

Ю.Б. Цветков

Процессы и оборудование микротехнологии

Модули 1 и 2

Учебное пособие

УДК 621.3.049.77 (075.8)

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н. Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Цветков, Ю. Б.

Процессы и оборудование микротехнологии: Модули 1 и 2 :
учебное пособие / Ю. Б. Цветков. — Москва : МГТУ им. Н. Э.
Баумана, 2017. — 122 с.

Дано описание общей последовательности процессов микротехнологии на примерах производства интегральных микросхем и кремниевого микродатчика давления. Рассмотрены основные этапы получения кремниевых монокристаллических пластин, ключевые операции микротехнологии — изготовление кремниевых пластин, оксидирование. Акцентируется внимание на взаимосвязи между свойствами материалов, структуры, устройством и электрическими характеристиками микроструктур. Рассмотрены физико-химические модели и методы анализа качества технологических процессов микротехнологии.

Для студентов МГТУ им. Н. Э. Баумана, обучающихся по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Наноинженерия».

© МГТУ им. Н. Э. Баумана, исключительное право, 2017.

© Цветков Ю. Б., авторские права, 2017.

Предисловие

Учебное пособие подготовлено для самостоятельной проработки студентами дисциплины «Процессы и оборудование микротехнологии», входящей в образовательную программу бакалавриата по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (уровень бакалавриата), профиль «Электронное машиностроение».

Цель изучения дисциплины — освоение системы общих принципов, положений и методов построения наукоемких технологических процессов на примере микротехнологии.

После изучения дисциплины студенты овладеют:

- базовыми знаниями о номенклатуре, возможностях и перспективах развития процессов и оборудования микротехнологий;
- методами анализа и управления качеством технологических процессов;
- практическими навыками исследования и реализации ключевых процессов микротехнологии.

Дисциплина и, соответственно, пособие построены по модульному принципу, каждый модуль представляет собой логически завершённый раздел курса.

Для каждого модуля приводится набор планируемых результатов обучения, заданных программой дисциплины. Достижение этих результатов оценивается при текущем контроле усвоения дисциплины.

Для изучения дисциплины необходимо предварительное освоение следующих дисциплин.

1. Иностранный язык («Профессиональная и научная терминология»).
2. Математический анализ («Дифференциальное исчисление»).
3. Аналитическая геометрия («Векторная алгебра», «Матрицы и системы линейных алгебраических уравнений»).
4. Интегралы и дифференциальные уравнения.
5. Линейная алгебра и функции многих переменных.
6. Информатика.
7. Физика («Физические основы термодинамики», «Электричество и магнетизм», «Электромагнитные волны и оптика», «Основы квантовой теории», «Физика твёрдого тела»).
8. Химия («Строение вещества», «Общие закономерности протекания химических процессов», «Химические и электрохимические процессы в растворах», «Химия элементов»).
9. Электронная компонентная база («Физические процессы в полупроводниковых структурах», модуль «Полупроводниковые приборы»).
10. Физико-химические основы электронных технологий.

Дисциплина предназначена для достижения ряда результатов обучения: что после освоения дисциплины студент будет **знать** (помнить и понимать), **уметь** (применять, анализировать, оценивать и даже создавать), какими важными навыками он будет **владеть**.

Планируемые результаты обучения сформулированы в программе дисциплины, их необходимо постоянно иметь в виду при ее изучении, особенно с учетом того, что достижение каждого результата будет оценено при текущем или промежуточном контроле.

Дисциплина построена по модульному принципу, каждый модуль представляет собой логически завершённый раздел курса.

На первом занятии каждый студент получает в электронном виде полный комплект учебно-методических материалов по дисциплине, включающий программу, лекционный курс, методические указания к выполнению лабораторных работ.

Лекционные занятия посвящены рассмотрению ключевых, базовых положений курса и разъяснению учебных заданий, выносимых на самостоятельную проработку.

Семинарские занятия проводятся для закрепления усвоенной информации, приобретения навыков ее применения для решения практических задач в предметной области дисциплины.

Лабораторные работы предназначены для приобретения опыта практической реализации основной профессиональной образовательной программы. Методические указания к лабораторным работам прорабатываются студентами во время самостоятельной подготовки. Необходимый уровень подготовки контролируется перед проведением лабораторных работ.

В ряде разделов пособия приведены приложения, разъясняющие основные положения смежных дисциплин, используемых в данном курсе.

Самостоятельная работа студентов включает проработку лекционного курса, выполнение домашних заданий, подготовку рефератов и пр. Результаты всех видов работы студентов оформляются в виде их личных портфолио, которые учитываются на промежуточной аттестации.

Предусматривается также расширение материала пособия в результате поиска, анализа, структурирования и представления в компактном виде современной информации из всех возможных источников.

Для этого в начале каждого раздела учебного пособия приведены ключевые слова на русском языке. В конце каждого модуля представлены списки дополнительной литературы и адреса источников в Интернете, которые можно использовать как начальные источники поиска информации. По ключевым словам необходимо найти дополнительную информацию по заданной теме и представить ее в виде аналитического обзора по заданным правилам. Новые термины следует оформить в виде глоссария, а изученный материал — в виде концептуальной карты (карты памяти).

Каждый раздел завершается списком контрольных заданий, которые необходимо проработать самостоятельно, учитывая, что аналогичные задания

будут предложены при текущем контроле усвоения каждого модуля дисциплины. Их следует выполнять строго по графику учебной работы, обсуждая результаты на семинарах и консультациях.

Текущий контроль проводится в течение каждого модуля, его итоговые результаты складываются из следующих оценок:

- защита домашних заданий, рефератов;
- защита лабораторных работ;
- контрольные работы,
- работа на лекциях и семинарах.

Для завершения работы в семестре студент должен выполнить все контрольные мероприятия, иметь полный комплект подготовленных домашних заданий, рефератов и концептуальных карт.

Промежуточная аттестация по дисциплине (экзамен) основывается на результатах текущего контроля, а также включает дополнительное контрольное мероприятие. Оно служит для оценки владения студентом ключевыми, базовыми положениями предметной области, умением их применять, проводить оценку, анализировать и создавать объекты по задаваемым параметрам.

Освоение дисциплины, ее успешное завершение на стадии промежуточного контроля (экзамена) возможно только при регулярной работе во время семестра и планомерном прохождении текущего контроля. Создать портфолио по трем модулям в каждом семестре, пройти по каждому модулю плановые контрольные мероприятия в течение экзаменационной сессии **невозможно**.

Введение

Одно из основных направлений развития современной техники — микроминиатюризация и повышение функциональности ее изделий.

Термин «микроминиатюризация» был введен в 50-х годах 20 века в США разработчиками электронной аппаратуры для первых спутников. Примечательно, что изначально приставка *микро-* в этом термине воспринималась как гипербола. Микроминиатюризация с применением электронных ламп и первых транзисторов обеспечивала всего лишь создание электронной аппаратуры с размерами меньшими, чем те, которые до этого считались миниатюрными.

Однако через два-три десятилетия этот термин приобрел буквальное значение — электронные устройства становились все миниатюрнее, при этом размеры электронных компонентов уменьшились, а их функциональные возможности увеличились радикально.

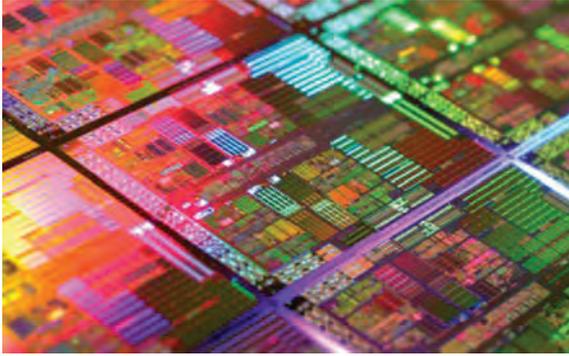
Появившийся термин «микроэлектроника» уже точно описывал новый раздел электроники, связанный с изучением и производством изделий, отдельные элементы которых были уменьшены до микронных, субмикронных и нанометровых размеров.

Бурное развитие микроэлектроники в последние десятилетия стало возможным благодаря разработке и непрерывному совершенствованию технологических методов, обеспечивающих массовое производство микроструктур с уникальными техническими параметрами и приемлемыми экономическими показателями.

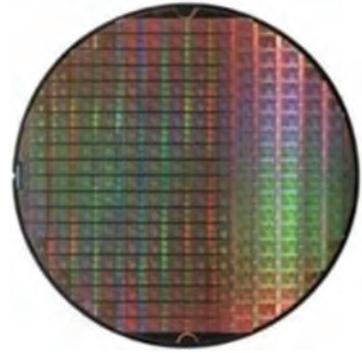
В наиболее полной мере эти методы реализованы в полупроводниковом производстве при изготовлении интегральных микросхем (рис. В1), а в последнее время микроэлектромеханических систем — МЭМС (рис. В2).

Именно в этих областях достигнуты наиболее впечатляющие практические результаты: резко возросло быстродействие микропроцессоров, увеличены объемы запоминающих устройств, радикально уменьшены размеры и повышена чувствительность кремниевых микродатчиков.

Расширение функциональных возможностей микроэлектронных компонентов привело к увеличению числа их выводов и, соответственно, к возрастанию плотности монтажа на подложках гибридных интегральных микросхем и микросборок, на многослойных печатных платах. Ширина проводников на этих изделиях уже сейчас составляет 20...50 мкм, непрерывно увеличиваются также их функциональные возможности. При этом структуры интегральных схем и микродатчиков формируют на групповых заготовках — подложках (см. рис. В1, В2). Тенденция к микроминиатюризации



a



б

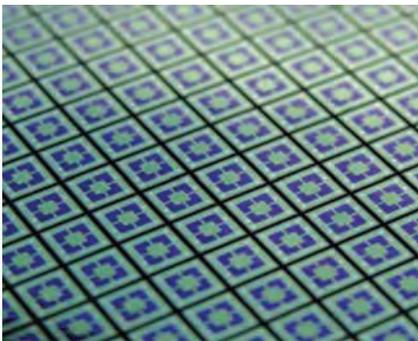
Рис. В1. Интегральные микросхемы:

a — топология отдельных кристаллов; *б* — кремниевая подложка (групповая заготовка)

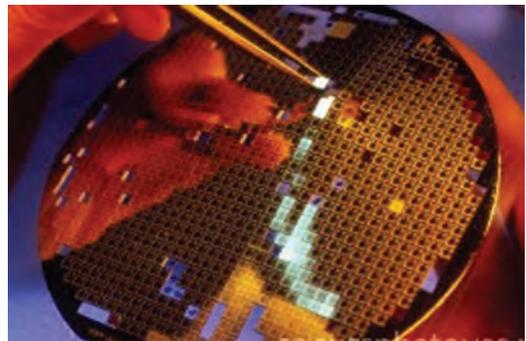
микроэлектронных компонентов очевидна. Методы технологии микроэлектроники получают широкое распространение в производстве электронной аппаратуры, например, при изготовлении печатных плат также используют групповые заготовки (рис. В3).

Технологические возможности микроэлектроники послужили основой для появления и бурного развития не только микросистемной техники, но и оптоэлектроники, они все более широко используются при изготовлении дифракционных оптических элементов и микроформованных деталей по технологии LIGA (нем. *Litographie, Galvanoformung, Abformung* — литография, гальваностегия, формовка).

К объектам микроминиатюризации относятся весьма разнородные по функциональному назначению и параметрам изделия. Вместе с тем с технологической точки зрения они имеют ряд общих признаков, т. е. являются плоскими, многослойными структурами, функциональные элементы



a



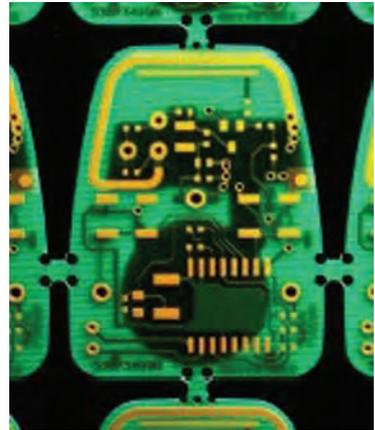
б

Рис. В2. Кремниевые микродатчики давления:

a — топология отдельных кристаллов; *б* — кремниевая подложка (групповая заготовка)



a



б

Рис. В3. Печатные платы:

a — топология; *б* — групповая заготовка

которых выполнены в виде микрорельефов в технологических слоях. Связь между слоями осуществляется электропроводящими микропереходами, при этом соответствующие элементы слоев точно совмещаются между собой. Внешние слои микроструктур должны быть подготовлены для контактирования с другими изделиями при сборке.

Уникальные возможности применяемых для изготовления таких структур технологических методов, оригинальность технических решений, их универсальность — все это характерные черты самостоятельного научно-технического направления, окончательно сформировавшегося в технике к концу 20-го столетия и получившего название «микротехнология» (англ. *microtechnology, microfabrication, microfabrication technology*).

Микротехнология представляет собой совокупность методов и технических средств (оборудования, инструментов, используемых материалов), применяемых для исследования, разработки и производства сверхминиатюрных приборов и устройств, элементы которых имеют микро- и нанометровые размеры.

Основу микротехнологии составляет комплекс групповых прецизионных технологий, разработанных для производства изделий микроэлектроники. Укрупненно можно выделить следующие этапы микротехнологии (рис. В4):

- 1) изготовление монокристаллических кремниевых подложек;
- 2) формирование на поверхности заготовок тонких функциональных слоев;
- 3) создание на поверхности слоя защитной маски с локальными окнами;
- 4) микрообработка функционального слоя через окна в маске;
- 5) микросборка.

Подложки (*wafers*) — заготовки для формирования микроструктур. Обычно это тонкие пластины из монокристаллического кремния, к структуре,

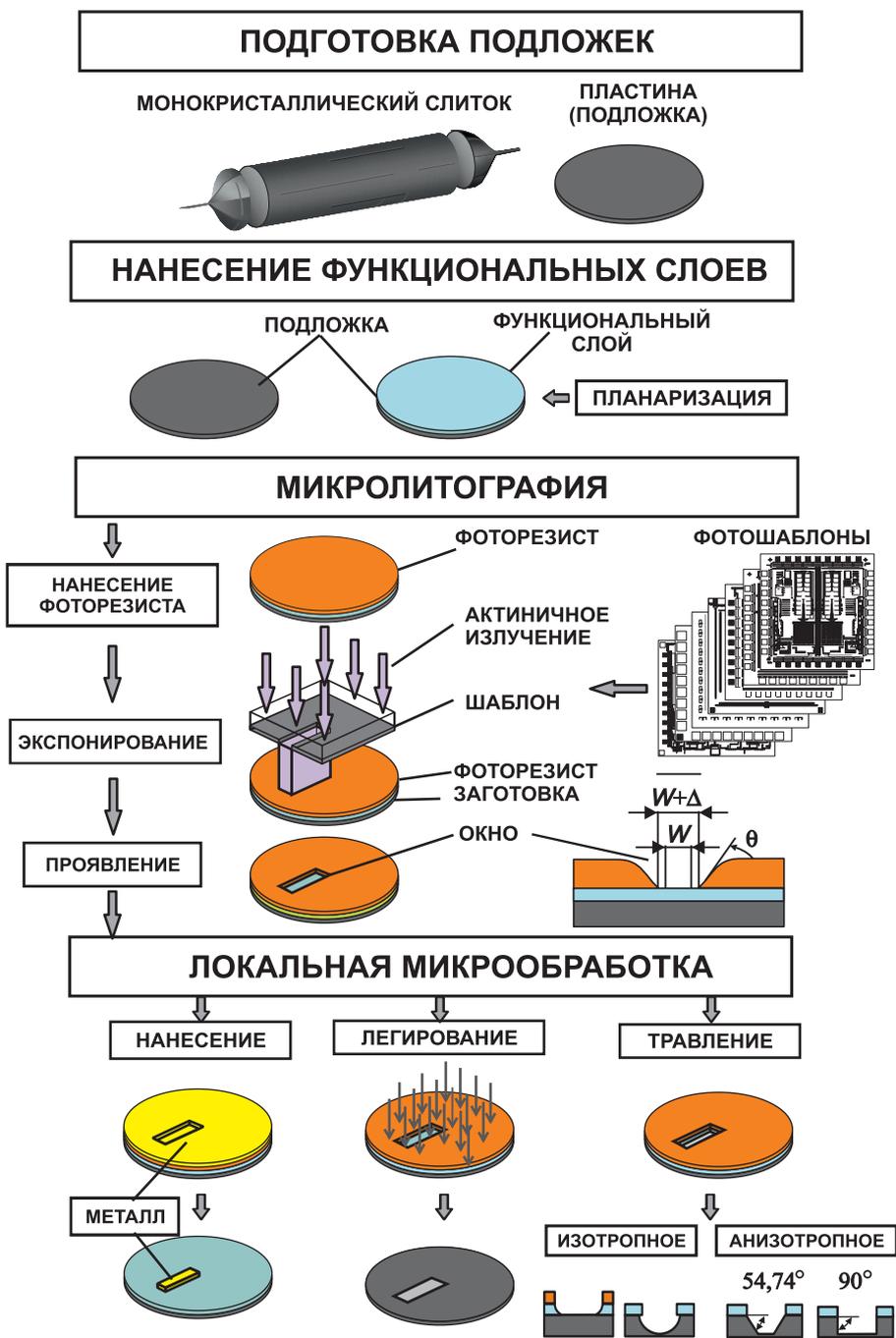


Рис. В4. Основные этапы и процессы микротехнологии:
 W (*Width*) — ширина; Δ — погрешности ширины; θ — угол наклона стенки

физическим и геометрическим параметрам которых предъявляются особые, часто беспрецедентные в технике требования.

Нанесение функциональных слоев реализуют методами *элионных технологий*, позволяющих с помощью электронных, ионных, атомарных и молекулярных потоков и сред создавать на поверхности подложек полупроводниковые, проводящие и диэлектрические слои толщиной от нескольких нанометров до единиц микрометров. Наиболее распространены методы нанесения тонких слоев вакуумным напылением (*physical vapour deposition — PVD*) и химическим осаждением из паровой фазы (*chemical vapour deposition — CVD*).

