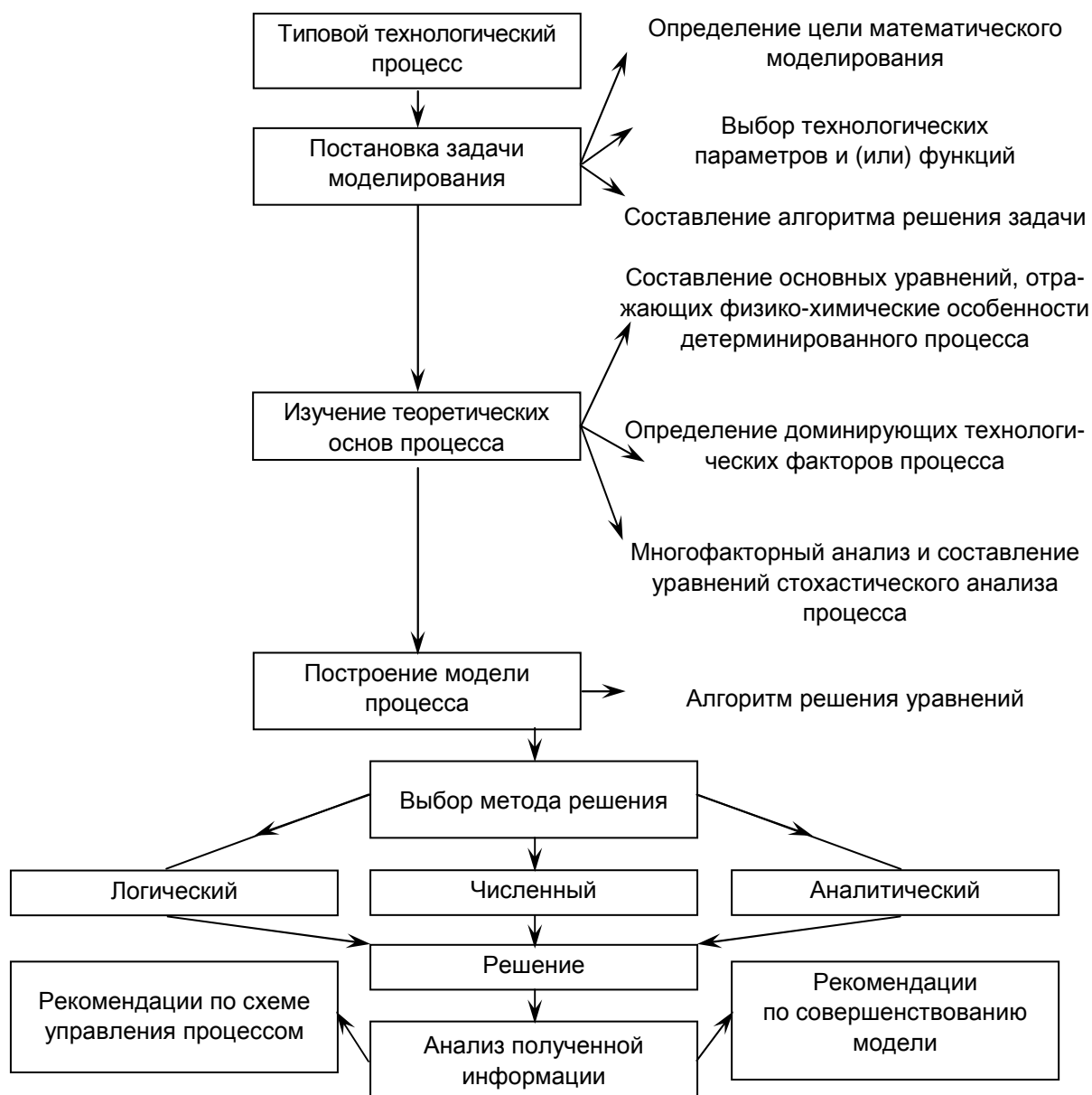


Рис. 4.3. Схема процесса математического моделирования

Рассмотрим основные стадии процесса математического моделирования.

Во многих классах технологических задач показатель качества изделия при определенных граничных условиях можно выразить через параметры ТП, называемые часто параметрами управления.

Граничные условия, которым должны удовлетворять искомые параметры, записываются в виде соответствующих уравнений или неравенств. Решение их позволяет определить область экстремальных значений функций.

Изучение теоретических основ процесса – это определение физико-химических законов, которым подчиняются явления, лежащие в основе ТП. Если не удастся создать удовлетворительную теорию процесса, то прибегают к рабочим гипотезам и постулатам, справедливость которых проверяется сравнением результатов решения математической модели, построенной на их основе, с результатами эксперимента. Таким путем определяется, какая из рабочих гипотез лучше отражает сущность изучаемых явлений, и выявляются доминирующие технологические факторы.

Построение модели процесса заключается в составлении математических уравнений, соответствующих его физической модели. На основе четкого понимания процесса составляют алгоритм решения уравнений. На этом этапе проводят упрощение уравнений, опуская из рассмотрения не доминирующие факторы или заменяя их соответствующими константами, благодаря чему иногда удается исключить целый ряд уравнений и значительно упростить модель.

Когда уравнения окончательно составлены, находят метод их совместного решения. Для этого составляют поточно-информационную диаграмму – схему связей отдельных стадий ТП. Ее строят таким образом, чтобы были отчетливо видны применение каждого уравнения, цель определения каждой переменной (каждого фактора) и внутренние связи между ними. Такая схема дает логическую причинно-следственную связь в реальной физической системе и ясную картину предполагаемого механизма изучаемого явления. Иногда эта схема может помочь обнаружить новые связи между переменными, которые не были очевидны при определении доминирующих факторов ТП.

4.3. Принципы анализа технологических процессов

Технологический процесс как большая система рассматривается на различных этапах производства изделия. Поскольку ТП подвергается воздействию многочисленных факторов, степень влияния которых различна, то совместное их действие приводит к существенному разбросу электрофизических параметров изделий. Для каждого процесса (например, вакуумного напыления, эпитаксии, диффузии) число таких факторов может быть несколько десятков. В течение всего периода изготовления ИМС может подвергаться воздействию нескольких сотен технологических факторов. Поэтому анализировать весь технологический процесс возможно только на основе системного подхода с применением ЭВМ. Основным понятием при этом является понятие «большая система», в нашем случае

«большая технологическая система», т.е. совокупность объектов обработки, физико-химических процессов и средств их реализации. В виде большой системы можно представить любой технологический процесс, как показано на рис. 4.4.

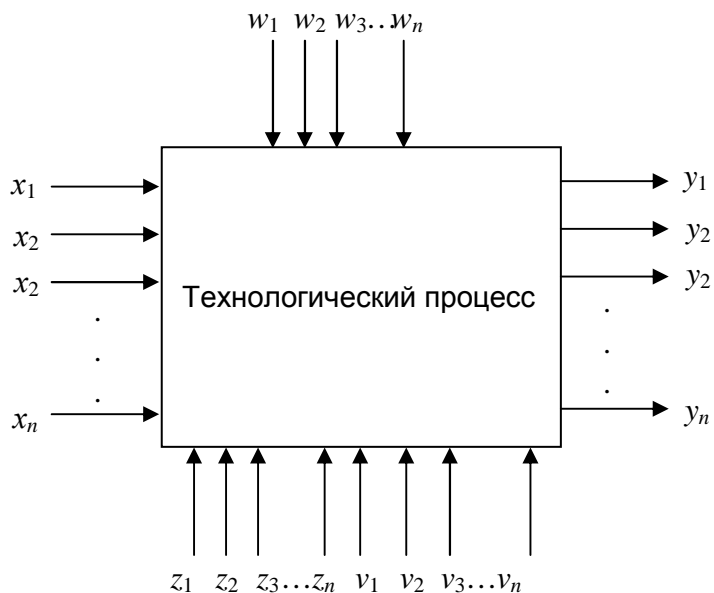


Рис. 4.4. Представление технологического процесса как некоторой системы: $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ – входы системы (подложки, испаряемые материалы, диффузенты и т. д.); $y_1, y_2, y_3 \dots y_n$ – выходы системы (параметры ИМС или ее частей); $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ – контролируемые и управляемые факторы (температура подложек, давление в камере, расход газа и т. д.); $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ – контролируемые, но неуправляемые факторы (чистота исходного материала, например, кремния, растворов, газов и т.д.); $w_1, w_2, w_3 \dots w_n$ – неконтролируемые факторы, оказывающие случайные возмущающие воздействия на процесс

Одной из основных целей исследования технологических процессов, анализа существующих и синтеза новых технологий является решение задач оптимального управления технологическими процессами. Существуют три пути решения этих задач.