После нанесения функциональных слоев используют микролитографию (*microlithography*), которая позволяет локализовать зоны воздействия на заготовку. Для этого на поверхность заготовки наносят тонкую чувствительную к актиничному излучению полимерную пленку (резист) и экспонируют через шаблон с требуемым рисунком (топологией). Затем при проявлении происходит локальное удаление участков резиста, образуются окна требуемых размеров и формы, через которые возможен доступ к поверхности заготовки (см. рис. В4). Окна в резисте, их размеры и профиль должны отвечать чрезвычайно жестким требованиям, поскольку они определяют качество третьего этапа микротехнологии.

Микрообработка (*micromachining*) обеспечивает локальное воздействие на заготовку: нанесение материала, легирование поверхности заготовки или ее травление. При микрообработке воздействие обрабатывающей среды ограничивается (локализуется) окнами в резисте. Арсенал современных методов микрообработки весьма широк. Для локального нанесения могут использоваться методы элионных технологий, например вакуумное напыление, химическое осаждение из паровой фазы, а также гальваническое наращивание.

Локальное легирование проводят методами диффузии из парогазовой смеси или ионного легирования.

Локальное травление (изотропное или анизотропное) выполняют жидкостными травителями или с использованием плазменных методов, создающих требуемый профиль микроструктур.

Важной особенностью микротехнологии является групповой метод обработки (рис. В1, б; В2, б и В3, б), при котором за один цикл экспонирования формируют миллионы окон в пределах одного модуля на заготовке, а затем одновременно через эти окна заготовку подвергают микрообработке.

Возможность одновременного и относительно быстрого получения огромного числа элементов структур с микронными и субмикронными размерами оказала революционное воздействие на развитие микротехнологии.

Микросборка (*assembly*) начинается с разделения подложки на отдельные кристаллы и включает монтаж кристаллов на коммутационную плату или в корпус (*die placing*), электрическое соединение элементов кристалла с внешними выводами (*wire bonding*), а также его герметизацию (*packaging*).

Краткое рассмотрение основных этапов микротехнологии показывает, что для ее реализации используют очень широкий спектр технологических

процессов. В их число входят как универсальные, широко применяемые технологии, так и уникальные процессы, разработанные специально для создания микроструктур.

При этом универсальные технологии, которые используют в основном на этапе создания подложек (заготовок), сопровождаются весьма специфическими процессами.

Например, после металлургических процессов литейного производства применяют методы тонкой химической очистки поликристаллических слитков, выращивание монокристаллов и их глубокую очистку. Последующую механическую обработку (резка, шлифовка, полировка) полупроводниковых слитков и пластин выполняют только алмазными абразивными инструментами и методами химико-механической обработки.

На этапах нанесения функциональных слоев и их микрообработки применяют технологии, основанные на совершенно иных принципах, нежели технологии, имеющие дело с макротелами. К таким технологиям, например, относятся элионные процессы.

Элионные процессы — это процессы воздействия потоков высокоэнергетических частиц в вакууме на обрабатываемые материалы и изделия. Характер воздействия зависит от типа частиц (электроны, ионы, атомы, молекулы, газоразрядная плазма), от их энергии и химической активности, а также от материала твердого тела (металлы, полупроводники, диэлектрики и т. п.). В качестве среды обработки помимо вакуума используют парогазовые смеси, растворы реактивов, а обработку часто ведут при высокой температуре, которая должна поддерживаться с очень высокой точностью.

Не менее специфичны **процессы микролитографии**, обеспечивающей локализацию зоны обработки и позволяющей одновременно формировать на поверхности заготовки множество (до сотен миллионов) окон с микронными и субмикронными размерами элементов.

Большинство процессов микротехнологий строится на применении в производстве современных достижений фундаментальных наук, т. е. относятся к наукоемким технологическим процессам. Поэтому изучение дисциплины «Процессы и оборудование микротехнологии» основано на междисциплинарных связях с математикой, естественно-научными (физика, химия) и общетехническими (электроника, сопротивление материалов) дисциплинами. Предусмотрено также предварительное освоение физико-химических основ электронных технологий, а также владение иностранным языком (преимущественно, английским) для технических приложений.

Для достижения, поддержания и управления чрезвычайно жесткими, зачастую беспрецедентными параметрами процессов микротехнологии требуется применение как физических, так и статистических методов.

Современная микротехнология доведена до промышленного уровня, усилиями ученых разных стран разработаны научно-технологические основы производства микроструктур на базе групповой микрообработки.

МОДУЛЬ 1

Технологический анализ изделий микротехнологии

Модуль 1 дисциплины «Процессы и оборудование микротехнологий» посвящен технологическому анализу типовых изделий микротехнологии — интегральной микросхемы и кремниевого микродатчика давления.

Кратко рассмотрены принцип действия, структура и параметры современной интегральной микросхемы на основе МОП-структуры (металл — оксид — полупроводник). Выделены основные этапы процесса изготовления комплементарного МОП-инвертора (КМОП): формирование карманов р- и n-типа, щелевой изоляции, областей истока, стока и затвора, контактов к активным областям, многослойной металлизации. Описаны назначение операций процесса, их режимы и используемые материалы. Дополнительно в Приложениях к модулю 1 рассмотрены особенности масштабирования КМОП-микросхем, параметры металлических межсоединений, технология медных межсоединений — инкрустирование (damascene).

Описан принцип действия кремниевого микродатчика давления, его технические характеристики, маршрут и особенности основных операций изготовления чувствительного элемента из монокристаллического кремния. Приведена последовательность формирования пьезорезисторов мостовой схемы чувствительного элемента, контактов к ним и упругой диафрагмы. Дополнительно в Приложениях к модулю 1 рассмотрена суть тензо- и пьезоэффекта в кремнии.

Ключевые слова: КМОП-инвертор, процесс изготовления, карманы, щелевая изоляция, исток, сток, затвор, контакты к активным областям, многослойная металлизация, инкрустирование (damascene), кремниевая мембрана, пьезоэффект в кремнии, пьезорезисторы, мостовая схема.

Планируемые результаты обучения

После изучения модуля 1 «Технологический анализ изделий микротехнологии» Вы сможете:

- перечислить и объяснить не менее двадцати понятий и терминов, в том числе на английском языке, описывающих процесс изготовления изделий микротехнологии, дать формулировки их назначения и выполняемых функций;
- представить в виде блок-схем типовые маршруты изготовления заданных изделий, выделить в применяемых материалах проводники, диэлектрики, полупроводники;

- привести в соответствие формируемые микроструктуры и применяемые для этого фотошаблоны;
- для заданного изделия микротехнологии продемонстрировать взаимосвязь конструктивных элементов изделий и технологических процессов их изготовления, провести его технологический анализ, выявить и обозначить лимитирующие параметры и критические операции;
- для заданного технологического процесса микротехнологии выбрать характеризующие его ключевые термины и провести по ним поиск Интернет [1–4], в том числе иноязычной, обобщить и провести анализ информации по современному состоянию и перспективам развития процесса;
- представлять результаты работы с информацией в виде концептуальных карт (карт памяти [5]), аналитических обзоров и презентаций по заданным правилам [6–9].

1.1. Интегральные микросхемы как объект производства

В этом разделе приведены краткие сведения о принципе действия полупроводниковых приборов на примере МОП-транзисторов, о структуре и принципе действия интегральной микросхемы на основе комплементарного МОП-инвертора.

Основное внимание уделено рассмотрению маршрута и особенностям ключевых операций планарной технологии изготовления твердотельных интегральных микросхем.

1.1.1. Структура и принцип действия КМОП-микросхем

Полупроводниковые интегральные микросхемы — основной массовый объект современных микротехнологий.

Непрерывное совершенствование интегральных микросхем является катализатором прогресса важнейших отраслей народного хозяйства, поэтому уровень и объемы производства интегральных микросхем определяют научно-технический и оборонный потенциалы развитых стран.

Подавляющее большинство современных микросхем (и цифровых, и аналоговых) построено на полевых или МОП-транзисторах. Различают *p*- и *n*-канальные МОП-транзисторы.

Структуры *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов аналогичны и отличаются видом носителей (электроны и дырки соответственно), переносящих заряд от истока к стоку при приложении порогового напряжения.

Так, *n*-канальный МОП-транзистор — это транзистор, в котором области истока и стока имеют *n*-тип проводимости. Они сформированы в подложке *p*-типа. Область между истоком и стоком формирует канал, над которым размещен металлический или поликремниевый затвор, отделенный от канала диэлектриком — диоксидом кремния (SiO_2).

При подаче на затвор положительного напряжения возникает электрическое поле, отталкивающее от затвора носители заряда p -типа — положительные дырки (рис. 1.1).

В то же время поле притягивает в область канала электроны. По дости-

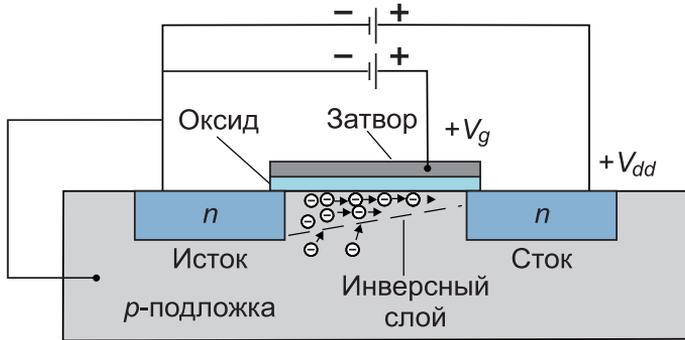


Рис. 1.1. Структура n -канального МОП-транзистора

жении порогового напряжения количество электронов в канале существенно превосходит количество дырок — происходит инвертирование.

При этом образуется проводящий канал n -типа, соединяющий исток со стоком, причем подзатворный диэлектрик предотвращает попадание электронов в затвор.

В p -канальном МОП-транзисторе исток и сток — это области p -типа в подложке n -типа, а переносчиками заряда являются дырки. Подача на затвор отрицательного напряжения ведет к инвертированию и формированию канала p -типа.

Объединение пары дополняющих друг друга (комплементарных) n - и p -канальных МОП-транзисторов в единую КМОП-структуру позволяет получить, например, схему инвертора, широко применяемого в современных микросхемах (рис. 1.2).

В КМОП-инверторе МОП-транзисторы $T1$ и $T2$ соединены последовательно так, что к их затворам подведено общее входное напряжение V_{in} , а стоки имеют общий выход V_{out} (рис. 1.2, а).

В n -канальном МОП-транзисторе $T1$ подложка p -типа обозначена стрелкой, направленной внутрь, а в p -канальном МОП-транзисторе $T2$ подложка n -типа обозначена стрелкой, направленной наружу (см. рис. 1.2, а).

Подложка n -канального МОП-транзистора $T1$ соединена с землей, а на подложку p -канального МОП-транзистора $T2$ подается напряжение питания V_{dd} (около +5 В).

КМОП-инвертор работает следующим образом. При подаче высокого входного напряжения V_{in} (сопоставимого с V_{dd}) n -канальный МОП-транзистор $T1$ включается. Напряжение между затвором и подложкой p -канального

МОП-транзистора $T2$ при этом близко к нулю, поскольку и затвор, и подложка имеют один и тот же потенциал V_{dd} . Поэтому МОП-транзистор $T2$ будет выключен, а выходное напряжение V_{out} будет низким.

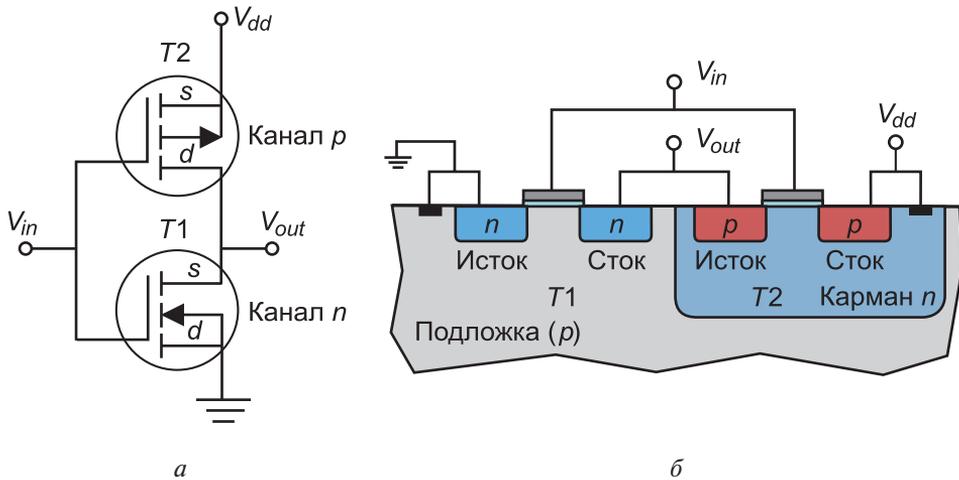


Рис. 1.2. КМОП-инвертор:
a — принципиальная схема; *б* — структура

Если же входное напряжение V_{in} будет низким (близко к потенциалу земли), n -канальный МОП-транзистор $T1$ выключится и напряжение между затвором и подложкой p -канального транзистора $T2$ будет равно $-V_{dd}$, так как потенциалы затвора и подложки равны 0 и $+V_{dd}$ соответственно.

Поскольку пороговое напряжение p -канального МОП-транзистора составляет примерно -2 В, он включится и выходное напряжение будет высоким.

Таким образом, высокое напряжение на входе КМОП-инвертора (логическая единица) даст на выходе низкое напряжение — логический нуль, напротив, низкое напряжение на входе (логический нуль) дает на выходе высокое напряжение — логическую единицу.

Следует отметить важное обстоятельство. Для формирования КМОП-инвертора в виде интегральной микросхемы на едином кремниевом кристалле необходимо учесть, что подложки МОП-транзисторов $T1$ и $T2$ имеют разный тип проводимости: p и n соответственно.

Кремниевые подложки, полученные из монокристаллических слитков, имеют определенный тип проводимости по всему рабочему полю. Поэтому в подложке создается локальная область с противоположным типом проводимости — карман (рис. 1.2, *б*), в котором формируется один из транзисторов.

В КМОП-инверторе, помимо контактов к стокам, истокам и затворам транзисторов, формируются также контакты к подложке и выделенному

в ней карману. Так, p -подложка n -канального МОП-транзистора $T1$ соединена с землей (см. рис. 1.2).

Напротив, n -карман p -канального МОП-транзистора $T2$ подключен к источнику питания V_{dd} (примерно +5 В). Таким образом, каждый транзистор имеет четыре контакта к своим активным элементам. При этом исток всегда подключен к подложке (или карману) и имеет с ней один потенциал.

Поскольку p -подложка подключена к земле, а n -карман — к положительному потенциалу, они образуют обратно смещенный p – n -переход, предотвращая протекание между ними электрического тока.

КМОП-структуры современных интегральных микросхем, в частности КМОП-инверторы (рис. 1.3), имеют минимальные размеры структур в диапазоне 25...180 нм. В рассматриваемом примере слой, в котором сформированы карманы МОП-транзисторов (рис. 1.3, a) — это *эпитаксиальный слой* p -типа толщиной 6...10 мкм, который наращивают на сильнолегированную пластину кремния ($p+$)-типа.

Сочетание сильно- и слаболегированных слоев кремния традиционно применяют при формировании транзисторных структур.

В структуре, приведенной на рис. 1.3, a , в слаболегированном эпитаксиальном слое выполнен не только n -карман, как на рис. 1.2, b , но дополнительно и p -карман. В этих карманах формируют МОП-транзисторы. В p -кармане выполнен МОП-транзистор n -типа, который включает две сильнолегированные близлежащие области ($n+$)-типа (исток и сток) (см. рис. 1.3, a).

Над узкой промежуточной областью между стоком и истоком (см. рис. 1.3, a) размещен тонкий (200 нм и менее) изолирующий слой диоксида кремния — подзатворный диэлектрик. На диэлектрик нанесен слой металла или легированного поликристаллического (поликремния) ($n+$)-типа, который служит управляющим электродом — затвором.

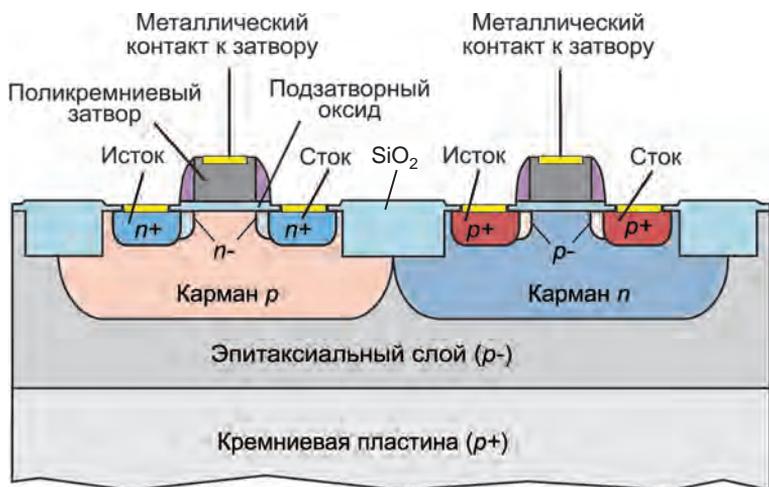
По обеим сторонам полукремниевого затвора формируют спейсеры (*spacer*) — разделители, которые изолируют затвор от контактов стока и истока.

На поверхности стока, истока и затвора локально наносят силицид (например, силицид кобальта $CoSi_2$) для электрического контакта к этим элементам.

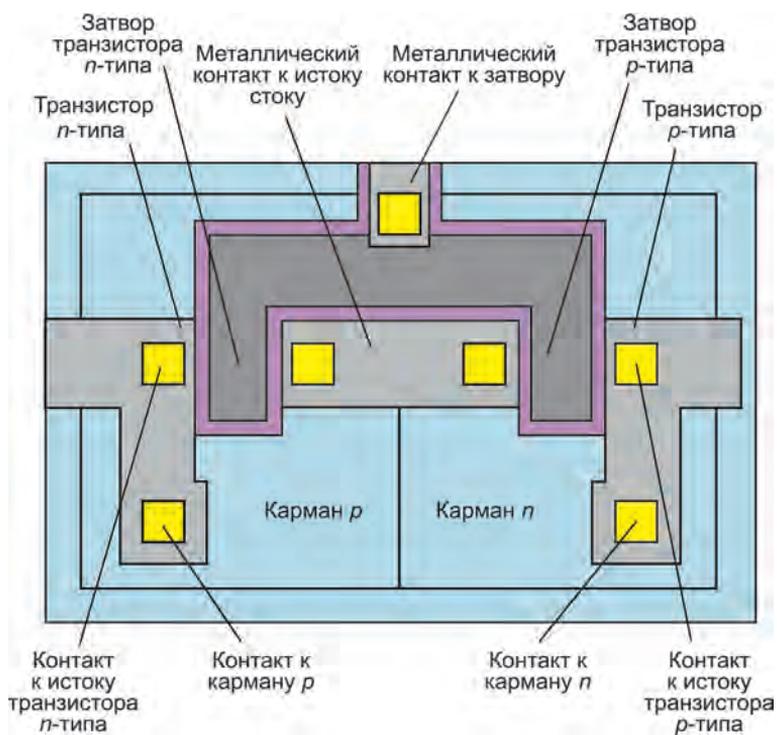
В МОП-транзисторе (см. рис. 1.3, a) использованы мелкие слаболегированные области (*LDD — Lightly Doped Drain*), которые продлевают области истока и стока в сторону канала. Концентрация примеси (фосфор и бор) этой области составляет $(4-10) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, при этом в ($n+$)-областях она достигает $(5-10) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

МОП-транзистор p -канального типа отличается от МОП-транзистора n -канального типа тем, что в нем исток и сток — две сильнолегированные области ($p+$)-типа, сам он выполнен в кармане n -типа, а его затвор — из полукремния ($p+$)-типа.

Напомним, что активные области двух транзисторов КМОП-инверторов разделены изоляцией из диоксида кремния SiO_2 (см. рис. 1.3, a).



a



b

Рис. 1.3. КМОП-инвертор:
a — структура; *b* — топология

Основные геометрические параметры КМОП-инвертора

Толщина подзатворного диэлектрика, нм.....	3
Минимальная ширина затвора, нм.....	140
Толщина поликремния, нм.....	250
Допустимые рассовмещения, нм.....	25
Шаг проводников на 1-м уровне металлизации, нм.....	500
Толщина проводников на 1-м уровне металлизации, нм.....	480
Шаг проводников на 2-м уровне металлизации, нм.....	640
Толщина проводников на 2-м уровне металлизации, нм.....	700
Габариты контактных площадок, мкм.....	100×100

1.1.2. Технология КМОП-микросхем

В технологическом процессе КМОП-микросхемы можно выделить несколько важных этапов, на которых формируются:

- карманы *p*- и *n*-типа;
- изоляция между областями *p*- и *n*-канальных МОП-транзисторов;
- области истока, стока и затвора;
- контакты к активным областям;
- многослойная металлизация.

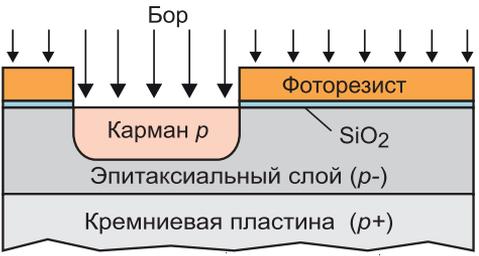
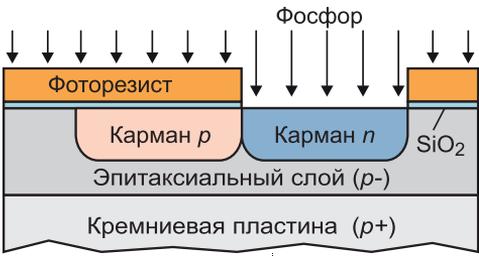
Формирование карманов *p*- и *n*-типа

Создание КМОП-структуры обычно начинают с выделения активных зон — карманов *p*- и *n*-типа (см. рис. 1.3, *a*), в которых будут размещаться соответственно *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы. Предварительно на поверхность пластины из монокристаллического кремния ориентации (100) (*p*⁺)-типа проводимости наносят эпитаксиальный слой *p*-типа с удельным сопротивлением 5...50 Ом·см. Именно в этом слое и формируют активную структуру интегральной микросхемы.

Кремниевую пластину подвергают жидкостной очистке и сушат. С ее поверхности удаляют тонкие пленки естественного диоксида (*native oxide*) SiO₂ толщиной в несколько десятков ангстрем, образующегося на поверхности кремниевой пластины даже при комнатной температуре под воздействием влаги воздуха.

После этого на кремниевой пластине наращивают так называемый жертвенный слой SiO₂ толщиной 10...15 нм. Он служит для защиты поверхности эпитаксиального слоя от загрязнений.

Операции формирования карманов приведены в табл. 1.1.

Эскиз	Операция
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме p-карманов. 2. Ионная имплантация бора для формирования p-карманов
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме n-карманов. 2. Ионная имплантация фосфора для формирования n-карманов
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление фоторезиста от предыдущей операции. 2. Быстрый термический отжиг легированных областей p- и n-карманов

Структура со сформированными n - и p -карманами показана на рис. 1.4.

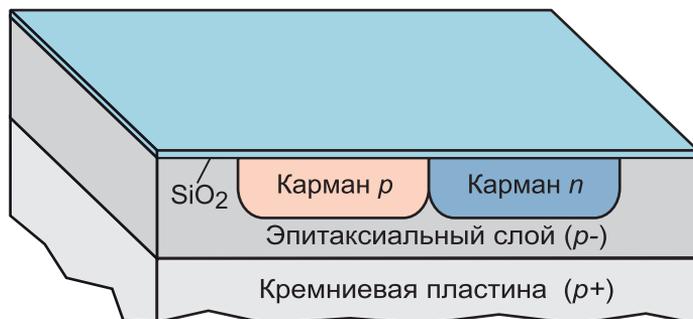


Рис. 1.4. Карманы p - и n -типа

Создание областей разного типа проводимости (карманов *p*- и *n*-типа) выполняют с помощью фотолитографии. В фоторезисте формируют защитную маску, через которую последовательно проводят локальное травление диоксида кремния SiO_2 и ионное легирование подложки сначала бором (*p*-тип), а затем фосфором (*n*-тип).

После каждого этапа легирования фоторезист удаляют, пластину подвергают жидкостной химической очистке и быстрому термическому отжигу для активации легирующих примесей. В завершение с поверхности пластины удаляют использованный защитный слой SiO_2 и наносят новый слой SiO_2 толщиной также 10...15 нм.

Формирование изоляции

Для изоляции интегральной микросхемы с топологической нормой менее 180 нм обычно используют мелкие канавки — щели (*shallow trenches*) шириной 140 нм и глубиной 400 нм, заполненные диоксидом кремния SiO_2 . Операции формирования изоляции приведены в табл. 1.2.

Полученная на этапе формирования карманов *n*- и *p*-типа пленка SiO_2 (жертвенный слой) помимо защиты поверхности эпитаксиального слоя от загрязнений играет роль прокладочного диоксида кремния SiO_2 (*pad oxide*). Эта пленка сглаживает механические напряжения между кремнием и функциональным слоем нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 100...250 нм, наносимым химическим осаждением из паровой фазы.

Формирование изоляции начинают с проведения фотолитографии: наносят и сушат слой фоторезиста толщиной 0,5...1 мкм, его экспонируют через фотошаблон и проявляют. В результате на поверхности пластины формируется защитная фоторезистивная маска с заданной топологией щелевой изоляции. Через эту маску последовательно травят пленки Si_3N_4 (реактивное ионное травление), а затем SiO_2 и непосредственно Si во фторсодержащей плазме.

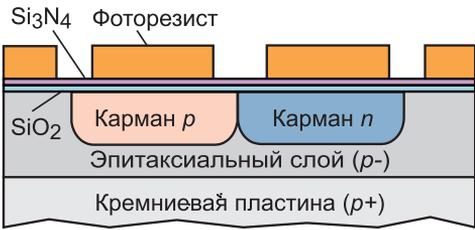
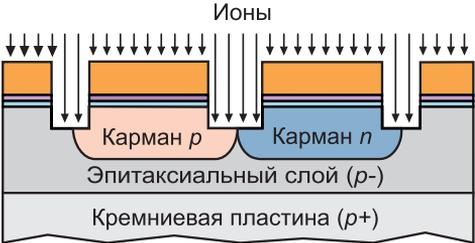
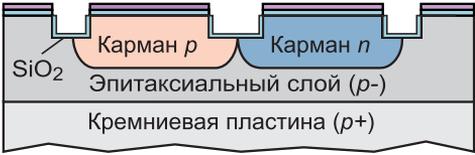
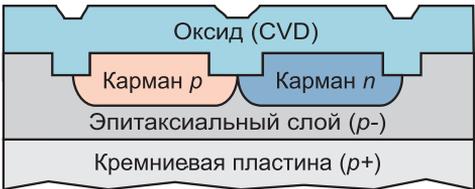
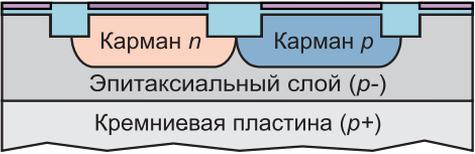
В результате в кремнии формируются канавки под щелевую изоляцию заданной формы. После этого фоторезист удаляют.

Пластины снова подвергают термическому оксидированию (при температуре 1000 °C), тонкий слой SiO_2 покрывает стенки образовавшихся канавок, скругляя их углы.

Далее при плазмохимическом нанесении SiO_2 эти канавки заполняются толстым слоем диоксида кремния SiO_2 . Последующая химико-механическая полировка поверхности пластины обеспечивает ее планаризацию. При этом слой оксида удаляют вплоть до поверхности слоя Si_3N_4 , который играет в данном случае роль стоп-слоя, поскольку скорость его полировки значительно ниже, чем у SiO_2 . После планаризации слой Si_3N_4 удаляют жидкостным химическим травлением в горячей фосфорной кислоте H_3PO_4 или в плазме диформетана CH_2F_2 .

Полученная структура с изоляцией показана на рис. 1.5.

Таблица 1.2

Эскиз	Операция
 <p>Si₃N₄ Фоторезист SiO₂ Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p-) Кремниевая пластина (p+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Осаждение слоя нитрида кремния Si₃N₄. 2. Нанесение слоя фоторезиста и проведение фотолитографии
 <p>Ионы Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p-) Кремниевая пластина (p+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Травление слоя Si₃N₄. 2. Травление слоя SiO₂. 3. Травление мелких канавок в кремнии Si. 4. Удаление фоторезиста
 <p>SiO₂ Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p-) Кремниевая пластина (p+)</p>	Наращивание тонкого слоя SiO ₂ для закругления углов канавок
 <p>Оксид (CVD) Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p-) Кремниевая пластина (p+)</p>	Наращивание толстого слоя SiO ₂ для заполнения канавок
 <p>Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p-) Кремниевая пластина (p+)</p>	Химико-механическое полирование SiO ₂ до слоя Si ₃ N ₄ — планаризация
 <p>Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p-) Кремниевая пластина (p+)</p>	Удаление слоя Si ₃ N ₄

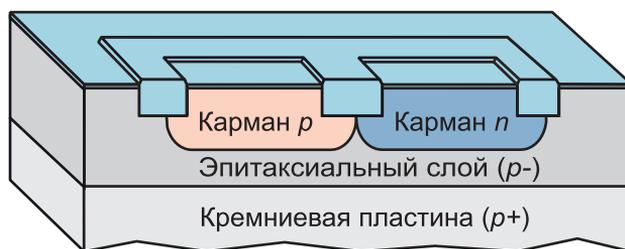


Рис. 1.5. Щелевая изоляция мелкими канавками

Формирование затвора и слабое легирование истока и стока

Карманы p - и n - типа — это области размещения ключевых элементов МОП-транзистора — истока, стока, затвора. Формирование этих элементов начинают с удаления тонкого слоя SiO_2 , остающегося над карманами после выполнения предыдущих операций. Операции формирования областей истока, стока и затвора приведены в табл. 1.3.

На первом этапе формирования областей стока, истока и затвора пластины подвергают очистке, причем для получения ювенильно чистых поверхностей кремния в этих зонах проводят наращивание тонкого жертвенного слоя подзатворного диэлектрика SiO_2 .

Далее этот слой удаляют травлением в плавиковой кислоте вместе с возможными включениями и дислокациями.

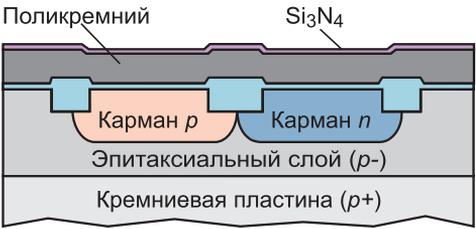
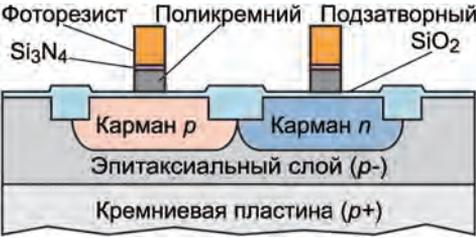
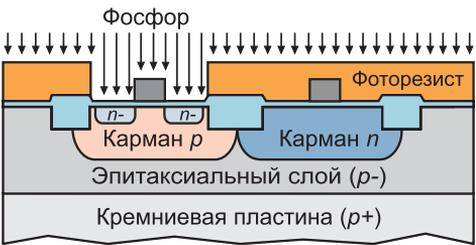
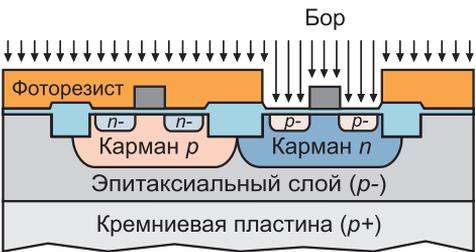
После очередной очистки на пластины наращивают слой подзатворного диоксида кремния SiO_2 толщиной 2...10 нм с неравномерностью распределения по пластине не более $\pm 0,1$ нм. Затем осуществляют быстрый термический отжиг в атмосфере оксида азота NO для формирования слоя, насыщенного азотом, на границе раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$. Этот слой способствует подавлению горячих носителей заряда и противодействует диффузии легирующих веществ из поликремниевого затвора в расположенную под ним область канала.

Далее на пластину осаждают слой поликристаллического кремния толщиной 150...300 нм. Поликристаллический кремний состоит из множества небольших случайно ориентированных кристаллов. Легированный поликремний проводит электрический ток и часто используется как альтернатива металлу при соединении элементов в интегральных схемах. Поликремний покрывают тонким слоем нитрида кремния Si_3N_4 , играющим роль антиотражающего покрытия при последующем формировании затвора.

После проведения фотолитографии на поверхности пластины остается слой фоторезиста с окнами по форме областей стока—истока. Через эти окна травят слои нитрида кремния и поликремния с остановкой на слое диоксида кремния. Затем фоторезист и нитрид кремния удаляют и на пластину наносят новый слой фоторезиста.

При последующем проведении фотолитографии остаются закрытыми участки пластины с карманами n -типа, полностью открываются участки карманов p -типа.

Таблица 1.3

Эскиз	Операция
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление тонкого слоя SiO_2. 2. Нарастивание тонкого жертвенного слоя SiO_2 и его удаление. 3. Нарастивание подзатворного диэлектрика SiO_2. 4. Отжиг подзатворного диэлектрика SiO_2 в оксиде азота NO для формирования слоя азота на границе $\text{Si} - \text{SiO}_2$. 5. Осаждение поликремния. 6. Осаждение Si_3N_4
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме областей стока—истока. 2. Травление слоя Si_3N_4. 3. Травление поликремния с остановкой на слое SiO_2
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление фоторезиста. 2. Удаление Si_3N_4. 3. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме областей p-типа. 4. Ионное легирование областей истока и стока n-типа фосфором
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление фоторезиста. 2. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме областей n-типа. 3. Ионное легирование областей стока и истока p-типа бором

Далее следует ионное легирование фосфором на небольшую глубину для формирования слаболегированных n -областей истока—стока. При этом зона легирования ограничена поликристаллическим затвором и изоляцией SiO_2 в мелких канавках. Как поликремний, так и диоксид кремния SiO_2 блокируют

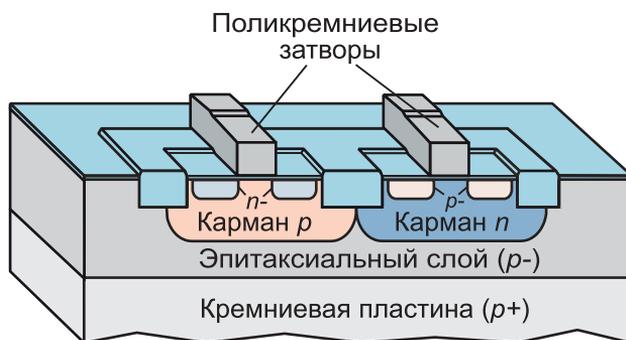


Рис. 1.6. Области истока, стока и затвора

ионы легирующего вещества, локализуя области его прохождения в кремний. Так реализуется принцип самосовмещения областей стока–истока с затвором.

После формирования в кармане p -типа областей стока–истока n -типа фоторезист удаляют и проводят следующую фотолитографию для вскрытия окон на участках карманов n -типа. Ионное легирование бором формирует области истока–стока p -типа. В этом случае также реализуется принцип самосовмещения краев областей истока и стока с краями поликремниевого затвора. Самосовмещение обеспечивает минимальные емкости между затвором и стоком, затвором и истоком и высокое быстродействие транзистора.

Ионным легированием без дополнительной маски формируют мелкозалегающие и слаболегированные области стоков и истоков, контактирующие с каналом (*LDD — Lightly Doped Drain*) (рис. 1.6).

Формирование спейсеров и глубокое легирование

При формировании КМОП-структур применяют спейсеры — пристеночные разделители, играющие роль самосовмещенной маски при имплантации ионов в области истока и стока.