Первый состоит в исследовании физико-химических особенностей процессов с целью установления вида взаимозависимостей различных параметров.

Второй – в статистической обработке результатов наблюдений и нахождении уравнений, описывающих интересующие явления.

Третий (компромиссный), наиболее рациональный, – в учете физико-технологических особенностей процессов, определении вида зависимостей, которые затем уточняются и конкретизируются с помощью статистического анализа.

Технологические процессы изготовления ИМС обычно настолько сложны, что наиболее целесообразно изучать их с помощью экспериментально-статистических методов, позволяющих выявить наиболее существенные технологические факторы, определить характер их влияния на качество изделия и построить модель исследуемого процесса. Для исследования технологических процессов широко применяются *дисперсионный и корреляционно-регрессионный методы анализа*.

4.3.1. Дисперсионный анализ

Очень часто перед исследователем стоит задача установить, какие технологические факторы и в какой мере оказывают влияние на качество изделия. Для этого изменяют значения изучаемых факторов и фиксируют полученные в результате экспериментов параметры изделия. Однако кроме изучаемых и контролируемых факторов на параметры изделия воздействует также множество неучитываемых случайных факторов. В итоге получается целый ряд значений параметров изделий. Для удобства анализа полученные экспериментальные данные обычно сводятся в таблицу. Так, для однофакторного дисперсионного анализа таблица будет иметь следующий вид (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Данные эксперимента для однофакторного дисперсионного анализа

Уровень фактора	Наблюдения						Сумма	Среднеарифметическое значение
	1	2	...	j	...	n		
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1j}	...	X_{1n}	$\sum_{j=1}^n x_{1,j}$	\bar{x}_1
2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2j}	...	X_{2n}	$\sum_{j=1}^n x_{2,j}$	\bar{x}_2
...
i	X_{i1}	X_{i2}	...	X_{ij}	...	X_{in}	$\sum_{j=1}^n x_{i,j}$	\bar{x}_i
...
l	X_{l1}	X_{l2}	...	X_{lj}	...	X_{ln}	$\sum_{j=1}^n x_{l,j}$	\bar{x}_l

Дисперсионный анализ состоит в оценке отношения дисперсии S_{ϕ}^2 , связанной с действием исследуемых факторов (или фактора), к дисперсии S_{σ}^2 , обусловленной техникой эксперимента. Обе дисперсии определяются следующими выражениями:

$$S_{\phi}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^l (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{l - 1} ; \quad (4.8)$$

$$S_9^2 = \frac{\sum_{i=1}^l \left[\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \right]}{N-l}, \quad (4.9)$$

где n – число наблюдений; l – число уровней фактора; \bar{x}_i – частная средняя; \bar{x} – общая средняя; $(l-1)$ – число степеней свободы дисперсии S_ϕ^2 ; $N = ln$ – общее число результатов наблюдений; $(N-l)$ – число степеней свободы дисперсии S_9^2 .

Согласно табл. 4.3

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}; \quad (4.10)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n x_{ij}}{ln}. \quad (4.11)$$

Подставив (4.10) и (4.11) в (4.8) и (4.9), получим:

$$S_\phi^2 = n \sum_{i=1}^l \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n x_{ij}}{ln} \right)^2 / (l-1); \quad (4.12)$$

$$S_9^2 = \sum_{i=1}^l \left[\sum_{j=1}^n \left(x_{ij} - \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \right)^2 \right] / (N-l). \quad (4.13)$$

Сравнение S_ϕ^2 и S_9^2 производится с помощью критерия Фишера (F-критерия):

$$F_{расч} = S_\phi^2 / S_9^2. \quad (4.14)$$

Полученное значение $F_{расч}$ сопоставляется с теоретическим $F_{табл}$, которое находится из таблицы, построенной для F-распределения. Если $F_{расч} \geq F_{табл}$, можно сделать вывод, что изучаемый технологический фактор влияет на качество изделия.

Для многофакторного процесса дисперсионный анализ позволяет оценить дисперсии, вызванные каждым фактором в отдельности, и выявить технологические факторы, оказывающие влияние на выходные параметры изделия. Однако степень и характер этого влияния могут быть определены только с помощью корреляционно-регрессионного анализа.

4.3.2. Корреляционно-регрессионный анализ

Очень часто при изучении сложных технологических процессов из-за воздействия случайных факторов трудно или невозможно расшифровать механизм тех или иных явлений, происходящих при изготовлении изделия. В этом случае функциональная зависимость

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.15)$$

превращается в корреляционную, а полином

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (4.16)$$

связывающий выходной и входные параметры процесса, – в уравнение регрессии.

Коэффициенты полинома $b_i, b_{ij}, b_{ii}, \dots$ интерпретируются как коэффициенты ряда Тейлора, т.е. значения частных производных в точке, вокруг которой производится разложение неизвестной функции,

$$b_i = \partial f / \partial x_i; b_{ij} = \partial^2 f / \partial x_i \partial x_j; b_{ii} = \partial^2 f / \partial x_i^2. \quad (4.17)$$

Часто при исследовании технологических процессов бывает достаточно ограничиться линейной аппроксимацией функции (4.15):

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n. \quad (4.18)$$

В этом случае коэффициенты регрессии оценивают по результатам двух экспериментов в окрестности исходной точки, причем приращение функции Δy , соответствующее приращению Δx_i , принимают пропорциональным значению частной производной, т.е.

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} = b_i. \quad (4.19)$$

Регрессионный анализ применим лишь при условии, если независимые переменные можно считать неслучайными величинами.

Нахождение же связи между случайными величинами – задача корреляционного анализа. В этом случае устанавливается не только форма корреляционной связи (по виду уравнения регрессии), но и ее степень, которая оценивается корреляционным соотношением

$$\theta = \sqrt{1 - \eta} \quad (4.20)$$

при

$$\eta = \frac{(n-t)S_y^2}{(n-1)S_\Sigma^2}, \quad (4.21)$$

где θ – показатель степени корреляционной связи; t – число коэффициентов в уравнении регрессии.

Из (4.20) и (4.21) видно, что чем меньше доля дисперсии S_y^2 в общей дисперсии S_Σ^2 , тем больше θ , т.е. сильнее связь между Y и X_i . При $\theta = 0$ можно говорить о функциональной зависимости между параметрами.

4.3.3. Применение планирования экстремальных экспериментов в технологии ИМС

Планирование эксперимента подразумевает использование и тесное взаимодействие дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализа, поскольку задача планирования состоит в нахождении уравнения регрессии (4.16). Однако получение такого математического описания для сложных технологических процессов требует значительных затрат и постановки большого числа опытов. Поэтому при планировании экспериментов стремятся повысить эффективность исследований, получить при минимально возможном числе опытов максимальное количество информации об изучаемом процессе для описания его с наибольшей точностью.