После очистки пластины на нее осаждают слой Si_3N_4 (рис. 1.7), который затем подвергают плазменному анизотропному травлению с остановкой на слое SiO_2 . При этом Si_3N_4 удаляется преимущественно с горизонтальных поверхностей и остается на вертикальных стенках затвора.

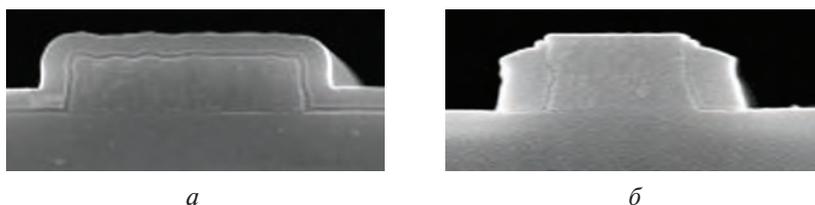
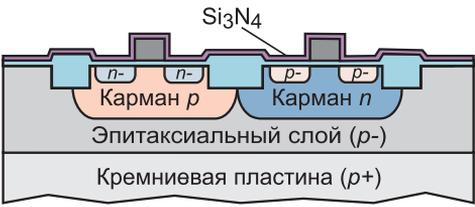
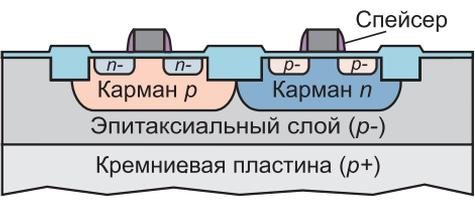
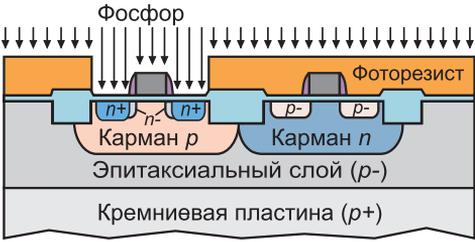
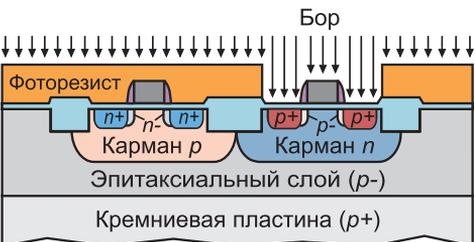
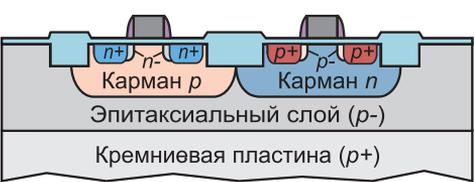


Рис. 1.7. Формирование спейсеров:

a — осаждение слоя Si_3N_4 ; b — плазменное анизотропное травление

Таблица 1.4

Эскиз	Операция
 <p>Si₃N₄</p> <p>Карман <i>p</i> Карман <i>n</i></p> <p>Эпитаксиальный слой (<i>p</i>-)</p> <p>Кремниевая пластина (<i>p</i>+)</p>	Осаждение слоя Si ₃ N ₄
 <p>Спейсер</p> <p>Карман <i>p</i> Карман <i>n</i></p> <p>Эпитаксиальный слой (<i>p</i>-)</p> <p>Кремниевая пластина (<i>p</i>+)</p>	Стравливание слоя Si ₃ N ₄ плазменным анизотропным травлением с остановкой на слое SiO ₂
 <p>Фосфор</p> <p>Фоторезист</p> <p>Карман <i>p</i> Карман <i>n</i></p> <p>Эпитаксиальный слой (<i>p</i>-)</p> <p>Кремниевая пластина (<i>p</i>+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме областей <i>n</i>-типа. 2. Глубокое ионное легирование областей истока–стока <i>n</i>-типа фосфором P
 <p>Бор</p> <p>Фоторезист</p> <p>Карман <i>p</i> Карман <i>n</i></p> <p>Эпитаксиальный слой (<i>p</i>-)</p> <p>Кремниевая пластина (<i>p</i>+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление фоторезиста от предыдущей операции. 2. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме областей <i>p</i>-типа. 3. Глубокое ионное легирование областей истока–стока <i>p</i>-типа бором B
 <p>Карман <i>p</i> Карман <i>n</i></p> <p>Эпитаксиальный слой (<i>p</i>-)</p> <p>Кремниевая пластина (<i>p</i>+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление фоторезиста от предыдущей операции. 2. Быстрый термический отжиг легированных областей карманов

Образующиеся при этом спейсеры расширяют зону маскирования затвора.

Операции формирования спейсеров, областей истока и стока приведены в табл. 1.4.

С помощью фотолитографии оставляют закрытыми участки пластины с карманами n -типа, полностью открывая участки карманов p -типа. Далее следует ионное глубокое легирование мышьяком в областях истока—стока, при этом зона легирования ограничена не только поликристаллическим затвором и изоляцией SiO_2 в мелких канавках, но и спейсерами.

Аналогично проводят следующую фотолитографию для вскрытия окон на участках карманов n -типа. Глубокое ионное легирование бором формирует области истока—стока p -типа. Затем фоторезист удаляют, пластину подвергают очистке и быстрому термическому отжигу.

Следует заметить, что на этапах формирования спейсеров, областей истока и стока происходит глубокое легирование зон контактов к соответствующим карманам.

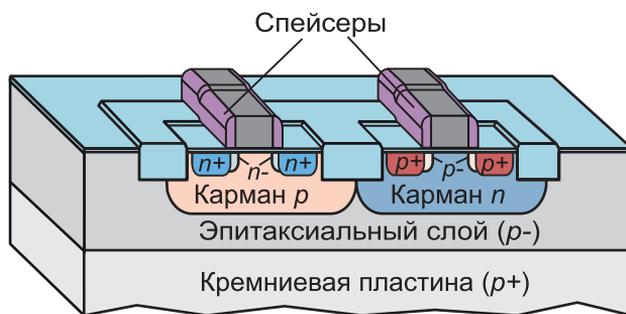


Рис. 1.8. КМОП-структура после глубокого легирования стоков — истоков

После глубокого ионного легирования с участием спейсеров сформированная структура имеет вид, показанный на рис. 1.8.

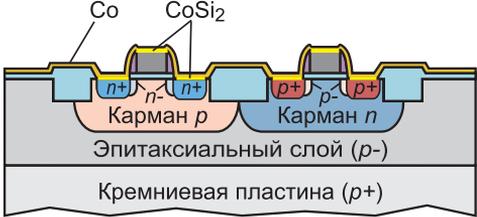
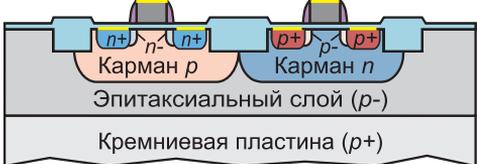
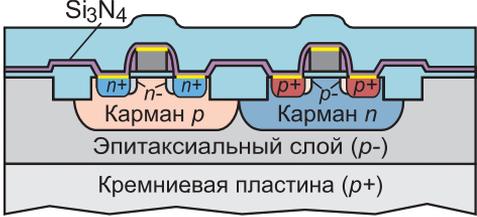
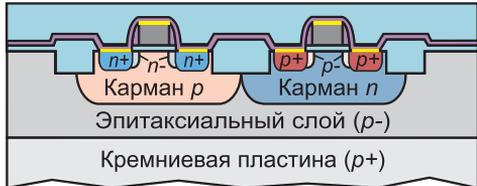
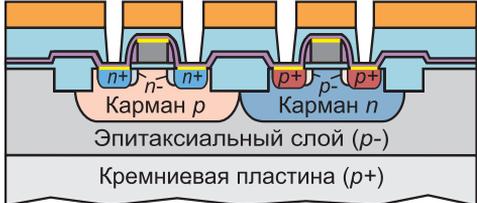
Формирование контактов

Операции формирования внутренних контактов к активным элементам КМОП-структуры приведены в табл. 1.5.

В качестве материала контактов к стоку и истоку используют силицид кобальта CoSi_2 . Предварительно с областей истока и стока, а также с поверхности затвора удаляют тонкий слой SiO_2 .

Для этого пластину погружают в плавиковую кислоту HF , после чего она тщательно очищается. На поверхность пластины вакуумным напылением наносят тонкий слой кобальта Co , проводят быстрый термический

Таблица 1.5

Эскиз	Операция
 <p>Co CoSi₂</p> <p>n+ n- n+ p+ p- p+</p> <p>Карман p Карман n</p> <p>Эпитаксиальный слой (p-)</p> <p>Кремниевая пластина (p+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стравливание тонкого слоя SiO₂ со стока, истока и затвора. 2. Напыление тонкой пленки кобальта Co. 3. Быстрый термический отжиг до образования силицида кобальта CoSi₂
 <p>n+ n- n+ p+ p- p+</p> <p>Карман p Карман n</p> <p>Эпитаксиальный слой (p-)</p> <p>Кремниевая пластина (p+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Селективное травление непроцеагировавшего Co. 2. Второй быстрый термический отжиг для перевода CoSi₂ в фазу с малым сопротивлением
 <p>Si₃N₄</p> <p>n+ n- n+ p+ p- p+</p> <p>Карман p Карман n</p> <p>Эпитаксиальный слой (p-)</p> <p>Кремниевая пластина (p+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Осаждение тонкого стоп-слоя Si₃N₄. 2. Осаждение толстого слоя SiO₂
 <p>n+ n- n+ p+ p- p+</p> <p>Карман p Карман n</p> <p>Эпитаксиальный слой (p-)</p> <p>Кремниевая пластина (p+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Химико-механическая планаризация толстого слоя SiO₂. 2. Покрытие тонким слоем SiO₂
 <p>n+ n- n+ p+ p- p+</p> <p>Карман p Карман n</p> <p>Эпитаксиальный слой (p-)</p> <p>Кремниевая пластина (p+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Формирование в фоторезисте окон к контактам в 1-м слое металла. 2. Травление толстого слоя SiO₂ до остановки на слое Si₃N₄. 3. Травление тонкого слоя Si₃N₄

отжиг, в местах контакта кобальта с кремнием образуется силицид кобальта CoSi_2 .

Непрореагировавший кобальт Co удаляют с помощью селективного травления, не действующего на силицид кобальта CoSi_2 .

Второй быстрый термический отжиг (при более высокой температуре, чем первый) переводит силицид кобальта из фазы с высоким в фазу с малым сопротивлением. Именно в этой фазе CoSi_2 контактирует с истоком, стоком и затвором.

Перед нанесением 1-го слоя металла пластины очищают, последовательно наносят тонкий стоп-слой Si_3N_4 и слой диэлектрика (*PMD* — *pre-metal dielectric*).

В качестве диэлектрика обычно применяют борофосфосиликатное стекло (БФСС — *BPSG*) — диоксид кремния SiO_2 с содержанием от 2 до 6 % (масс.) бора и фосфора. Стекло БФСС обычно формируют химическим осаждением из паровой фазы при температуре 500...700 °С, а затем отжигают при температуре 800...1000 °С.

Химико-механической полировкой проводят планаризацию поверхности пластин для обеспечения высокого разрешения фотолитографии. Пластины тщательно очищают, их поверхности покрывают тонким слоем SiO_2 .

Для создания окон к контактам проводят фотолитографию и через окна в фоторезисте осуществляют плазменное травление слоя диоксида кремния SiO_2 до остановки на слое нитрида кремния Si_3N_4 . Последующим травлением тонкого слоя Si_3N_4 формируют окна к контактам.

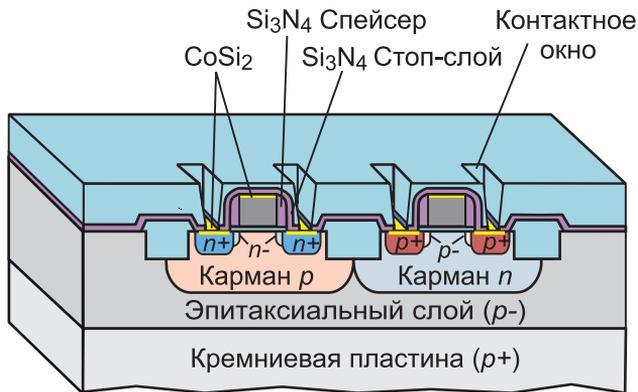


Рис. 1.9. КМОП-структура с внутренними контактами

Образующаяся в результате структура с контактами из силицида кобальта CoSi_2 показана на рис. 1.9. Для создания контактов могут использоваться и другие силициды, например силицид титана TiSi_2 .

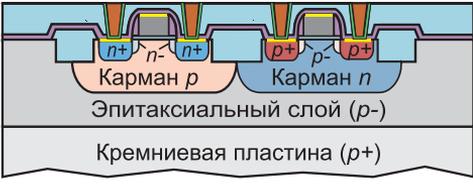
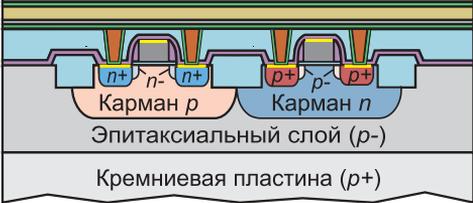
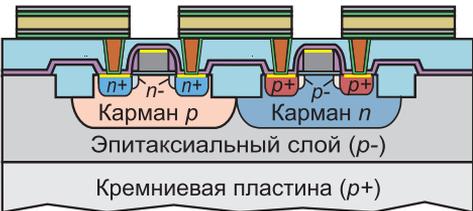
Формирование металлических проводников: 1-й слой металла (1-й уровень металлизации)

Формирование металлических проводников начинают с напыления тонкого слоя титана Ti , на который методом осаждения из паровой фазы наносят толстый слой вольфрама W .

Операции формирования металлических межсоединений в 1-м слое металла приведены в табл. 1.6.

Вольфрам является материалом, из которого формируют межслойные соединения (микрпереходы) между слоями металла. Однако у вольфрама очень плохая адгезия к оксиду кремния. Титан по сравнению с вольфрамом

Таблица 1.6

Эскиз	Операция
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Напыление тонкого адгезионного слоя Ti. 2. Осаждение толстого слоя W — основы межслойных соединений
	Химико-механическая планаризация W
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Напыление тонкого адгезионного слоя Ti. 2. Напыление тонкого барьерного слоя TiN. 3. Напыление слоя $AlCu$. 4. Напыление тонкого слоя Ti для предотвращения образования AlN. 5. Напыление тонкого антиотражающего слоя TiN
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме контактов в 1-м слое металла. 2. Травление пакета металлических слоев. 3. Удаление фоторезиста

обладает отличной адгезией к оксиду кремния и поэтому используется в качестве материала промежуточного слоя.

Слой W подвергают планаризации, т. е. химико-механической полировкой его снимают до уровня слоя SiO_2 . Режимы полировки подбирают так, чтобы скорость удаления W была во много раз больше, чем SiO_2 . Поэтому на слое SiO_2 планаризацию завершают. Пластину очищают и на нее вакуумным напылением последовательно наносят:

- адгезионный слой титана Ti;
- барьерный слой нитрида титана TiN;
- слой металла — медно-алюминиевый сплав AlCu;
- слой титана Ti для предотвращения образования нитрида алюминия AlN;
- антиотражающий слой нитрида титана TiN.

Слой титана Ti наносят поверх 1-го слоя металла (AlCu) для предотвращения образования во время последующего напыления слоя TiN нитрида алюминия AlN, обладающего очень высоким электрическим сопротивлением.

Слой TiN на поверхности слоя AlCu служит антиотражающим покрытием во время фотолитографии по металлической пленке.

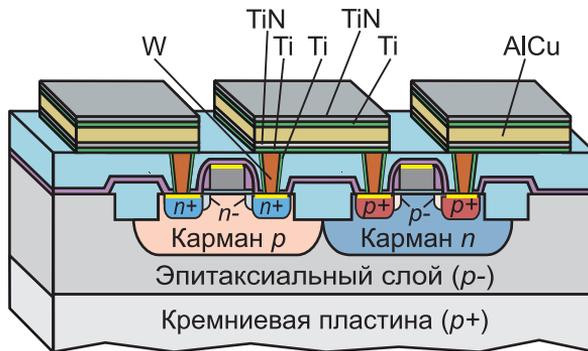


Рис. 1.10. КМОП-структура с межсоединениями в 1-м слое металла

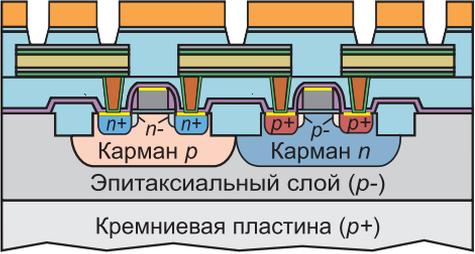
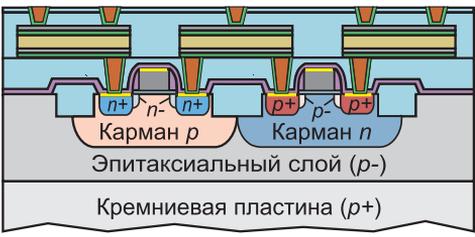
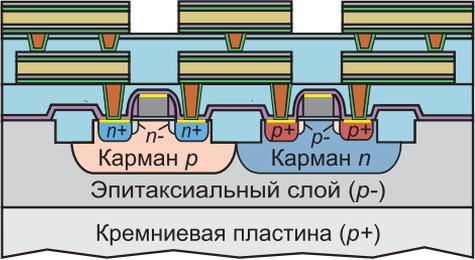
Далее фотолитографией вскрывают окна в фоторезисте, соответствующие топологии металлических микропереходов 1-го уровня металлизации, и проводят последовательное травление пакета металлических слоев до слоя SiO_2 . После удаления фоторезиста структура имеет вид, показанный на рис. 1.10.

Формирование металлических проводников: 2-й слой металла (2-й уровень металлизации)

Формирование 2-го уровня металлизации начинается с создания слоя диэлектрика между уровнями металлизации (*IMD — Inter Metal Dielectric*).