Простейшее описание исследуемого процесса в виде уравнения регрессии

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j \quad (4.22)$$

может быть получено варьированием каждого из факторов X_i на двух уровнях, отличающихся от базового (начального) уровня X_{0i} на шаг варьирования $\pm \Delta X_i$. При составлении плана исследования проводится преобразование независимых переменных X_i в безразмерные переменные

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (4.23)$$

что упрощает обработку результатов исследования. В безразмерной системе координат верхний уровень в соответствии с (4.23) равен плюс 1, а нижний – минус 1; координаты центра плана равны нулю и совпадают с началом координат.

Считается, что оценка влияния какого-либо фактора на выходной параметр тем точнее, чем больше исследуемая область. Однако в реальных условиях часто невозможно сколь угодно увеличивать интервалы варьирования независимыми переменными X_i , что отрицательно сказывается на точности оценки исследуемых зависимостей. В этом случае исследуемую область расширяют за счет использования многомерного пространства. Так, если исследователь имеет дело с двумя переменными и каждую из них варьирует на двух уровнях – плюс 1 и минус 1, то экспериментальные точки располагаются в вершинах квадрата (рис. 4.5, а), а радиус окружности, описывающей исследуемую область, равен $\sqrt{2}$. При трех независимых переменных экспериментальные точки находятся в вершинах куба (см. рис. 4.5, б), а радиус сферы, охватывающей исследуемую область, равен уже $\sqrt{3}$. При пяти одновременно исследуемых независимых переменных этот радиус возрастает до $\sqrt{5}$, и т.д.

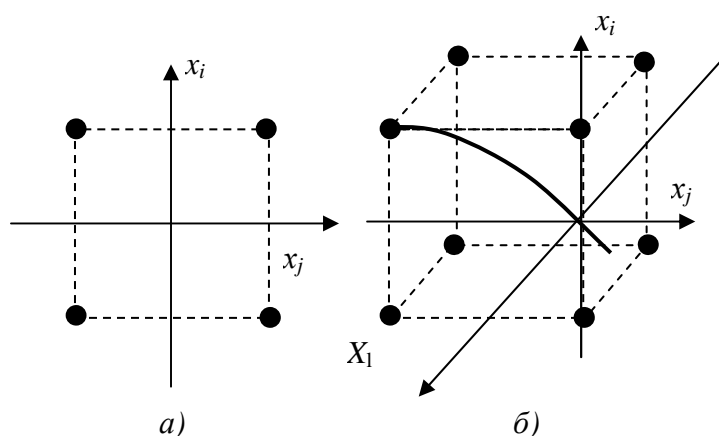


Рис. 4.5. Расположение экспериментальных точек для двух и трех независимых переменных, варьируемых на двух уровнях

Таким образом, с ростом числа одновременно исследуемых факторов растет радиус исследуемой области и повышается точность оценки влияния каждого из факторов на выходной параметр, а, следовательно, возрастает эффективность многофакторного эксперимента.

План эксперимента, определяющий расположение экспериментальных точек в K -мерном факторном пространстве, обычно задается в виде матрицы планирования, в строках которой определены условия опытов, а в столбцах – значения независимых переменных в разных опытах.

Матрица планирования для двух исследуемых технологических факторов представлена в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Матрица планирования двухфакторного эксперимента

№ опыта	План			$X_1 \cdot X_2$	Результат опыта Y	№ опыта	План			$X_1 \cdot X_2$	Результат опыта Y
	X_0	X_1	X_2				X_0	X_1	X_2		
1	+1	-1	-1	+1	1	3	+1	-1	+1	-1	Y_3
2	+1	+1	-1	-1	2	4	+1	+1	+1	+1	Y_4

Легко видеть, что все возможные комбинации для двух факторов исчерпываются постановкой четырех опытов. Фиктивная переменная X_0 введена в матрицу для оценки коэффициента b_0 – формула (4.22).

Часто в матрице планирования для упрощения записи значения переменных на верхнем и нижнем уровнях заменяют символами (+) и (-) соответственно. Такая матрица для трех технологических факторов будет иметь вид, представленный в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Матрица планирования трехфакторного эксперимента

№ опыта	План								Результат опыта Y
	X_0	X_1	X_1	X_3	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	
1	+	-	-	-	+	+	+	-	Y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	Y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	Y_3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	Y_4
5	+	-	-	+	+	-	-	+	Y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	Y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	Y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	Y_8

Как видно, для трех независимых переменных, варьируемых на двух уровнях, все комбинации реализуются при постановке восьми экспериментов.

После выполнения опытов определяются коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 и записывается уравнение регрессии (4.22). При этом обработка результатов экспериментов производится определенными стандартизированными приемами, что дает возможность сопоставлять материалы различных исследований.

Математическое описание или построение модели – основной этап оптимизации технологического процесса. Эта оптимизация производится по следующей схеме:

1. Выбор критерия оптимизации – выходного параметра, который лежит в основе оценки ТП. Им могут быть процент выхода годных ИМС, их себестоимость, производительность ТП и т.д. В результате исследования ТП необходимо не только добиться заданного значения выбранного выходного параметра, но и соблюсти определенные требования при проведении технологического процесса (ограничения по технологическим режимам, по технике безопасности и т.д.), а также поддержать определенный уровень показателей качества изделия. Поэтому при выборе критерия оптимизации устанавливаются также ограничения, налагаемые на исследуемый процесс. Эти ограничения могут быть записаны в виде зависимостей типа

$$\left. \begin{aligned} x_i &= a; \\ y_i &= b. \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

2. Исследование ТП и нахождение математической зависимости критерия оптимизации от технологических факторов – формула (4.15).

3. Анализ полученных зависимостей и определение оптимальных условий проведения ТП.

Перечисленные задачи решаются на этапе проектирования технологического процесса. Однако в производственных условиях может происходить изменение некоторых из входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n . Кроме того, ТП подвергается действию неконтролируемых возмущений. Поэтому найденные на этапе проектирования оптимальные режимы становятся неоптимальными. Чтобы иметь возможность проводить процесс при наиболее благоприятных режимах, необходимо продолжать его исследование и в производственных условиях.

4.4. Анализ отказов ИМС

Проведение анализа отказов обеспечивает:

1. Определение причин и механизмов отказов для принятия корректирующих мер по их сокращению или устранению (изменение конструкции, технологии изготовления приборов, режимов их работы в аппаратуре, способов монтажа, контроля и т.д.).

2. Выбор видов и режимов форсированных испытаний для ускоренной оценки надежности или выявления и отбраковки приборов со скрытыми дефектами, приводящими к отказам в процессе работы ИМС в аппаратуре.

3. Разработку физико-математических моделей отказов для прогнозирования надежности на этапе проектирования новых изделий.

Анализ отказов ИМС включает рассмотрение и анализ схемотехнических вопросов, использование электрофизических, структурных, электрических методов контроля и анализа, изучение характеристик материалов, химического состава среды, элементов микросхемы и т.д. Несмотря на многообразие типов интегральных микросхем, видов их отказов, разнообразие методов и средств анализа отказавших изделий, выделяют общие методологические и организационные принципы построения системы анализа отказов ИМС.

4.4.1. Этапы анализа отказов ИМС

В общей технологической цепочке анализа отказов ИМС выделяют четыре основных этапа:

- 1) подтверждение отказа ИМС, регистрация условий его возникновения и особенностей проявления;
- 2) локализация (выделение) отказавшего элемента микросхемы;
- 3) физико-технический анализ дефекта, которым обусловлен отказ;
- 4) идентификация причины отказа, т.е. распознавание причины, известной по ранее проведенным исследованиям.

На этапе подтверждения отказа ИМС обычно осуществляют проверку соответствия электрических параметров микросхемы требованиям технических условий, контроль внешнего вида и в случае необходимости – контроль параметров при повышенной или пониженной температуре, механических нагрузках и т.д. При этом фиксируют все особенности и условия проявления отказа, что нужно для дальнейшего установления его вида и причины.

Локализация отказавшего элемента ИМС дает возможность сузить область дальнейших исследований и установить логический элемент или цепочку элементов, работоспособность которых нарушена. Для достаточно простых ИМС (первой и второй степеней интеграции) локализация отказавшего элемента может быть осуществлена анализом принципиальной схемы и рассмотрением ее входных и выходных параметров. Для сложных ИМС (третьей, четвертой и больших степеней интеграции) отказавший элемент наиболее рационально отыскивать машинной диагностикой, основанной на анализе математико-логических моделей БИС по специальным программам на ЭВМ либо вручную, но с использованием специальных диагностических таблиц и словарей неисправностей. Особенно важно уметь осуществлять диагностику до вскрытия корпуса, так как последнее может привести к исчезновению или искажению признаков и проявлений отказа,

но это не всегда удается. После вскрытия корпуса осуществляют дальнейшую локализацию отказавшего элемента (транзистора, диода, резистора и т.д.) путем использования либо результатов схемотехнического анализа работы схемы и ее логических элементов, либо физико-технических методов анализа (растровая электронная микроскопия, жидкокристаллическая индикация и т.д.).

После локализации отказавшего элемента схемы проводят этап исследования дефекта, вызвавшего отказ, и определение его характеристик. Эту задачу решают методами физико-химических исследований и анализов с применением специального оборудования и приборов.

Заключительный этап анализа отказов – идентификация причины отказа, т.е. логический переход от наблюдаемого дефекта, вызвавшего отказ микросхемы, к причине отказа. Причинами отказов ИМС могут быть ошибки разработки (схемотехнические и топологические), недостатки технологии, производственные дефекты, перегрузки или несоблюдение правил применения ИМС при испытаниях и эксплуатации.

4.4.2. Организация и обеспечение анализа отказов ИМС

Сложность и комплексный характер работ по анализу отказов требуют четкой организации их проведения в промышленных условиях на основе комплекта документации, определяющей как техническое обеспечение анализа (методики, инструкции и т.д.), так и организацию взаимодействия различных подразделений и служб в процессе этого анализа. Рассмотрим основные принципы организации и обеспечения анализа отказов на предприятии:

1. Анализ отказов должен осуществляться на основе типовой программы, определяющей маршрутную последовательность операций, необходимых и достаточных для проведения анализа. Типовой маршрут или программа являются общими для ИМС широкого класса, а методы выполнения каждой операции специфичны и зависят от конкретных особенностей анализируемых микросхем.

2. Для обеспечения анализа отказов необходимо наличие полного комплекта документации, позволяющей выполнить поэтапно все процедуры маршрутной схемы. Часть документации (функциональные схемы, технические условия) составляют в обязательном порядке при разработке изделия, другую часть (диагностический словарь, руководство по диагностике, эталоны качества) разрабатывают дополнительно при освоении производства изделий.

3. Организацией и обеспечением анализа отказов на предприятии должно заниматься специализированное подразделение, укомплектованное квалифицированными специалистами и необходимым оборудованием.

В качестве примера рассмотрим программу анализа отказов наиболее массовых МДП-БИС (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Полная программа анализа отказов МДП-БИС

№этапа	Наименование этапа	Метод	Наименование работы	Оборудование, средства
1	Контроль электрических параметров БИС на соответствие ТУ и диагностика логического элемента в составе ИМС 3-й – 4-й степени интеграции	Измерение параметров и проверка функционирования по методам, изложенным в ТУ на изделие	Измерение статических параметров. Измерение динамических параметров. Проверка функционирования. Анализ результатов проверки и определение отказавшего логического элемента (диагностика)	Контрольно-измерительная аппаратура в соответствии с технической документацией. Диагностические программы, тестовые таблицы, словари
2	Проверка корпуса до вскрытия	Масс-спектрометрия. Вакуумно-жидкостная индикация. Рентгеновская интроскопия. Люминесцентная дефектоскопия. Индикаторные пасты, проникающие красители	Проверка малых и средних течей. Проверка посадки кристалла на основание корпуса; на наличие посторонних частиц. Определение мест утечки в корпусах	Масс-спектрометр. Гелиевый течеискатель. Установка вакуумно-жидкостная. Рентгеновский телевизионный микроскоп. Люминесцентный микроскоп. Оптический стереоскопический микроскоп
3	Анализ газовой среды корпуса и загрязнений на поверхности кристалла до и после вскрытия корпуса	Хроматография. Температурная выдержка. Оптическая и ультрафиолетовая микроскопия	Анализ состава газа в корпусе микросхемы. Определение температурной зависимости параметров структур, чувствительных к состоянию поверхности. Вскрытие корпуса. Проверка загрязнений (наличие фоторезиста, пылинок)	Термостат. Измерители электрофизических параметров и характеристик. Установка для вскрытия корпуса. Биологический микроскоп. Ультрафиолетовый микроскоп

№этапа	Наименование этапа	Метод	Наименование работы	Оборудование, средства
4	Визуальный контроль кристалла в корпусе	Оптическая микроскопия. Интерферометрия. Эллипсометрия. Оптические измерения	Определение обрывов соединений и металлизации, трещин, качества со-вмещения, царапин, микроплазм, прозрачных загрязнений. Измерение толщины оксида, металлизации. Измерение линейных размеров, оценка топологии	Биологический микроскоп. Универсальный исследовательский микроскоп с фазовым контрастом, светлым и темным полем. Стереоскопический микроскоп. Интерферометр. Эллипсометр. Растровый измерительный микроскоп. Профилометр. Фотоаппарат
5	Диагностика отказавшего МДП-транзистора в составе логического элемента	Логический анализ. Потенциальный контраст. Инфракрасная радиометрия.	Определение отказавшего МДП-транзистора в составе логического элемента. Локализация отказавшего элемента на кристалле в составе логической ячейки. Установление места отказа. Оценка посадки кристалла на корпус	Пульт проверки электрических параметров логического элемента МДП-транзистора. ЭВМ и диагностические таблицы. Растровый электронный микроскоп. Пульт контроля электрических параметров МДП-БИС и логического элемента
6	Изоляция отказавшего элемента	Пережигание дорожек электрическим током; лазером. Фотолитография. Электроизмерения	Изоляция отказавшего элемента на кристалле. Измерение параметров изолированного элемента	Инфракрасный радиометр. Зондовая установка. Лазерная установка. Световой зонд. Координатный столик. Фотолитографическое оборудование. Измерители параметров МДП-транзисторов
7	Установление отказавшего компонента в МДП-транзисторе и вида отказа	Фотоответ. Наведенный ток, потенциальный контраст. Стереоскопическое исследование. Фазовый контраст. Измерение геометрических размеров на оптических приборах	Световое сканирование. Электронное сканирование. Микроскопические измерения и обследование отказавшего элемента и кристалла в целом. Исследование зарядовой стабильности оксида	Фотоскан. Растровый электронный микроскоп. Пульт подачи напряжений на БИС. Стереоскопический микроскоп с большим увеличением. Профилометр. Растровый измерительный микроскоп