Операции формирования металлических межсоединений во 2-м слое металла приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

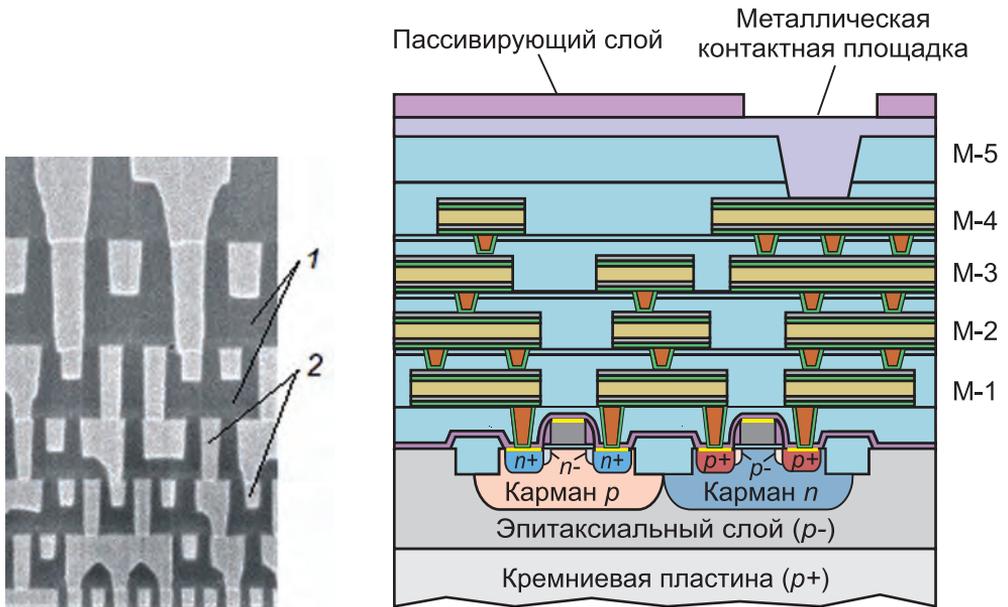
Эскиз	Операция
 <p>Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p^-) Кремниевая пластина (p^+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Осаждение толстого межслойного SiO_2. 2. Химико-механическая планаризация SiO_2. 3. Покрытие тонким слоем SiO_2
 <p>Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p^-) Кремниевая пластина (p^+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме контактов во 2-м слое металла. 2. Травление межслойного SiO_2
 <p>Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p^-) Кремниевая пластина (p^+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление фоторезиста. 2. Напыление тонкого адгезионного слоя Ti. 3. Осаждение толстого слоя W — основы межслойных соединений. 4. Химико-механическая планаризация W
 <p>Карман p Карман n Эпитаксиальный слой (p^-) Кремниевая пластина (p^+)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Напыление тонкого адгезионного слоя Ti. 2. Напыление тонкого барьерного слоя TiN. 3. Напыление тонкого слоя металлизации AlCu. 4. Напыление тонкого слоя Ti для предотвращения образования AlN. 5. Напыление тонкого антиотражающего слоя TiN. 6. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме контактов во 2-м слое металла. 7. Травление пакета металлических слоев

Пластины очищают, осаждением из газовой фазы наносят слой нелегированного силикатного стекла (SiO_2). Химико-механической полировкой проводят планаризацию поверхности пластин, тщательно их очищают и поверхность планаризованного слоя покрывают тонким слоем SiO_2 .

Затем проводят очередную фотолитографию — наносят фоторезист, в нем вскрывают окна по форме контактов во 2-м слое металла. Через окна в фоторезисте ведут травление межслойного SiO_2 .

Далее повторяют операции, использованные при формировании 1-го уровня металлизации: нанесение слоев Ti , TiN , AlCu , Ti , TiN .

Фотолитографией вскрывают окна в фоторезисте, соответствующие топологии металлических микропереходов 2-го уровня и проводят последовательное травление пакета металлических слоев до слоя SiO_2 .



a

б

Рис. 1.11. Многослойные металлические межсоединения:

a — фото; 1 — диэлектрик с малым коэффициентом масштаба k ; 2 — медные межсоединения; *б* — схема; M-1 — M-5 — слои металла

После удаления фоторезиста получается структура (рис. 1.11), весьма напоминающая структуру на рис. 1.10 после формирования межсоединений в 1-м слое металла. Операции, использованные для формирования 2-го слоя металлизации, могут применяться для получения 3-го и последующих слоев.

После формирования последнего слоя металлизации проводят нанесение слоя SiO_2 и его планаризацию. В завершение обычно наносят пассивирующий слой Si_3N_4 , который предохраняет полученную структуру от влаги и загрязнений.

Масштабирование КМОП-микросхем

Ключевым геометрическим параметром МОП-структур является длина затвора транзистора L_g , которая за последние 30 лет уменьшилась в 200 раз — с 10 мкм в начале 1970-х годов до 65 нм в наши дни. Уменьшение длины затвора определяет изменение других параметров транзистора (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Параметр	Коэффициент масштаба	Значения	
		исходные	конечные
Длина затвора L_g	$1/k$	90 нм	65 нм
Рабочее напряжение	$1/k$	1 В	0,7 В
Плотность компонентов	k^2	1х	2х
Потребляемая мощность	$1/k^2$	1х	0,5х
Плотность	1	1	1
Время задержки сигнала	$1/k$	1х	0,7х
Произведение времени задержки сигнала и мощности рассеяния	$1/k^3$	1х	0,4х
Функциональная производительность	k^3	1х	2,7х

Так, при коэффициенте масштаба $k = 1,4$, что соответствует переходу на следующий уровень технологии, длина затвора уменьшается с 90 до 65 нм.

При этом рабочее напряжение, необходимое для сохранения прежнего значения напряжения поля в МОП-структуре, уменьшится с 1 до 0,7 В.

Плотность размещения компонентов, т. е. количество МОП-структур на единице площади, при $k = 1,4$ увеличивается практически в 2 раза. Это дает экономию в стоимости производства в 1,3–1,5 раза с учетом того, что возрастает сложность применяемого оборудования и увеличивается его номенклатура.

Потребляемая мощность при заданном коэффициенте масштаба уменьшается вдвое, при этом плотность энерговыделения при неизменном напряжении электрического поля остается на прежнем уровне.

Время задержки сигнала уменьшается в 1,4 раза, а произведение времени задержки сигнала и мощности рассеяния (критерий качества, оценивающий

баланс между скоростью прохождения сигнала и рассеиваемой мощностью) уменьшается в 2,5 раза.

Наконец, изменяется и функциональная производительность — еще один комплексный критерий качества, который равен произведению числа затворов МОП-структур и тактовой частоты, деленному на потребляемую мощность. Значение данного параметра в рассматриваемом случае увеличивается в k^3 раз.

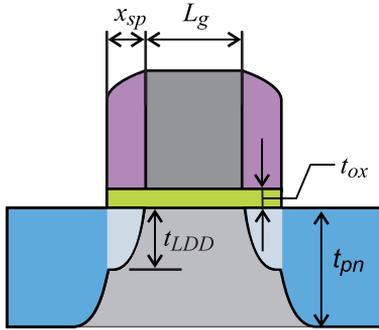


Рис. 1.12. Размеры МОП-структуры

Отметим, что для сохранения функциональных свойств МОП-структуры при уменьшении длины затвора должны быть также уменьшены и другие ее размеры (рис. 1.12). Многолетний опыт применения масштабирования позволил выработать рекомендации по коэффициентам пропорциональности для отдельных элементов структур. Например,

разработчики фирмы Intel при коррекции толщины подзатворного оксида t_{ox} используют соотношение:

$$t_{ox} = \frac{L_g}{45}.$$

Аналогичные соотношения приняты для геометрических параметров:

глубина $p-n$ -перехода $t_{pn} \approx 0,8L_g$,

глубина слаболегированной области (LDD): $t_{LDD} \approx 0,4L_g$,

ширина спейсера $x_{sp} \approx 0,5L_g$

Рассмотренный пример показывает, что масштабирование ведет к существенному улучшению рабочих характеристик МОП-структур.

Тенденция к уменьшению размеров интегральных микросхем наблюдается на всем протяжении развития микроэлектроники, при этом четко прослеживаются *временные циклы*, характеризующие ее переход на новый *уровень технологии*. Наличие таких циклов предсказал еще в 1965 г. один из основателей фирмы Intel Гордон Мур.

Обычно для оценки уровня микроэлектронной технологии используют параметры наиболее распространенных микросхем — микропроцессоров и схем памяти. В соответствии с эмпирическим законом Мура функциональные возможности схем памяти (объем или число ячеек памяти) и микропроцессоров (число транзисторов и быстродействие) удваиваются каждые два года.

Количественно уровень технологии микроэлектроники определяется *топологической нормой*, использованной в данном технологическом цикле (*Technology Node*).

Уменьшение топологической нормы существенно влияет на повышение функциональных возможностей интегральных схем при уменьшении их габаритов. Например, уменьшение нормы со 180 до 130 нм при сохранении функциональных возможностей микропроцессора уменьшает его площадь на 45 % (рис. 1.13).

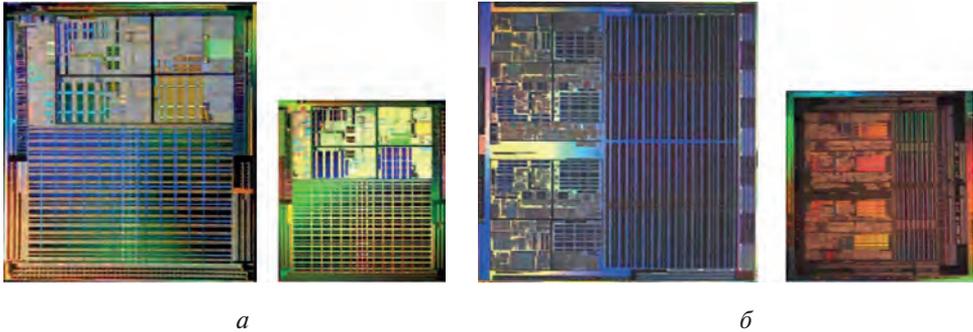


Рис. 1.13. Влияние топологических норм на габариты интегральных схем:
 а — уменьшение со 180 до 130 нм; б — уменьшение со 130 до 90 нм

Понятие топологической нормы различается по физическому смыслу для различных изделий микроэлектроники.

Часто это значение определяется по минимальному размеру (*minimum feature size, critical dimension*), которым в МОП-транзисторе является длина затвора L_g (рис. 1.14). Этот параметр также называют литографической нормой, поскольку он определяется предельными возможностями процесса микролитографии.

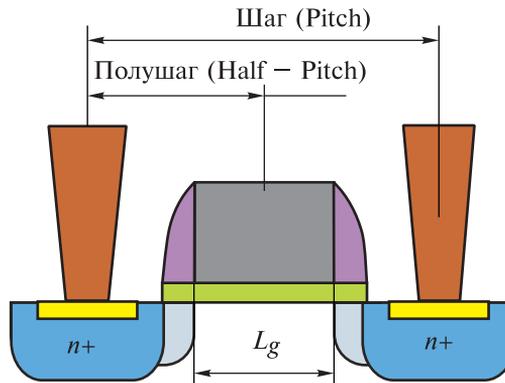


Рис. 1.14. Параметры топологической нормы

В интегральных схемах памяти (рис. 1.15, а) адресные и разрядные шины (*bitlines, wordlines*) формируются в виде регулярных структур — решеток

(рис. 1.15, б). Конструкция современных интегральных схем предусматривает, как правило, многослойную металлизацию.

Решетка контактов, непосредственно примыкающих к активным элементам схемы (1-й уровень металлизации), имеет минимальный шаг в данной микросхеме (рис. 1.15, в). Поэтому в качестве проектной нормы используется значение шага между металлическими контактами на 1-м, наиболее плотном уровне металлизации — шаг затвора (*contacted gate pitch*) (см. рис. 1.14, 1.15, б, в).

Для оценки проектной нормы часто используют его половину — полушаг (*Half-Pitch*).

Отметим, что шаг P решетки (*Pitch*) складывается из ширины L дорожек (*Line*) и промежутков S (*Space*) между дорожками (рис. 1.15, г). В случае когда $L = S$, полушаг (*Half-Pitch*) этой решетки равен ширине дорожки (топологической линии).

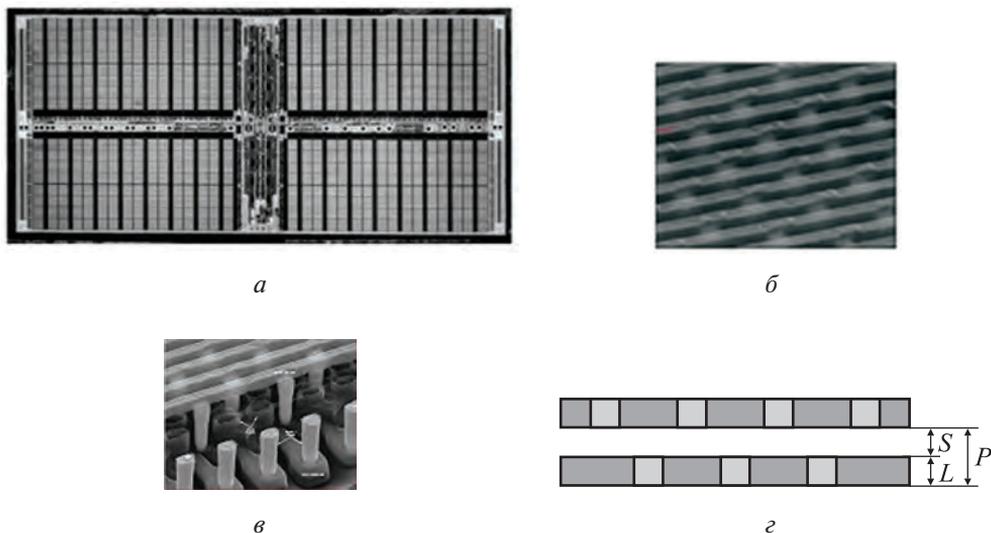


Рис. 1.15. Интегральная микросхема:

a — общая топология; $б$ — дорожки адресных шин; $в$ — металлические контакты 1-го уровня; $г$ — линия, промежуток и шаг регулярной структуры

Полушаг в полной мере характеризует *плотность упаковки элементов* регулярной структуры. В структурах микропроцессоров, технология которых в последние десятилетия развивается ускоренными темпами, в качестве топологической нормы также может использоваться полушаг регулярных структур.

Требования к размерной точности микропроцессоров и совмещаемости элементов микроструктур в современной микротехнологии чрезвычайно высоки, допускаемые погрешности не превышают единиц нанометров (табл. 1.9).

Таблица 1.9

Параметр	Год выпуска								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Полушаг, нм	65	57	50	45	40	36	32	28	25
Контакты в резисте, нм	84	73	64	56	50	44	39	35	31
Контакты после травления, нм	77	67	58	51	45	40	36	32	28
Совмещаемость (3σ), нм	13,0	11,3	10,0	9,0	8,0	7,1	6,4	5,7	5,1
Длина затвора в резисте, нм	84	73	64	56	50	44	39	35	31
Длина затвора после травления, нм	77	67	58	51	45	40	36	32	28
Размерная погрешность после травления (3σ), нм	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0

1.2. Особенности производства микроэлектромеханических систем

Появлению и бурному развитию МЭМС способствовали четыре основных фактора:

1) кремний как исходный материал доступен, а технология его получения, очистки, обработки и легирования хорошо развита, что обеспечивает высокую степень кристаллографического совершенства изготавливаемых структур;

2) кремний может использоваться как прецизионный, высоконадежный и прочный конструкционный материал;

3) форма и размеры элементов приборов воспроизводятся с помощью фотолитографии. Беспрецедентная точность этого метода позволяет довести процесс миниатюризации до микронного уровня;

4) кремниевые МЭМС, как и интегральные схемы, изготавливаются по групповой технологии.

Микроэлектромеханические системы включают широкий круг микроустройств:

- микродатчики для измерения физических параметров и преобразования их в электрические сигналы;

- исполнительные микроустройства — микродвигатели, микроэлементы гидравлики, микросопла, микропоршни, микроредукторы, микрозеркала, микроприводы.

Рассмотрим в качестве примера кремниевый микродатчик давления. Именно такие микродатчики все более широко используют в настоящее время в самых различных отраслях — от авиакосмической до автомобильной и бытовой.

1.2.1. Принцип действия и структура микродатчика давления

Кремниевые микродатчики давления являются самыми массовыми микроэлектромеханическими изделиями, составляющими до 40 % общего объема выпуска МЭМС. Обладая высокой чувствительностью к давлению, такие микродатчики имеют размеры, сопоставимые с размерами полупроводниковых приборов (рис. 1.16, *а*).

По принципу действия такие датчики могут быть пьезорезистивными или емкостными. В наиболее распространенных пьезорезистивных микродатчиках чувствительный элемент представляет собой упругую диафрагму, выполненную в кристалле монокристаллического кремния и закрепленную на жестком, обычно стеклянном, основании (рис. 1.16, *б*).

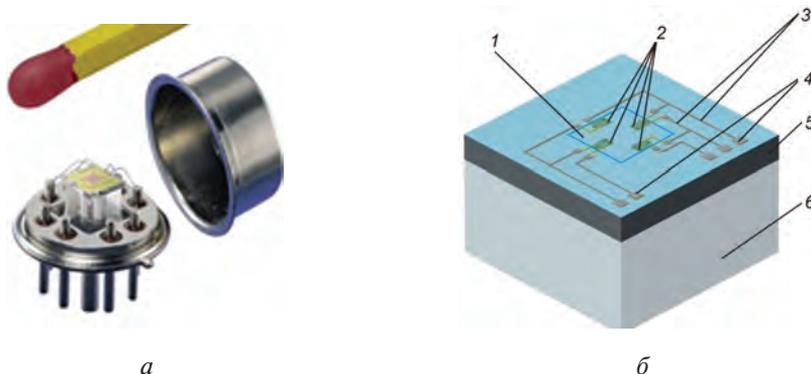


Рис. 1.16. Кремниевый пьезорезистивный микродатчик давления:

а — микродатчик в корпусе; *б* — конструкция чувствительного элемента;
1 — диафрагма; 2 — пьезорезисторы; 3 — металлические проводники; 4 —
контактные площадки; 5 — кристалл кремния; 6 — стеклянное основание

Толщина диафрагмы составляет 10...20 мкм, при этом толщина кристалла соответствует толщине кремниевой пластины: 0,4...0,8 мм.