№этапа	Наименование этапа	Метод	Наименование работы	Оборудование, средства
8	Исследование отказавшего компонента	Измерение электрофизических параметров	Исследование ВАХ. Исследование диэлектрических свойств оксида. Исследование токов утечки р-п-переходов.	Камера теплоты и холода. Приборы и установки для измерения электрофизических параметров оксида и р-п-переходов. Монохроматор. Световой зонд. Зондовая установка
9	Определение микропримесей и загрязнений	Рентгеновский спектральный анализ. Спектрография инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения	Определение химических элементов и концентрации легирующих примесей. Анализ интерметаллических соединений, продуктов коррозии. Определение состава загрязнений	Электронный микрозонд. Ионный микрозонд. Установка микроспектрального анализа. ИК-спектрометр
10	Анализ структуры материалов	Дифракция электронов. Дифракция рентгеновского излучения. Электронная микроскопия. Избирательное травление и микроскопическое исследование. Металлография	Определение кристаллической структуры интерметаллических соединений, включений, загрязнений. Определение механических напряжений в материалах. Определение дислокаций, дефектов упаковки, пор, выступов, трещин, размера ступенек оксида. Определение дефектов в оксиде и кремнии в комбинации с этапами 4, 8, 9. Определение качества сварных соединений, адгезии, глубины переходов	Электроннограф. Дифрактометр. Просвечивающий электронный микроскоп. Растровый электронный микроскоп. Вытяжной шкаф. ИК-микроскоп. Шлифовальный станок. Металлографический микроскоп

4.4.3. Основные виды и причины отказов ИМС

Анализ причин потери работоспособности ИМС при их испытаниях и эксплуатации в составе РЭА показывает, что на современном этапе развития микроэлектроники преобладают внезапные отказы, вызванные разрушением элементов конструкции из-за несовершенства отдельных технологических операций, нарушением или ошибками в процессе их производства, несоблюдением требований нормативно-технической документации на этапе применения. Основным источником внезапных отказов ИМС (табл. 4.7) является нарушение электрической цепи.

Таблица 4.7

Распределение внезапных отказов ИМС по видам и причинам

Вид отказа	Причина отказа	Доля отказов, %
Обрыв сварного соединения	Малая механическая прочность сварного соединения. Образование интерметаллических соединений. Превышение допустимого уровня механических нагрузок	20
Обрыв тонкопленочных проводников и резисторов	Механические повреждения, подтравы. Превышение допустимого уровня тока. Химическая и электрохимическая коррозия	20
Короткое замыкание и повышенный ток утечки	Загрязнение поверхности диэлектрических пассивирующих пленок или корпуса. Дефекты диэлектрика. Превышение допустимого уровня напряжений	22
Дефекты фотолитографии	Ложная диффузия. «Недотрав» или «перетрав» оксидов и металлов. Неполное удаление фоторезиста	10
Объемные дефекты кристалла	«Смыкание» в транзисторах с тонкой базой. Пробои в местах локальных дефектов структуры	10
Дефекты сборки и корпуса вследствие негерметичности	Негерметичность корпуса, коррозия деталей корпуса	15
Прочие	Механические повреждения гибких проводников. Инородные частицы в корпусах. Некачественная посадка кристалла на основание	3

Причинами обрывов электрических цепей являются недостаточная прочность сварных соединений в местах контакта разнородных материалов, химическое, электрическое, механическое разрушение металлических тонкопленочных проводников, дефекты сборки микросхем.

Короткие замыкания в электрических цепях микросхем в основном обусловлены:

- дефектами фотолитографии и диэлектрических пленок;
- возникновением каналов с инверсной электропроводностью;
- дефектами кристаллической решетки полупроводникового кристалла;
- дефектами сборки.

Основными причинами параметрических отказов ИМС, выражающихся в большинстве случаев в увеличении токов утечки, являются возникновение каналов электропроводности из-за миграции подвижных зарядов в оксидной пленке, загрязнения поверхности кристалла и разгерметизация корпуса.

С точки зрения физических причин отказы условно делятся на три категории:

- объемные, связанные с явлениями в объеме полупроводникового кристалла;
- поверхностные, обусловленные явлениями на поверхности кристалла;
- контактные, обусловленные нарушением контактных соединений и обрывом тонкопленочных проводников.

4.4.3.1. Объемные отказы. Возникновение отказов, связанных с объемными явлениями, объясняется появлением или развитием в процессе эксплуатации ИМС структурных несовершенств полупроводникового кристалла (дислокаций, дефектов упаковки, микротрещин и т.д.) либо перераспределением легирующих примесей в объеме кристалла. Дислокации и другие дефекты кристаллической структуры (трещины, деформации и механические напряжения в кристалле), развиваясь в процессе эксплуатации микросхемы под воздействием термических и механических нагрузок, могут вызвать существенные изменения электрических характеристик, происходящие обычно постепенно.

При увеличении плотности упаковки и уменьшении геометрических размеров активных и пассивных элементов ИМС степень влияния локальных дефектов полупроводниковой структуры на их надежность возрастает.

Основными механизмами деградации свойств эпитаксиальных и диффузионных слоев микросхем с «мелкими» р-п-переходами являются движение дислокаций, изменение внутренних напряжений кристаллической решетки, рекристаллизация, распад твердых растворов. Эти процессы приводят к изменению концентрации, подвижности, времени жизни носителей заряда, а значит, к повышению токов утечки, снижению пробивного напряжения переходов, ухудшению быстродействия микросхем.

4.4.3.2. Поверхностные отказы. Нанесение диэлектрических пленок на поверхность кристалла может оказать существенное влияние на надежность микросхем в связи с изменением следующих характеристик системы Si – SiO₂:

- 1) величин подвижного и неподвижного зарядов в оксиде;

2) стабильности заряда в оксиде при воздействии электрического поля и повышенной температуры;

3) скорости поверхностной рекомбинации.

При работе микросхем на границе раздела Si – SiO₂ в приповерхностной области полупроводникового кристалла происходит перераспределение электрических зарядов различной природы, присутствующих на поверхности и внутри пленки SiO₂ (ионы, электроны и дырки, избыточные атомы Si, «ловушки» и т.д.). Это приводит к существенным изменениям характеристик p-n-переходов и иногда – к появлению поверхностных каналов с инверсной электропроводностью. Вследствие этого возрастают токи утечки и ухудшаются параметры микросхем.

Наиболее чувствительны к состоянию оксида МОП-структуры, в которых эффект поверхностной миграции ионов усиливается вследствие того, что оксид под затвором является «рабочим» элементом микросхемы и определяет пороговое напряжение – основную электрическую характеристику схемы.

Повышенная концентрация и подвижность ионов наблюдаются обычно при недостаточно эффективной очистке поверхности пластины перед окислением при внесении загрязнений в процессе нанесения оксида, а также при большой плотности дефектов в оксидной пленке. Инверсные каналы могут быть ликвидированы высокотемпературным отжигом без подачи обратного смещения на микросхему. Однако источник нестабильности при этом не устраняется, и при последующей работе микросхемы в условиях повышенной температуры каналы вновь образуются.

Для стабилизации поверхности широко применяются дополнительное легирование оксида фосфором, так как образующийся при этом тонкий слой фосфорно-силикатного стекла обладает геттерирующими свойствами по отношению к ионам щелочноземельных металлов и играет роль барьера, препятствуя накоплению ионов у поверхности раздела.

4.4.3.3. Контактные отказы. В ИМС обычно используются два типа контактных соединений:

- тонкопленочные металлические проводники, применяемые для внутрисхемной разводки между элементами на кристалле (плате);
- соединения тонкопленочных металлических контактных площадок на кристалле с внешними выводами корпуса, выполняемые обычно с помощью золотых или алюминиевых микропроводников.

При формировании контактных соединений в микросхемах используется большое число разнородных материалов (золото, алюминий, кремний, подслои молибдена, ванадия, вольфрама, платины, титана, керметные и силицидные соединения), взаимодействие между которыми может в ряде случаев стать причиной отказа микросхемы. Отказы контактных соединений проявляются чаще всего как обрыв электрической цепи или увеличение контактного сопротивления и обусловлены двумя механизмами: скоплением вакансий в различных областях внутрисхемной разводки; образованием областей с электроизолирующими свойствами на границе раздела разнородных материалов, которые используют в конструкции микросхемы. Обобщенные данные по относительному распределению видов отказов для биполярных ИМС различной степени интеграции приведены на рис. 4.6. Для МДП-БИС характерны те же отказы, что и для биполярных ИМС, однако характер их распределения по видам другой (рис. 4.7).

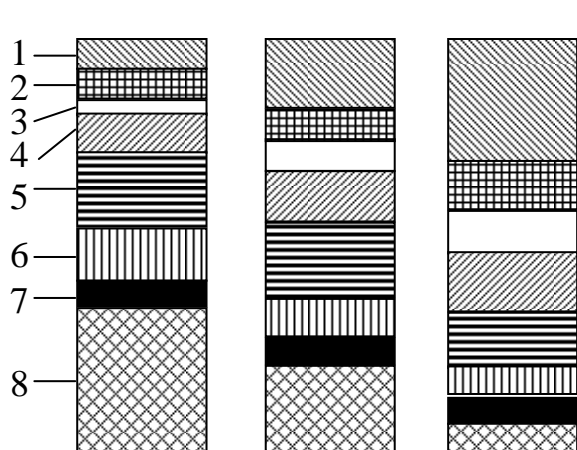


Рис. 4.6. Относительное распределение видов отказов биполярных ИМС и БИС, обусловленных:

- 1 – дефектами металлизации; 2 – дефектами диффузии; 3 – наличием инородных частиц; 4 – неопознанными причинами; 5, 6, 7 – соответственно, дефектами кристалла, оксида и герметизации кристаллодержателя; 8 – неправильным применением

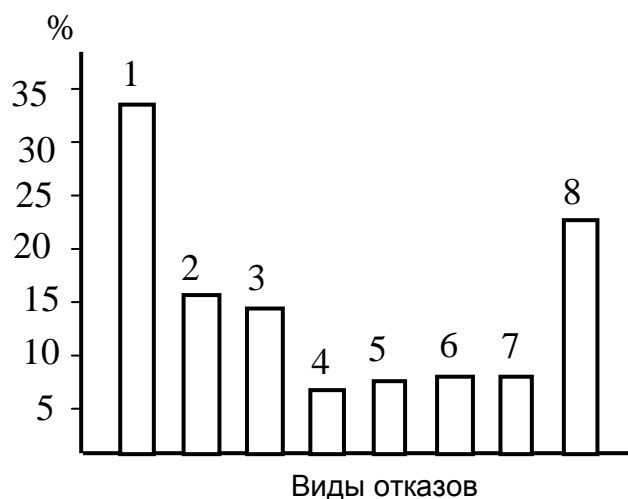


Рис. 4.7. Распределение видов отказов МДП-БИС, обусловленных:

- 1 – дефектами оксида; 2 – электрическими перегрузками; 3 – зарядовой нестабильностью; 4 – 7 – соответственно, дефектами металлизации, корпуса, монтажа, фотолитографии; 8 – прочими дефектами

4.4.3.4. Отказы, вызванные нарушением условий применения ИМС в РЭА. Особую и довольно значительную группу отказов ИМС при их работе в составе РЭА, а также на этапах ее производства и испытаний составляют отказы, обусловленные нарушением требований и рекомендаций по применению ИМС в части схемотехнического и конструктивного

решений при разработке РЭА на микросхемах (табл. 4.8), а также несоблюдением ряда технологических требований в процессе сборки, регулировки и испытаний блоков и узлов на микросхемах.

Анализ отказов, их статистическая обработка по видам, установление причин возникновения являются важным звеном в комплексе мероприятий, направленных на повышение качества и надежности ИМС.

Таблица 4.8

Нарушения условий применения и связанные с ними виды отказов ИМС

Условия применения (конструкция, схемотехника)	Возможный вид отказа
Питание РЭА от источников, дающих в моменты включения и выключения выбросы напряжения, превышающие допустимые по ТУ для ИМС; связь микросхем с трансформаторами, дающими выбросы напряжения в переходных режимах	Обрывы гибких проводников с оплавлением концов. Обугливание защитных покрытий активных элементов гибридных ИМС. Обрывы металлизированной разводки на кристалле. Короткие замыкания переходов и тонкопленочных конденсаторов. Короткие замыкания цепей вследствие образования каналов и проколов оксида под действием термомеханических напряжений
Режим, превышающий нормы и требования ТУ (по температуре и электрической нагрузке)	Ускорение развития известных механизмов отказов и сокращение срока службы. Возникновение механизмов отказов, не известных или не характерных для ИМС при нормальной эксплуатации

4.4.4. Пути повышения качества и надежности ИМС

Существуют различные подходы к расчету, оценке и прогнозированию показателей качества и надежности ИМС, основанные на вероятностно-статистических и причинно-следственных методах исследований.

Эксплуатационная надежность современных ИМС характеризуется интенсивностью отказов $10^{-6} - 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ и минимальной наработкой 12 – 15 тыс. часов в зависимости от конструктивно-технологического исполнения. В отдельных случаях изготовления полупроводниковых биполярных ИМС по усовершенствованной технологии достигнута эксплуатационная надежность 10^{-10} ч^{-1} . Полупроводниковые ИМС характеризуются более высокой надежностью, чем гибридные, что объясняется большим количеством внутрисхемных контактных соединений в гибридных ИМС (из-за применения навесных компонентов). Надежность БИС при оценке по результатам испытаний значительно ниже надежности полупроводниковых ИМС 1-й и 2-й степеней интеграции, однако выше при расчете на одну выполняемую функцию.

Пути повышения надежности ИМС могут быть различными: развитие научных основ проектирования изделий (аппаратуры и самих ИМС) с целью обеспечения заданных требований к надежности и долговечности, принятие ряда мер по совершенствованию методов конструирования; улучшение технологии, применение более надежных и стабильных во времени материалов и комплектующих изделий, использование специальных приемов, изучаемых теорией надежности (например, резервирования). Большие возможности для разработки мер по повышению качества и надежности ИМС открывают физические методы исследования надежности, методы прогнозирования, анализ отказов. Весьма эффективными для прогнозирования надежности разрабатываемых ИМС являются имитационные методы, основанные на имитационном моделировании деградиационных процессов в ИМС с помощью ЭВМ, что позволяет отказаться от натуральных испытаний. В настоящее время разработаны для исследования на ЭВМ имитационные модели внезапных и постепенных отказов с целью прогнозирования надежности ИМС и их элементов (выводов, соединений, металлизации, активных и пассивных элементов).

Резервирование элементов и соединений между ними в составе кристалла, что сравнительно легко достигается технологически, также позволяет существенно повысить надежность БИС, особенно с регулярной структурой (ЗУ, МП).

Для обеспечения работ по повышению качества и надежности выпускаемых ИМС необходимо провести организационные, производственные и научно-технические мероприятия.

Организационные мероприятия предусматривают внедрение аттестации работников, выполняющих определенные операции, технологических процессов, оборудования; организацию службы качества и надежности; внедрение системы управления качеством труда и подготовки кадров. К производственным мероприятиям следует отнести разработку и применение новых материалов; внедрение новых прогрессивных технологических процессов; использование автоматизированного высокоточного и высокопроизводительного технологического, контрольно-измерительного и испытательного оборудования с применением ЭВМ; внедрение оптимальной системы испытаний с применением ЭВМ; внедрение совершенной системы пооперационного анализа брака и отказов изделий на этапах разработки, производства и применения.