Толщина стеклянного основания, предотвращающего передачу на чувствительный элемент механических напряжений от корпуса, обычно не менее 3 мм. При размере кристалла 3×3 мм размеры диафрагмы составляют 1×1 мм. Профиль углубления под диафрагмой имеет наклонные стенки, определяемые методом формирования диафрагмы — анизотропным травлением кремния.

На поверхности диафрагмы методами микротехнологии (диффузионным легированием) сформированы четыре пьезорезистора, соединенные металлическими проводниками с контактными площадками (см. рис. 1.16, *б*). При приложении давления диафрагма изгибается, на ее верхней поверхности возникают напряжения (рис. 1.17, *а*).

В результате пьезоэлектрического эффекта (см. приложение 4) сопротивления резисторов $R1-R4$, соединенных в мостовую схему, меняются,

поэтому при подаче на одно из плеч моста напряжения питания $V_{\text{п}}$ измерительный блок фиксирует выходной сигнал $V_{\text{в}}$ (рис. 1.17, б).

В микродатчиках относительного давления в стеклянном основании выполняют отверстие для подачи давления к внутренней полости чувствительного элемента. В микродатчиках абсолютного давления отверстия нет, а объем под диафрагмой вакуумируют.

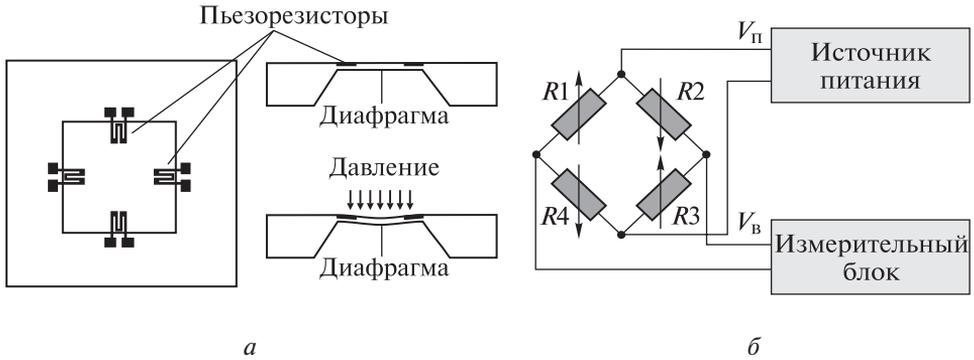


Рис. 1.17. Пьезорезисторы на кремниевой диафрагме: а — размещение; б — соединение в мостовую схему

При измерении давления загрязненной внешней среды необходимо исключить ее воздействие на проволочные соединения контактов резисторов с внешними выводами. Для этого используют промежуточные герметичные полости, ограниченные металлической диафрагмой и заполненные силиконовым маслом (рис. 1.18).

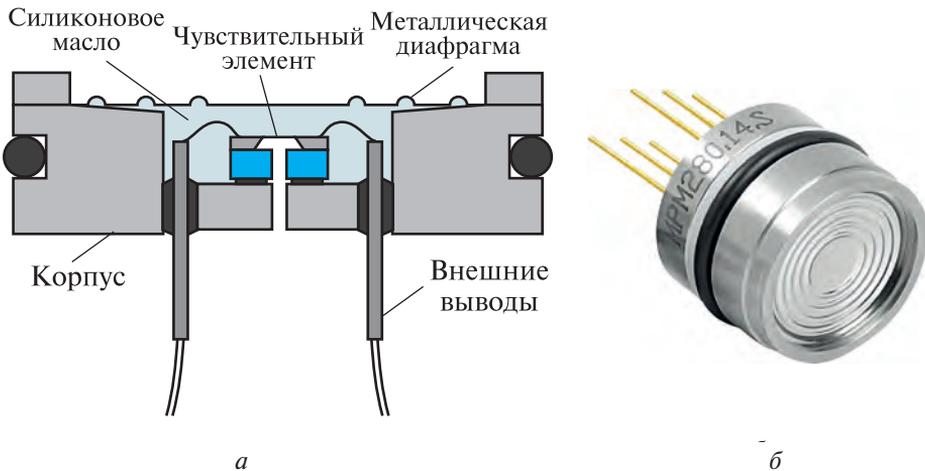


Рис. 1.18. Герметизация кремниевого чувствительного элемента: а — схема; б — общий вид

1.2.2. Технические характеристики микродатчика давления

Основные технические характеристики кремниевого микродатчика давления следующие:

Воспринимаемое давление, атм*	0...1
Чувствительность, мкВ/(В·мм рт.ст.)**	10
Диапазон температур, °С	–50...+90
Размер кристалла, мм	3×3×0,6
Размер диафрагмы, мм	1×1
Толщина диафрагмы, мкм	10...20
Максимальная погрешность, %	1

* 1 атм = 101 325 Па.

** 1 мм рт. ст. = 133,322 Па.

Установлено, что для чувствительного элемента с резисторами длиной 100 мкм и шириной 10 мкм, в котором параллельные резисторы расположены на расстоянии 50 мкм от края диафрагмы, чувствительность составляет 57 мкВ/(В·мм рт.ст). Эту расчетную величину при толщине диафрагмы 10 мкм можно считать физическим пределом для датчиков такого типа.

В табл. 1.10 приведены данные для оценки влияния различных технологических факторов на разброс значений чувствительности пьезоэлектрических датчиков.

Таблица 1.10

Параметр диафрагмы	Чувствительность, %
Толщина 10 мкм. При изменении толщины, мкм: ±1 ±0,2	±19 ± 4
Клиновидность, мкм/мм: ±2 ±0,1	±4 < ±1
Размер: 1 мм ±7 мкм	< ±1
Рассовмещение, мкм: ±10	±7

Как следует из анализа табл. 1.10, наибольший вклад в нестабильность чувствительности вносят разнотолщинность получаемых кремниевых диафрагм и рассовмещение топологии резисторов по отношению к краям диафрагмы.

1.2.3. Технология изготовления чувствительного элемента

В качестве заготовки чувствительного элемента пьезорезистивного кремниевого микродатчика давления используют кремниевую монокристаллическую подложку ориентации (100), имеющую p -тип проводимости (рис. 1.19).

Предварительно проводят эпитаксиальное наращивание слоя n -типа, который в данном случае служит не только для формирования в нем активной структуры прибора. На заключительном этапе процесса этот слой будет превращен в упругую диафрагму чувствительного элемента датчика.

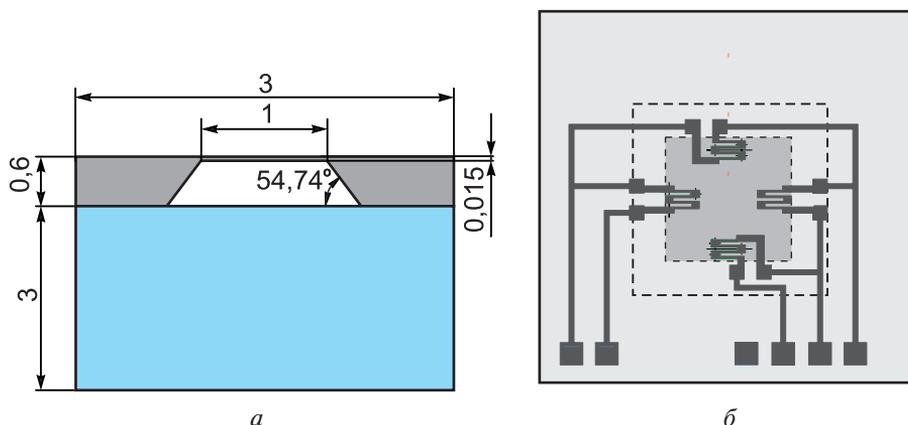


Рис. 1.19. Пьезорезистивный кремниевый микродатчик давления:
 a — чувствительный элемент датчика в разрезе; b — вид сверху

На основных этапах изготовления чувствительного элемента кремниевое микродатчика давления формируют:

- проводники ($p+$)-типа к пьезорезисторам;
- области ($n+$)-типа для контакта к эпитаксиальному слою;
- пьезорезисторы p -типа;
- контакты к пьезорезисторам;
- слой металлизации;
- упругую диафрагму.

Формирование проводников (p^+)-типа к пьезорезисторам

Проводники (p^+)-типа — это области, дублирующие токоподводы к будущим пьезорезисторам (рис. 1.20).

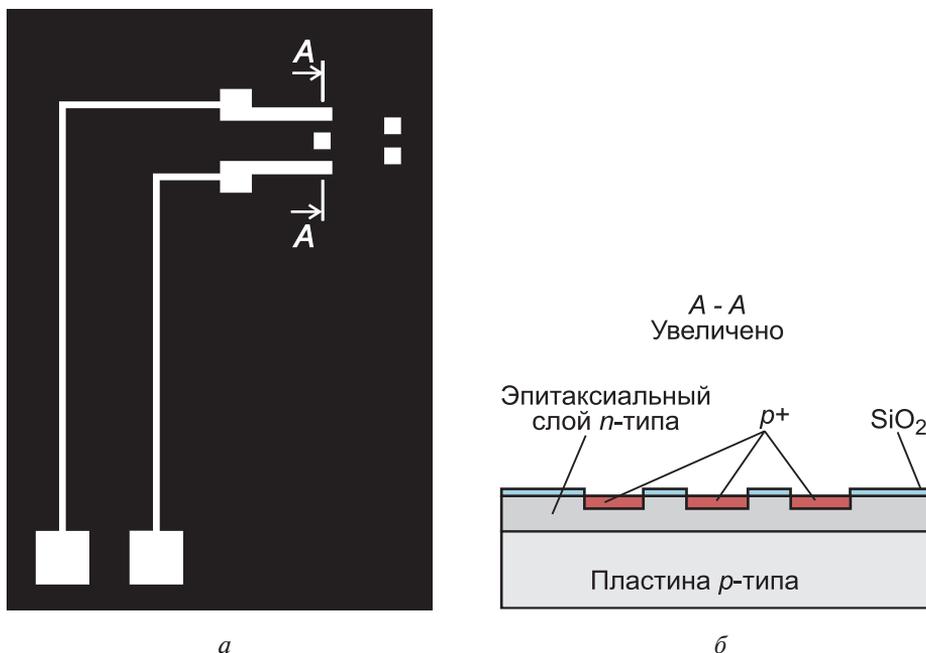


Рис. 1.20. Формирование проводников (p^+)-типа:
a — фотошаблон; *б* — сечение подложки

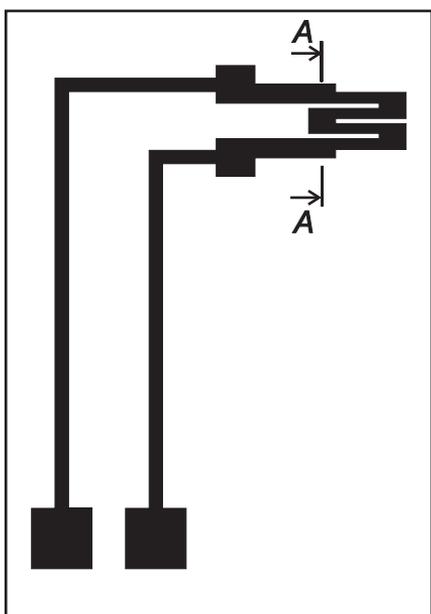
Пластину тщательно очищают, затем термическим оксидированием формируют пленку из SiO_2 .

Далее проводят фотолитографию: наносят и сушат слой фоторезиста, экспонируют его через фотошаблон (рис. 1.20, *a*) и проявляют.

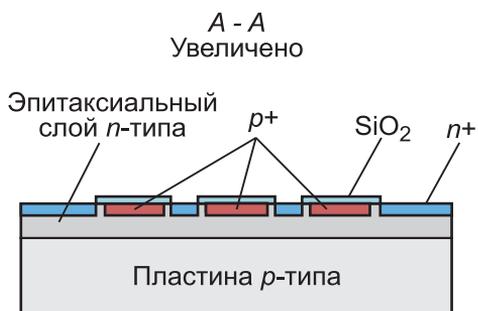
Через защитную фоторезистивную маску выполняют травление оксида, а затем через оксидную маску — диффузионное легирование бором для формирования (p^+)-дорожек к будущим пьезорезисторам (рис. 1.20, *б*).

Формирование области (n^+)-типа для контакта к эпитаксиальному слою

Операция формирования области (n^+)-типа обеспечивает электрический контакт к эпитаксиальному слою для осуществления электрохимической остановки травления при формировании диафрагмы. Для этого снова проводят термическое оксидирование подложек, выполняют нанесение фоторезиста и экспонирование окон сначала в фоторезисте (рис. 1.21, *a*), а затем вскрытие их в слое оксида.



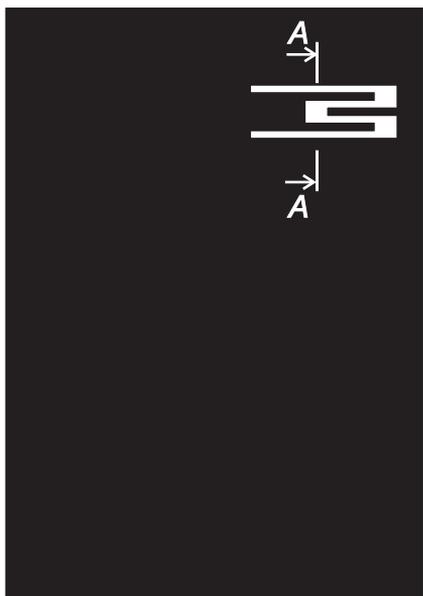
a



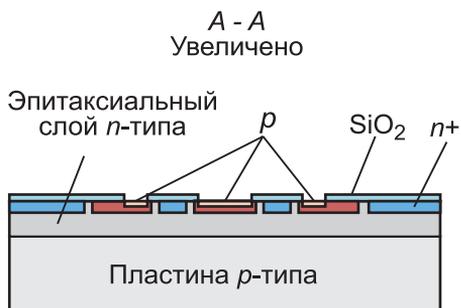
б

Рис. 1.21. Формирование областей ($n+$)-типа:

a — фотошаблон; *б* — сечение подложки



a



б

Рис. 1.22. Формирование пьезорезисторов:

a — фотошаблон; *б* — сечение подложки

Области будущих пьезорезисторов и дорожки к ним при этом закрыты маской из SiO_2 . Затем проводят диффузию фосфора для формирования проводящих ($n+$)-областей (рис. 1.21, б).

Формирование пьезорезисторов

На концах проводящих областей ($p+$)-типа формируют пьезорезисторы p -типа проводимости (рис. 1.22). Их выполняют, как правило, в виде меандров, образованных полосками заданной ширины и длины.

На этом этапе применяют уже рассмотренный ранее набор операций: термическое оксидирование подложек, нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме пьезорезисторов ((рис. 1.22, а), травление оксида и снятие фоторезиста. Затем проводят диффузию бора для формирования пьезорезисторов p -типа проводимости (рис. 1.22, б).

Осаждение нитрида кремния на обратную сторону пластины

Операция осаждения Si_3N_4 на обратную сторону пластины необходима для формирования на обратной стороне пластины защитного слоя, который будет впоследствии использован при создании мембраны чувствительного элемента. Слой нитрида кремния Si_3N_4 осаждают из паровой фазы при пониженном давлении.

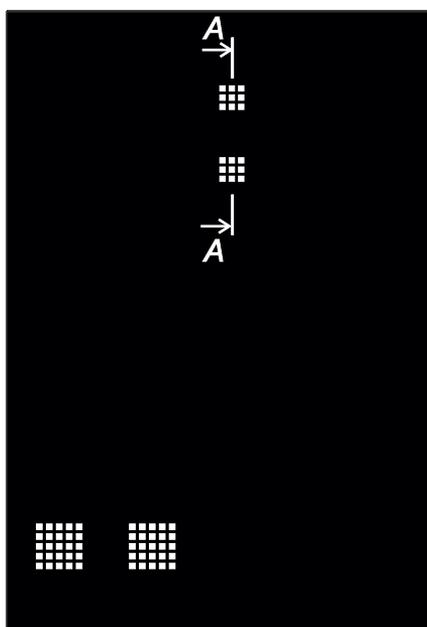
Формирование контактных окон

На этом этапе вновь проводят термическое оксидирование подложек. Фотолитографией и последующим травлением на концах меандров в оксидной пленке получают окна, через которые будут сформированы межсоединения формируемой мостовой схемы (рис. 1.23).

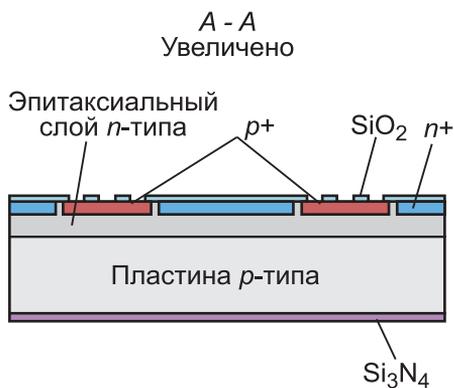
Металлизация и формирование контактных площадок

Сначала на рабочую поверхность подложки наносят сплошной тонкий слой алюминия, который является материалом межсоединений пьезорезисторов. Операцию можно выполнять, например, термическим вакуумным напылением.

После нанесения слоя Al проводят фотолитографию и локальное травление Al сквозь вскрытые в фоторезисте окна. При этом формируют топологию металлической разводки на поверхности подложки, включая контактные площадки для последующего соединения с внешними выводами (рис. 1.24), а также дополнительный алюминиевый контакт к подложке.