Главное внимание при создании БИС и СБИС при этом уделяется вопросам контроля дефектов (в первую очередь привнесенных), отбраковочных испытаний на этапе применения БИС, а также автоматизации тестирования БИС путем встроенных в кристалл схем контроля их работоспособности.

4.5. Контрольные вопросы к главе 4

- 4.1. Что регламентирует электронная гигиена?
- 4.2. Какие виды брака возникают при изготовлении микроэлектронных изделий в помещениях с повышенной запыленностью воздушной среды?
- 4.3. По какому параметру принято оценивать запыленность воздуха? Приведите численные примеры.
- 4.4. Какие методы уменьшения запыленности воздушной среды применяются в микроэлектронном производстве?
- 4.5. Приведите примеры негативного температурного воздействия на качество и воспроизводимость технологических процессов в микроэлектронном производстве.
- 4.6. Приведите примеры негативного воздействия повышенной влажности на микроэлектронные изделия.
- 4.7. Охарактеризуйте категории производственных помещений по микроклимату.
- 4.8. Для чего предназначены пылезащитные кабины, пылезащитные камеры, химические скафандры, модульные чистые комнаты.
- 4.9. По какому параметру в микроэлектронном производстве принято оценивать степень чистоты воды?
- 4.10. Охарактеризуйте стадии предварительной, окончательной и финишной очистки воды, применяемой в микроэлектронном производстве.
- 4.11. Классифицируйте основные источники микрочастиц пыли в производственном помещении.
- 4.12. Охарактеризуйте детерминированную и стохастическую составляющие технологического процесса.
- 4.13. Какие методы применяются в настоящее время для анализа технологических процессов?
- 4.14. Приведите основное отличие АСУП от АСУТП.
- 4.15. Охарактеризуйте производственную иерархию технологического процесса изготовления ИМС.
- 4.16. Какое основное требование предъявляется к технологическим процессам в микроэлектронном производстве?
- 4.17. Каким образом проводят проверку адекватности модели и исследуемого технологического процесса при физическом моделировании?
- 4.18. Какие виды моделирования технологических процессов применяют в микроэлектронном производстве? Охарактеризуйте их.

4.19. В чем сущность принципа изоморфизма математических моделей? Приведите примеры.

4.20. Чем отличаются математические модели с распределенными и с сосредоточенными параметрами?

4.21. Перечислите основное отличие статического моделирования от динамического.

4.22. Что включает полная математическая модель технологического процесса?

4.23. Приведите схему процесса математического моделирования.

4.24. При математическом моделировании основным этапом является изучение теоретических основ процесса. Какие действия следует выполнять на этом этапе?

4.25. При построении модели процесса составляют поточно-информационную диаграмму. Опишите особенности ее построения.

4.26. Что в микроэлектронике понимается под термином «большая технологическая система»? Приведите соответствующую иллюстрацию.

4.27. Укажите пути решения задач, направленных на оптимальное управление технологическими процессами.

4.28. Для каких целей применяются дисперсионный и корреляционно-регрессионный методы анализа?

4.29. В чем сущность дисперсионного анализа технологического процесса?

4.30. Приведите критерий Фишера. В каком случае изучаемый технологический фактор влияет на качество изделия?

4.31. Приведите уравнение регрессии, применяемое при корреляционно-регрессионном анализе. Как интерпретируются коэффициенты полинома?

4.32. Укажите основное условие применимости регрессионного анализа. В чем состоит основная задача корреляционного анализа.

4.33. Приведите матрицу планирования для двух исследуемых технологических факторов.

4.34. Приведите матрицу планирования для трех исследуемых технологических факторов.

4.35. Охарактеризуйте схему оптимизации технологического процесса.

4.36. Для чего необходимо проведение анализа отказов микросхем?

4.37. Охарактеризуйте основные этапы анализа отказов микросхем.

4.38. Какие действия выполняют на этапе подтверждения отказа ИМС?

- 4.39. Почему важно осуществлять диагностику отказа до вскрытия корпуса микроэлектронного изделия?
- 4.40. Какие методы используются на этапе исследования дефекта, вызвавшего отказ микроэлектронного изделия?
- 4.41. Укажите типичные причины отказов ИМС.
- 4.42. Охарактеризуйте основные принципы организации и обеспечения анализа отказов на предприятии.
- 4.43. Перечислите основные этапы анализа отказов МДП-БИС.
- 4.44. Перечислите основные виды внезапных отказов ИМС. Укажите основные причины этих отказов.
- 4.45. Чем обусловлены короткие замыкания в электрических цепях микросхем?
- 4.46. Укажите основные причины возникновения параметрических отказов микросхем.
- 4.47. Перечислите категории отказов с точки зрения физических причин, их вызвавших.
- 4.48. С чем связаны объемные отказы микросхем? Приведите примеры.
- 4.49. В чем проявляются основные механизмы деградации свойств эпитаксиальных и диффузионных слоев в микросхемах?
- 4.50. Охарактеризуйте поверхностные отказы, возникающие в полупроводниковых микросхемах.
- 4.51. Какие элементы полупроводниковых микросхем наиболее чувствительны к состоянию оксидного слоя? Приведите поясняющие примеры.
- 4.52. Какие меры применяются для стабилизации поверхности микросхем?
- 4.53. По каким механизмам возникают отказы контактных соединений?
- 4.54. Какие отказы возникают при нарушении условий применения микроэлектронных изделий?
- 4.55. Почему надежность полупроводниковых ИМС выше надежности ГИС?
- 4.56. Охарактеризуйте пути повышения надежности ИМС.
- 4.57. В чем сущность имитационных методов, применяемых для прогнозирования надежности микросхем?
- 4.58. Перечислите организационные и производственные мероприятия, служащие для повышения качества и надежности выпускаемых ИМС.

Литература

1. Волков, В.А. Сборка и герметизация микросхем / В.А. Волков. – М.: Радио и связь, 1982.
2. Курносов, А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. пособие для профтехучилищ / А.И. Курносов. – М.: Высш. шк., 1980. – 327 с.
3. Попова, Г.Е. Использование эпоксидных компаундов для герметизации полупроводниковых приборов и микросхем / Г.Е. Попова. – М.: Энергия, 1985.
4. Чернышова, Т.И. Конструирование и технология полупроводниковых интегральных микросхем на униполярных транзисторах: учеб.-метод. пособие / Т.И. Чернышова, Н.Г. Чернышов. – Тамбов: ТГТУ, 2005. – 44 с.
5. Коледов, Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров, микросборок: учебник для вузов / Л.А. Коледов. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.
6. Коледов, Л.А. Конструирование и технология микросхем: курсовое проектирование / Л.А. Коледов, В.А. Волков, Н.И. Докучаев; под ред. Л.А. Коледова. – М.: Высш. шк., 1984. – 231 с.
7. Березин, А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С. Березин, О.Р. Мочалкина. – М.: Радио и связь, 1983. – 232 с.
8. Достанко, А.П. Технология интегральных схем / А.П. Достанко. – Минск: Высш. шк., 1982. – 206 с.
9. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.П. Степаненко. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с: ил.
10. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М.: Высш. шк., 1991.
11. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – Т.1, 2. – М.: Мир, 1984.
12. Парфенов, О.Д. Технология микросхем / О.Д. Парфенов. – М.: Высш. шк., 1986.
13. Курносов, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. пособие для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики», «Полупроводниковые приборы». – 3-е изд., перераб. и доп. / А.И. Курносов, В.В. Юдин. – М.: Высш. шк., 1986. – 368 с.: ил.
14. Казённов, Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем / Г.Г. Казённов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 295 с: ил.
15. Готра, З.Ю. Технология микросхем: справочник / З.Ю. Готра. – М.: Радио и связь, 1991–528 с.: ил.
16. Черняев, В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: учебник для вузов. – 2-изд., перераб. и доп. / В.Н. Черняев. – М.: Радио и связь, 1987.
17. Матсон, Э.А. Конструкции и технология микросхем: учеб. пособие. / Э.А. Матсон. – Минск.: Высш. шк., 1985.
18. Бер, А.Ю. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.Ю. Бер, Ф.Е. Минскер. – М.: Высш. шк., 1986. – 279 с.
19. Матсон, Э.А. Справочное пособие по конструированию микросхем / Э.А. Матсон, Д.В. Крыжановский. – Минск: Высш. шк., 1982.
20. Микроэлектроника: учеб. пособие для вузов. В 9 кн. Кн. 5: Качество и надежность интегральных микросхем / И.Я. Козырь; под ред. Л.А. Коледова. – М.: Высш. шк., 1987.
21. Болванович, Э.И. Полупроводниковые пленки и миниатюрные измерительные преобразователи / Э.И. Болванович. – Минск: Наука и техника, 1981. – 214 с.
22. Пономорев, М.Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементы ЭВА: учебник для вузов / М.Ф. Пономорев. – М.: Радио и связь, 1982.
23. Методические указания к курсовому проектированию по курсу «Проектирование и производство интегральных микросхем» / Р.А. Бейлина [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 1996.

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
Цели и задачи дисциплин, их содержание и место в учебном процессе	6
Введение	33
Глава 1. Технологические процессы в полупроводниковой технологии	35
1.1. Подготовительные операции.....	35
1.1.1. Методы выращивания монокристаллов	35
1.1.2. Подготовка и разрезание полупроводникового слитка на пластины.....	42
1.1.3. Шлифование полупроводниковых пластин	50
1.1.4. Полирование полупроводниковых пластин.....	53
1.1.5. Контроль качества механической обработки	56
1.1.6. Виды загрязнений полупроводниковых подложек	59
1.1.7. Отмывка полупроводниковых подложек	61
1.1.8. Химическая обработка полупроводниковых подложек.....	63
1.1.9. Химико-динамическая обработка полупроводниковых подложек.....	65
1.1.10. Парогазовая обработка кремниевых подложек	66
1.1.11. Ионно-плазменная обработка подложек	67
1.1.12. Плазмохимическая обработка подложек.....	69
1.1.13. Контроль качества очистки	71
1.1.14. Осаждение гальванических покрытий.....	72
1.2. Легирование полупроводниковых пластин	74
1.2.1. Диффузия примесей	74
1.2.2. Ионное легирование полупроводников.....	80
1.3. Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых слоев	92
1.3.1. Особенности эпитаксиального роста. Стадии процесса	92
1.3.2. Установки эпитаксиального наращивания.....	95
1.3.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия	102
1.4. Формирование диэлектрических и поликристаллических кремниевых пленок	105
1.4.1. Применение диэлектрических и поликремниевых пленок в полупроводниковой технологии	105
1.4.2. Термическое окисление	107
1.4.3. Пиролитическое осаждение SiO ₂	110
1.4.4. Анодное окисление кремния	114
1.4.5. Осаждение пленок оксида кремния термическим испарением	115

1.4.6.	Реактивное катодное распыление оксида кремния	116
1.4.7.	Реактивное катодное осаждение пленок нитрида кремния	117
1.4.8.	Контроль толщины диэлектрических пленок	118
1.4.9.	Контроль пористости защитных диэлектрических пленок	121
1.5.	Литография.....	122
1.5.1.	Применение литографии	122
1.5.2.	Сущность процессов литографии	123
1.5.3.	Этапы и основные операции литографического процесса	124
1.5.4.	Методы литографии	126
1.5.5.	Современные технологии оптической литографии	142
1.6.	Разработка маршрута изготовления кристалла БИС	149
1.6.1.	Определение блочной структуры технологического маршрута.....	150
1.6.2.	Понятие микроцикла маршрута	152
1.6.3.	Структура и состав микроциклов маршрута.....	154
1.6.4.	Определение фрагментов структуры.....	157
1.6.5.	Построение стандартных микроциклов для формирования фрагментов базовой ячейки кристалла.....	158
1.6.6.	Анализ матрицы технологического маршрута	159
1.7.	Контрольные вопросы к главе 1.....	164
Глава 2.	Технологические процессы в гибридной технологии	176
2.1.	Методы получения тонких пленок	176
2.1.1.	Особенности тонкопленочной технологии	176
2.1.2.	Термовакuumное напыление	178
2.1.3.	Распыление ионной бомбардировкой.....	190
2.1.4.	Химическое осаждение пленок из растворов	197
2.1.5.	Металлизация	200
2.1.6.	Осаждение из газовой фазы.....	202
2.2.	Толстопленочная технология производства микросхем	211
2.2.1.	Особенности технологии толстопленочных структур	211
2.2.2.	Пасты и подложки толстопленочных микросхем	212
2.2.3.	Типовой маршрут изготовления толстопленочных структур.....	215
2.3.	Контрольные вопросы к главе 2.....	222
Глава 3.	Сборка и герметизация микросхем	226
3.1.	Разделение пластин и подложек	226
3.2.	Присоединение кристалла к основанию корпуса.....	231
3.2.1.	Пайка.....	231
3.2.2.	Приплавление с использованием эвтектических сплавов	235

3.2.3. Соединение стеклом и пластмассой	237
3.2.4. Приклеивание.....	238
3.3. Присоединение электродных выводов.....	240
3.3.1. Проволочный монтаж.....	240
3.3.2. Ленточный монтаж	241
3.3.3. Сварка и пайка электродных выводов.....	242
3.3.4. Монтаж с помощью жестких объемных выводов	248
3.3.5. Сборка интегральных микросхем на ленточных носителях.....	249
3.4. Герметизация микросхем.....	250
3.4.1. Характеристика способов герметизации.....	250
3.4.2. Корпусная герметизация	252
3.4.3. Сварка	258
3.4.4. Пайка.....	262
3.4.5. Заливка.....	263
3.4.6. Склеивание	264
3.4.7. Опрессовка компаундами	265
3.4.8. Капсулирование	266
3.4.9. Бескорпусная герметизация.....	268
3.5. Контрольные вопросы к главе 3.....	272
Глава 4. Производственно-технические особенности изготовления и эксплуатации микросхем	277
4.1. Электронная гигиена.....	277
4.2. Принципы исследования и моделирования технологических процессов.....	283
4.3. Принципы анализа технологических процессов.....	289
4.3.1. Дисперсионный анализ	291
4.3.2. Корреляционно-регрессионный анализ.....	293
4.3.3. Применение планирования экстремальных экспериментов в технологии ИМС	294
4.4. Анализ отказов ИМС.....	297
4.4.1. Этапы анализа отказов ИМС	298
4.4.2. Организация и обеспечение анализа отказов ИМС	299
4.4.3. Основные виды и причины отказов ИМС.....	303
4.4.4. Пути повышения качества и надежности ИМС	307
4.5. Контрольные вопросы к главе 4.....	309
Литература.....	312

Учебное издание

ДОВГЯЛО Дмитрий Александрович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ,
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОСХЕМОТЕХНИКА

Учебно-методический комплекс для студентов специальностей
1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование
радиоэлектронных средств»,
1-36 04 02 «Промышленная электроника»

В 2 частях

Часть 1

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Редактор *Т. В. Булах*

Дизайн обложки *Л. И. Вайдашевич*

Подписано в печать 12.12.2012. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 18,33. Уч.-изд. л. 17,5. Тираж 30 экз. Заказ 1873.

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.