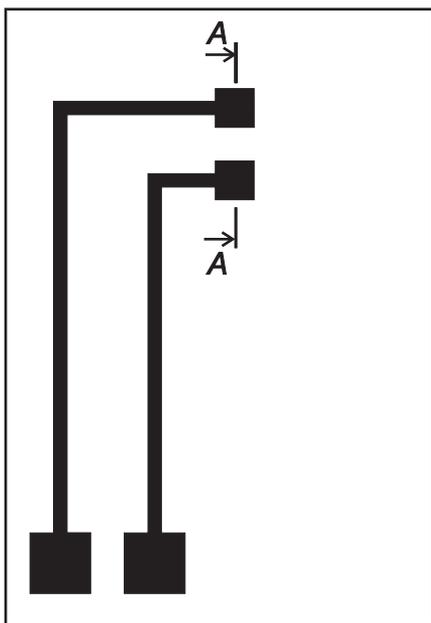


a

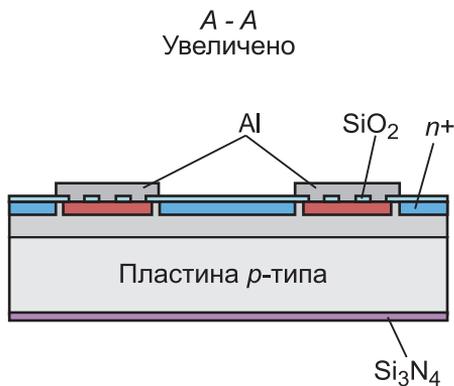


б

Рис. 1.23. Формирование контактов:
a — фотошаблон; *б* — сечение подложки



a



б

Рис. 1.24. Напыление алюминия и формирование контактных площадок:
a — фотошаблон; *б* — сечение подложки

Анизотропное травление упругой диафрагмы

На слой нитрида кремния Si_3N_4 наносят фоторезист и проводят фотолитографию. Через образующиеся окна в фоторезисте осуществляют плазменное травление Si_3N_4 , после чего фоторезист удаляют (рис. 1.25, *а*).

Далее следует операция анизотропного травления (рис. 1.25, *б*), основанная на том, что у кремния скорости травления разных кристаллографических плоскостей в щелочных растворах, например KOH , резко различаются. Так, скорость травления плоскости (100) в 400 раз выше, чем плоскости (111). Поэтому плоскости (100) удаляются при травлении, а плоскости (111) остаются, придавая профилю травления характерный вид с наклонными стенками.

Травление ведут до момента достижения требуемой толщины диафрагмы (рис. 1.25, *б*), которая в рассматриваемом примере равна толщине эпитаксиального слоя.

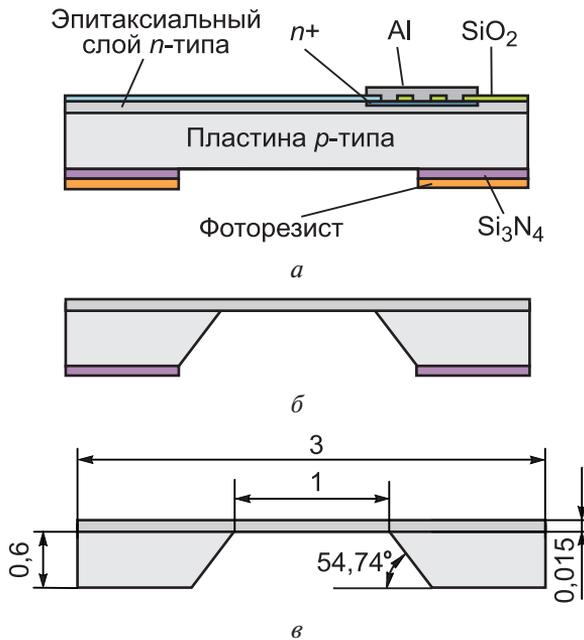


Рис. 1.25. Формирование упругой диафрагмы:

а — создание защитной маски в нитриде кремния;
б, в — подложка после анизотропного травления и снятия пленки нитрида кремния соответственно

Через дополнительный алюминиевый контакт на слой $n+$ и соответственно на эпитаксиальный слой подают потенциал, обеспечивающий самоостановку процесса травления при достижении фронтом травления эпитаксиального слоя.

В процессе анизотропного травления в агрессивных жидких средах, например КОН, при температуре 60...80 °С рабочая сторона подложки должна быть надежно защищена.

После травления защитный слой Si_3N_4 удаляют, поскольку обратная сторона кремниевой подложки должна быть подготовлена для соединения со стеклянным основанием.

1.2.4. Монтаж кремниевого чувствительного элемента на стеклянное основание

Чувствительный элемент должен быть закреплен на стеклянной опоре так, чтобы обеспечить герметичность полости под диафрагмой и минимизировать в ней сборочные напряжения (рис. 1.16, б). Наиболее часто для этого применяют анодную сварку кремния со стеклом, обеспечивающую соединение этих материалов в твердой фазе.

Заключение

Микротехнология представляет собой совокупность методов и технических средств (оборудования, инструментов, используемых материалов), применяемых для исследования, разработки и производства сверхминиатюрных приборов и устройств, элементы которых имеют микро- и нанометровые размеры.

Микротехнология, разработанная в свое время для производства микроэлектроники, широко используется в смежных областях техники. Многие изделия современной электроники (кремниевые кристаллы интегральных микросхем, подложки гибридных схем и микросборок, микроэлектромеханические системы, многослойные печатные платы) имеют ряд общих черт.

Все они являются плоскими, часто многослойными структурами, их функциональные элементы выполнены в виде микрорельефов в технологических слоях. Связь между слоями осуществляется электропроводящими микропереходами, при этом соответствующие элементы слоев должны быть точно совмещены между собой. Внешние слои микроструктур должны быть подготовлены для контактирования с другими изделиями при сборке.

Процессы микротехнологии основываются на совершенно иных принципах, нежели технологии, имеющие дело с макротелами.

Так, при обработке широкого спектра материалов микроизделий (полупроводников, диэлектриков, проводников) функции инструмента выполняют фотоны и частицы — электроны, ионы, атомы и молекулы участвующих в процессе веществ. В качестве среды обработки часто используют вакуум, парогазовые смеси, растворы реактивов, а обработку ведут при высокой температуре, которая должна поддерживаться с очень высокой точностью.

Локализацию зоны обработки выполняют с помощью микролитографии, одновременно формирующей на поверхности заготовки множество окон с микронными, субмикронными и нанометровыми размерами элементов. На этом основан уникальный технологический принцип групповой одновременной обработки сотен миллионов элементов микроструктур на одном кристалле, сотен кристаллов на одной подложке и зачастую десятков подложек в едином цикле.

Большинство операций микротехнологии строится на основе применения уникальных физико-химических процессов, доведение которых до воспроизводимого в промышленных условиях состояния требует анализа действующих факторов, моделирования и оптимизации этих процессов.

Задания для самостоятельной работы и самоконтроля

1. Проработать текст раздела 1.1, а также материалы [1–9].
2. Провести классификацию материалов, используемых в технологическом процессе изготовления КМОП-инвертора по признаку электропроводности: проводники, изоляторы, полупроводники.
3. Составить глоссарий русско-английских терминов, описывающих структуру интегральной микросхемы, материалы и процессы, применяемые при ее изготовлении.
4. На контурном изображении структуры сформированного КМОП-инвертора с внешними выводами (см. рисунок к заданию 4) указать соответствующие русские термины (рекомендуется использовать источник [1]).
5. На фотошаблонах (см. рисунок к заданию 5) представлены основные этапы альтернативной технологии изготовления КМОП-инвертора. Провести анализ этого материала в сравнении с материалом модуля 1, сопоставить

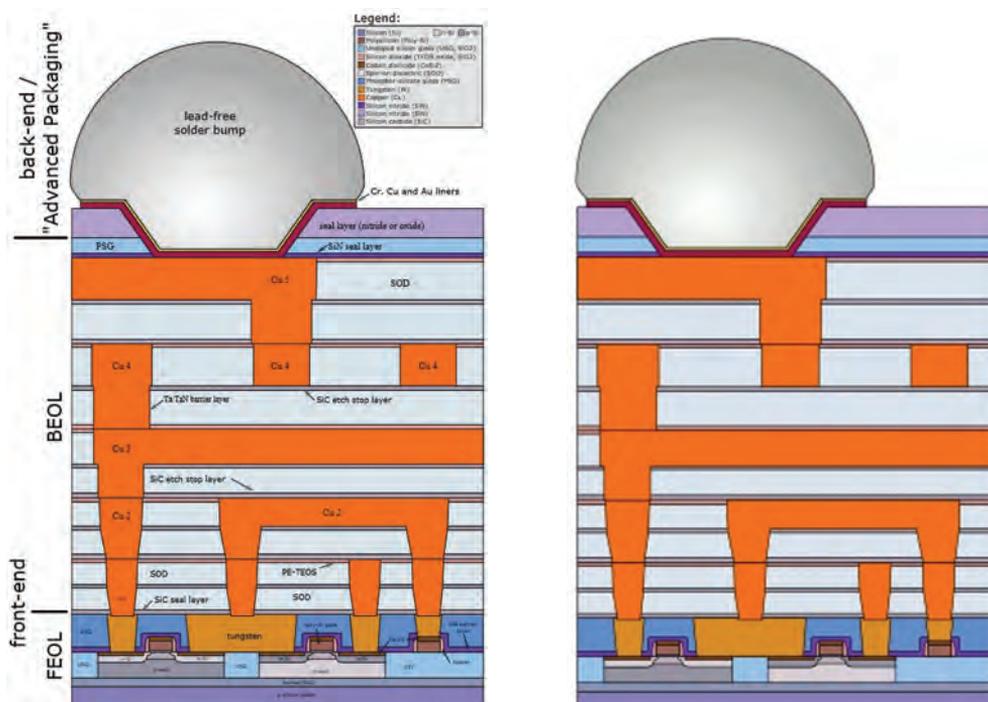


Рисунок к заданию 4

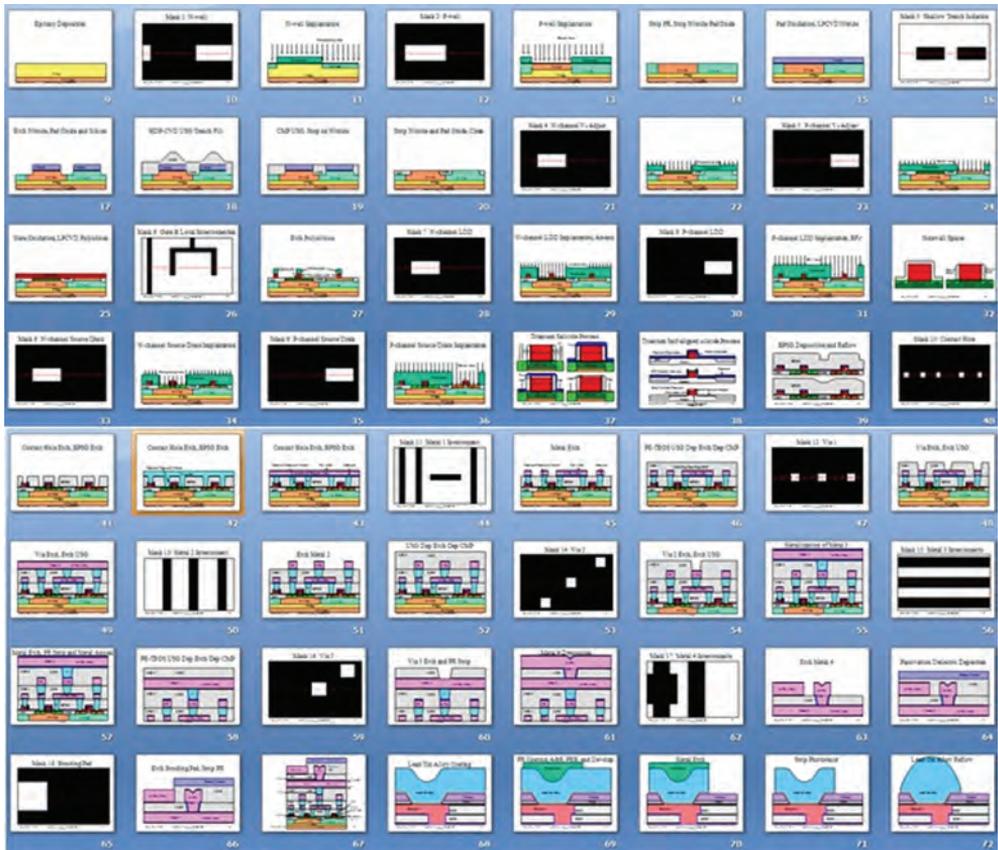


Рисунок к заданию 5

приведенные фотошаблоны с формируемыми ими элементами микроструктур. По аналогии предложить эскизы фотошаблонов для микроструктур, формирование которых описано в модуле 1.

Электронную версию фотошаблонов получить у преподавателя.

6. Выявить в рассмотренной в модуле 1 микроструктуре лимитирующие конструктивные параметры: толщину слоев, размер (ширину) элементов, допуск на совмещение элементов слоев. Указать этапы процесса, на которых эти параметры проявляются.

7. Подготовить презентацию материала раздела, используя программы PowerPoint или Prezi.

8. Представить материалы модуля 1 в виде концептуальной карты по данному образцу [5].

9. Проработать текст раздела 1.2, а также материалы [6–12].

10. Добавить в русско-английский глоссарий термины, характеризующие процесс изготовления МЭМС.

11. На основе фотошаблонов и соответствующих сечений микроструктур (см. рис. 1.20–1.24) проработать вид сверху на формируемую часть чувствительного элемента кремниевого микродатчика. Прорисовать топологии формируемых на каждом этапе элементов, выделив их разными цветами в соответствии с сечениями.

12. Провести анализ выражения (П4.12), выделить в нем выражения для тензо- и пьезоэффекта, сопоставить вклад этих эффектов в изменение сопротивления проводника в кремнии в зависимости от возникающих в нем напряжений.

Ресурсы сети Интернет к модулю 1

1. Технологии полупроводников. Часть 1. URL: http://pcnews.ru/articles/tehnologii_poluprovodnikov_cast_1-607030.html
2. Quirk M., Serda J., IC Fabrication Process Overview. URL: http://ece424.cankaya.edu.tr/uploads/files/ICmanufacturing_SMT_ProcessFlow_TUTORIAL.pdf
3. Allen P.E. Deep Submicron CMOS technology. URL: [http://www.aicdesign.org/SCNOTES/2010notes/Lect2UP030_\(100324\).pdf](http://www.aicdesign.org/SCNOTES/2010notes/Lect2UP030_(100324).pdf). 2010.
4. 65nm CMOS Process Technology. URL: <http://www.fujitsu.com/us/Images/65nmProcessTechnology.pdf>
5. Эффективная обработка информации (Mind mapping): Информация. URL: http://www.intuit.ru/studies/professional_skill_improvements/17419/courses/503/info
6. Microsoft powerpoint 2010: Информация. URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/678/534/info>
7. Prezi — бесплатная альтернатива Powerpoint для создания презентаций. URL: <http://te-st.ru/entries/prezi/>
8. Prezi classic. URL: <http://prezi.com/dashboard/>
9. Prezi next. URL: <http://prezi.com/dashboard/next/>
10. МЭМС-устройства. URL: <http://www.npk-photonica.ru/content/products/mems>
11. MEMS: микроэлектромеханические системы. Часть 1. URL: <http://www.3dnews.ru/600098>
12. MEMS: микроэлектромеханические системы. Часть 2. URL: <http://www.3dnews.ru/editorial/mems-mikroelektromehhanicheskie-sistemi-chast-2>
13. MEMS: микроэлектромеханические системы. Часть 3. URL: <http://www.3dnews.ru/editorial/MEMS-microelectromechanicalsystems-Part-3>
14. Досовицкий Г.А. МикроЭлектроМеханические системы. URL: http://www.nanometer.ru/2010/09/30/mems_218368.html
15. What is MEMS Technology? URL: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>
16. MicroElectroMechanical Systems (MEMS). URL: <http://www.sandia.gov/mstc/mems>

ПРИЛОЖЕНИЯ к модулю 1

Приложение 1

Параметры металлических межсоединений

Для обеспечения высокой тактовой частоты в логических схемах, например в микропроцессорах, время задержки при прохождении сигнала должно быть минимальным.

В свою очередь, время резистивно-емкостной задержки τ_{RC} распространения сигнала в проводящих линиях определяется постоянной времени соединительной линии, зависящей от ряда ее параметров:

$$\tau_{RC} = \rho_{Me} \frac{L}{W t_{Me}} k \epsilon_0 \frac{LW}{t_{ox}} = \rho_{Me} \frac{k \epsilon_0 L^2}{t_{Me} t_{ox}}, \quad (\text{П1.1})$$

где ρ_{Me} , L , W , t_{Me} — удельное сопротивление, длина (*Line*), ширина (*Width*) и толщина (*thickness*) проводников; t_{ox} — толщина межслойного диэлектрика (индекс от англ. oxid); ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; k — диэлектрическая постоянная.

Из уравнения (П1.1) следует, что резистивно-емкостная задержка зависит от квадрата длины проводника. Применение многослойной металлизации позволяет при трассировке проводников существенно уменьшить их длину по сравнению с одно- или двухслойной металлизацией. В реальных интегральных схемах повсеместно используют шестислойную металлизацию, апробируют структуры с металлизацией на семи-девяти уровнях.

Кроме того, все более широко применяют межслойные диэлектрики с малым значением диэлектрической постоянной k .

Шестислойную металлизацию формируют по определенным правилам: первые два слоя, локально соединяющие элементы структур и сами структуры между собой, имеют минимальный шаг проводников; в третьем и четвертом слоях шаг и длину проводников увеличивают, в пятом и шестом слоях проводники с еще большим шагом и длиной используют для подвода питания и межсоединений.

Металлические проводники верхних слоев выполняют достаточно толстыми, чтобы уменьшить их сопротивление, в то время как проводники нижних слоев должны быть предельно тонкими — в толстых металлических пленках трудно вытравить узкие полосы с малым шагом.

На рис. П1.1 показана геометрия проводников и их характерные размеры: ширина проводника W , зазор S , толщина t , длина L , отношение толщины к ширине (*Aspect Ratio*, $AR = t/W$). Размеры проводников для микропроцессора фирмы Intel по 180 нм технологии приведены в табл. П1.1.

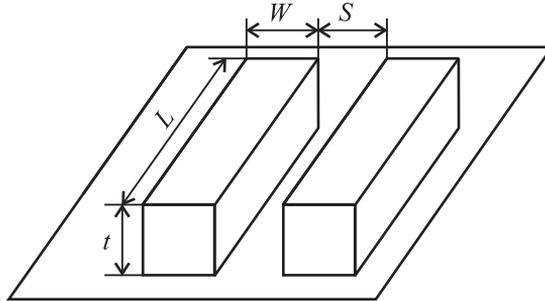


Рис. П1.1. Размеры проводников

Как следует из уравнения П1.1, резистивно-емкостная задержка распространения сигнала в проводящих линиях определяется сопротивлением металлических проводников и диэлектрическими свойствами межслойных изоляторов.

Таблица П1.1

Слой	t , нм	W , нм	S , нм	AR
6	1720	860	860	2,0
5	1600	800	800	2,0
4	1080	540	540	2,0
3	700	320	320	2,2
2	700	320	320	2,2
1	480	250	250	1,9

В схемах с полшагом менее 180 нм алюминий в качестве материала проводников начинают заменять медью, имеющей меньшее удельное сопротивление. Одновременно начинают применять материалы с малым значением диэлектрической постоянной k (*low-k*) в качестве материалов межслойных изоляторов.

В конечном счете оба решения все более широко используют совместно для уменьшения времени задержки в межсоединениях.

Приложение 2

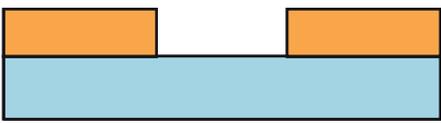
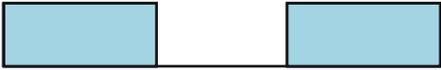
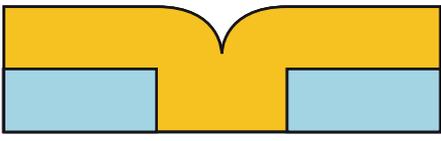
Особенности формирования медных межсоединений

Применение в качестве материала проводников меди сопряжено с рядом проблем. Так, медь практически не поддается плазменному травлению, зато легко диффундирует через SiO_2 и Si, привнося загрязнения и ухудшая характеристики микросхем.

Для решения этих проблем разработали технологию, которая позволяет получать медные проводники заданной топологии, обеспечивая при этом барьерные слои, предотвращающие загрязнение кремния. Эта технология, получившая название *damascene* (инкрустация), применима при создании микрорельефов заданной топологии практически из любых материалов, поддающихся химико-механической полировке — планаризации.

Метод *damascene* точно соответствует своему названию — в нем литографии и последующему травлению подвергают пленку SiO_2 , затем в созданный микрорельеф осаждают металл, при этом конфигурацию металлического рельефа формируют без травления за счет снятия излишков меди при планаризации.

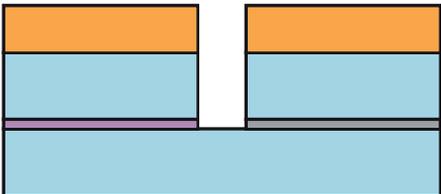
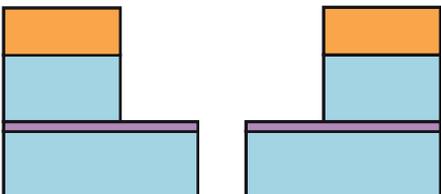
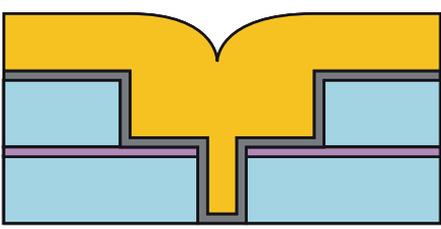
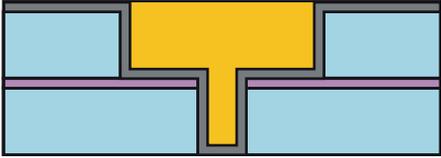
Таблица П2.1

Эскиз	Операция
	Осаждение толстого слоя SiO_2
	Нанесение фоторезиста и фотолитография
	1. Травление SiO_2 . 2. Удаление фоторезиста
	Осаждение слоя металла
	Планаризация слоя металла до уровня слоя SiO_2

Используют также модификацию этой технологии — двойную инкрустацию (*dual damascene*). В этом методе сквозное отверстие для межсоединения (*via*) и топологию медных проводников формируют одновременно.

Операции инкрустации приведены в табл. П2.1, а операции двойной инкрустации — в табл. П2.2.

Таблица П2.2

Эскиз	Операция
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Осаждение толстого слоя SiO_2 для межсоединений. 2. Осаждение стоп-слоя Si_3N_4. 3. Осаждение слоя SiO_2 для проводников
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и фотолитография окон для межсоединений. 2. Травление SiO_2 до стоп-слоя Si_3N_4. 3. Травление слоя Si_3N_4
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и фотолитография окон для проводников. 2. Травление SiO_2 до стоп-слоя Si_3N_4 — окон для проводников и завершение травления окон для межсоединений
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Напыление барьерного слоя TaN. 2. Напыление слоя затравки Cu. 3. Электроосаждение Cu до заполнения окон межсоединений и проводников
	<p>Планаризация слоя металла до уровня SiO_2</p>

После очистки на пластину последовательно наносят пакет слоев: SiO_2 , Si_3N_4 и снова SiO_2 . Первый слой SiO_2 — это межслойный диэлектрик

между слоями металлизации. Слой Si_3N_4 служит стоп-слоем при последующем травлении SiO_2 , делая процесс управляемым. Во втором слое SiO_2 формируют металлические межсоединения заданной топологии.

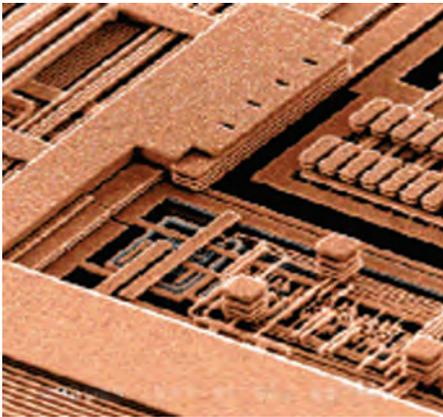
Затем проводят первую фотолитографию и через окна в фоторезисте травят отверстия для сквозных межсоединений — сначала в SiO_2 до остановки на слое Si_3N_4 , а потом и сам слой Si_3N_4 . После этого фоторезист удаляют.

Вторая фотолитография формирует в фоторезисте окна с конфигурацией металлических проводников. Через эти окна травят верхний слой SiO_2 до остановки на стоп-слое Si_3N_4 , и одновременно через ранее вскрытые окна в этом слое протравливают отверстия для сквозных межсоединений.

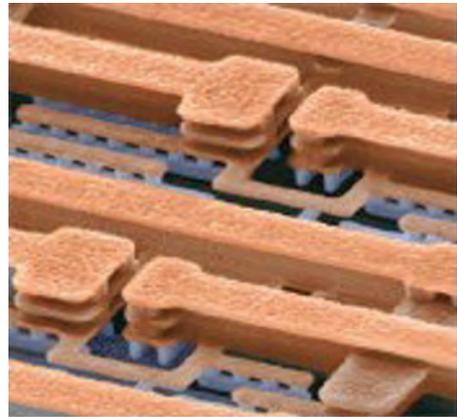
Фоторезист удаляют, и пластину подвергают очистке. Далее последовательно вакуумным напылением наносят барьерный слой нитрида тантала TaN и затравочный слой меди Cu .

Электропроводный затравочный слой меди необходим для последующего гальванического осаждения меди как в сквозные отверстия, так и в канавки для проводников. Гальваническое осаждение обеспечивает качественное заполнение металлом микрорельефов любой формы и размеров, что делает эту операцию все более популярной при многослойной металлизации.

После гальванического осаждения меди выполняют планаризацию поверхности пластины до слоя SiO_2 . Последующая очистка должна исключить возможность загрязнения структур медью.



а



б

Рис. П2.1. Медные многослойные межсоединения:

а — взаимно перпендикулярное размещение медных проводников в смежных слоях;

б — медные проводники и заполненные вольфрамом микропереходы (серо-голубые элементы)

Впервые медные межсоединения применила фирма IBM (США), выпустившая в 1998 г. микропроцессор с шестью слоями медных проводников (рис. П2.1, *а*), соединенных через вольфрамовые микропереходы с контактами интегральной микросхемы (рис. П2.1, *б*).

Приложение 3

Диэлектрические свойства материалов микротехнологии

Диэлектрические свойства различных материалов, используемых в полупроводниковой технологии, играют важную роль в формировании ключевых параметров интегральных микросхем.

Одним из важнейших свойств диэлектрических материалов является *диэлектрическая проницаемость ϵ (permittivity)*. Диэлектрическая проницаемость — это способность материала поляризоваться под действием электрического поля.

Удобно рассмотреть общее представление об этом свойстве материалов на примере тесно связанного с ним понятия *емкости C (capacitance)*. Емкость — это способность материала удерживать электрический заряд при приложении поперечного электрического поля. Емкость — параметр, характеризующий *конденсатор* — прибор, в котором слой диэлектрического материала размещен между двумя параллельными проводящими пластинами.

Приложение поперечного электрического поля с напряжением V к конденсатору с емкостью C позволяет ему удерживать заряд Q . Этот заряд прямо пропорционален приложенному напряжению, при этом емкость C играет роль коэффициента (константы) пропорциональности:

$$Q = CV \text{ или } C = Q/V. \quad (\text{П3.1})$$

Размерность емкости — фарад (кулон на вольт).

Емкость конденсатора C зависит от диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрического слоя, площади A конденсатора и расстояния t между проводящими пластинами. Емкость и диэлектрическая проницаемость связаны следующей зависимостью:

$$C = \epsilon(A/t). \quad (\text{П3.2})$$

Для вакуума емкость $C = \epsilon_0(A/t)$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Диэлектрическая постоянная k материала — это отношение его диэлектрической проницаемости ϵ к диэлектрической проницаемости вакуума ϵ_0 , т. е.

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}. \quad (\text{П3.3})$$

Диэлектрическую постоянную часто называют *относительной диэлектрической проницаемостью* материала.

Диэлектрическая проницаемость вакуума равна единице. Любой материал способен поляризоваться в большей мере, чем вакуум, поэтому у любого материала всегда $k > 1$.

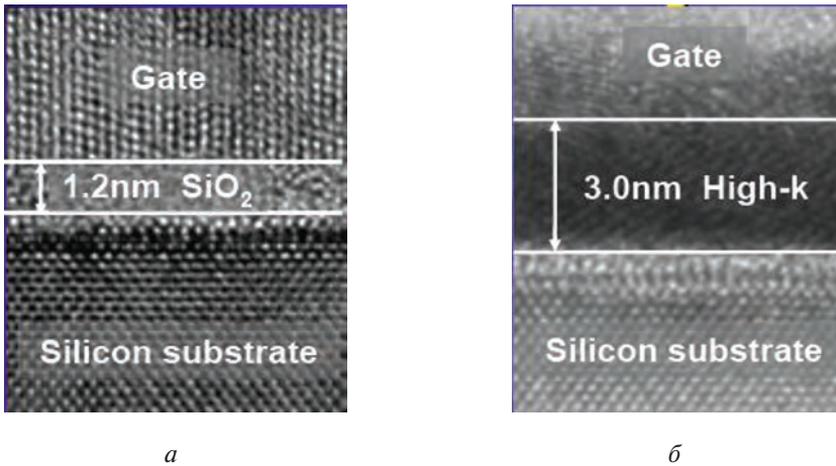


Рис. ПЗ.1. Подзатворные диэлектрики:

a — диоксид кремния; *б* — материалы с высокой диэлектрической проницаемостью

Диэлектрики с большим значением k (*high-k dielectric*) хорошо держат заряд, поэтому они предпочтительны в качестве материала подзатворного диэлектрика. При достижении топологической нормы в 65 нм толщина подзатворного диэлектрика, изолирующего затвор транзистора от канала, сократилась до 1,2 нм, т. е. до 5 атомов (рис. ПЗ.1, *a*). При столь малой толщине слоя недопустимо увеличиваются токи утечки через диэлектрик.

Поэтому при переходе к норме в 45 нм диоксид кремния ($k = 3,9$) в подзатворном изоляторе заменили на материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью ϵ ($k = 10-12$). Это позволило увеличить толщину диэлектрика (рис. ПЗ.1, *б*) и уменьшить ток утечки через него.

В качестве материалов с высокой диэлектрической проницаемостью используют диоксид гафния HfO_2 , диоксид циркония ZrO_2 и диоксид титана TiO_2 .

Следует отметить, что новые диэлектрические материалы плохо сочетаются с поликристаллическим кремнием, из которого до этого изготовлялся затвор. Поэтому при переходе к технологической норме 32 нм затвор начали изготавливать из металлического сплава.

В свою очередь, диэлектрики с малым значением k (*low-k dielectric*) являются хорошими изоляторами. Это делает их перспективными для применения в многослойных интегральных схемах в качестве материала межслойной

изоляции, поскольку они позволяют уменьшить паразитные токи утечки между проводниками. Сейчас в качестве межслойного изолятора используют преимущественно SiO_2 , однако ведутся исследования по применению альтернативных материалов, таких как:

- легированный фтором диоксид кремния — фторсиликатное стекло ($k = 3,5$);
- легированный углеродом диоксид кремния ($k = 3,0$);
- пористый диоксид кремния ($k = 2$).

Приложение 4

Тензо- и пьезоэффект в кремнии

Принцип работы ряда чувствительных элементов измерительных устройств основан на эффекте изменения сопротивления тела в зависимости от возникающих в нем напряжений — на тензоэффекте.

Сопротивление R резистора длиной L определяется как

$$R = \frac{\rho L}{S}, \quad (\text{П4.1})$$

где ρ — удельное сопротивление материала резистора; S — площадь поперечного сечения резистора.

Тензоэффект характеризуется выходным сигналом, связанным с относительным изменением сопротивления резистора: $\Delta R/R$, где ΔR — абсолютное приращение сопротивления.

Отношение $\Delta R/R$ математически можно получить, дифференцируя (П4.1), предварительно прологарифмировав это выражение:

$$\ln(R) = \ln(\rho) + \ln(L) - \ln(S). \quad (\text{П4.2})$$

Учитывая, что $d(\ln(x)) = dx/x$, зависимость относительного изменения сопротивления проводника при его продольной деформации в дифференциальной форме и переходе к конечным разностям можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S}; \\ \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S}, \end{aligned} \quad (\text{П4.3})$$

где ΔR , $\Delta\rho$, ΔL , ΔS — абсолютные приращения сопротивления, удельного сопротивления, длины и площади поперечного сечения проводника соответственно.

При нагружении твердого тела силой F продольные и поперечные упругие деформации (рис. П4.1) связаны выражением

$$\mu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} = -\frac{\Delta A/A}{\Delta L/L}, \quad (\text{П4.4})$$

где μ — коэффициент Пуассона; $\varepsilon_t = \Delta A/A$ — значение относительной поперечной (*transverse*) деформации; A — поперечный размер проводника; $\varepsilon_l = \Delta L/L$ — значение относительной продольной (*longitudinal*) деформации.

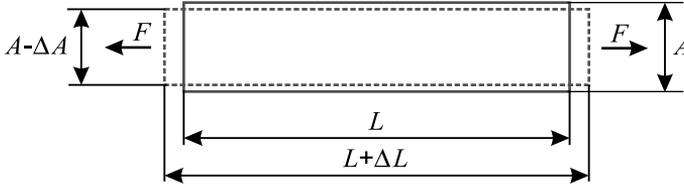


Рис. П4.1. Продольные и поперечные деформации твердого тела

Знак «минус» в (П4.4) означает, что при удлинении проводника его поперечный размер уменьшается, и наоборот. В общем виде имеем

$$\varepsilon_t = -\mu\varepsilon_l. \quad (\text{П4.5})$$

Учитывая, что в первом выражении (П4.3)

$$\frac{dS}{S} = \frac{dA^2}{A^2} = 2\frac{dA}{A}, \quad (\text{П4.6})$$

и переходя к конечным разностям (см. второе выражение (П4.3)), получим

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - 2\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \varepsilon_l(1 + 2\mu). \quad (\text{П4.7})$$

Основным параметром тензоэлемента является коэффициент относительной тензочувствительности K , который равен относительному изменению сопротивления, приходящемуся на единицу деформаций:

$$K = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\varepsilon_l} = 1 + 2\mu + \frac{(\Delta\rho/\rho)}{\varepsilon_l}. \quad (\text{П4.8})$$

Относительное изменение электропроводности ρ материала определяется возникающими в нем напряжениями σ_j :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi\sigma_l, \quad (\text{П4.9})$$

где π — пьезорезистивный коэффициент.

Как известно, зависимость между деформациями ε и напряжениями σ в твердом теле описывается законом Гука:

$$\sigma_l = E\varepsilon_l, \quad (\text{П4.10})$$

где E — модуль Юнга.
Таким образом,

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi E\varepsilon_l. \quad (\text{П4.11})$$

Тогда коэффициент тензочувствительности имеет вид

$$K = 1 + 2\mu + \pi E. \quad (\text{П4.12})$$

Выражение (П4.12) для K наглядно показывает, что изменение сопротивления тела в зависимости от возникающих в нем напряжений определяется, во-первых, изменением его геометрических размеров, а во-вторых — изменением удельной проводимости материала резистора.

Таким образом, выражение (П4.12) описывает влияние на тензочувствительность не только тензоэффекта, но и пьезоэффекта, который характеризуется пьезорезистивностью.

Пьезорезистивность — явление изменения электрического сопротивления полупроводника под действием механических напряжений, приложенных вдоль определенных кристаллических осей. У большинства металлов значение пьезорезистивного коэффициента π очень мало, а значения коэффициента Пуассона μ лежат в диапазоне $\mu \leq 0,25-0,35$, поэтому коэффициент тензочувствительности K изменяется в пределах 1,5–1,7.

Полупроводники имеют большие значения пьезокоэффициентов, поэтому приращение сопротивления за счет изменения удельного сопротивления может быть в несколько десятков и сотен раз больше, чем за счет изменения геометрии.

По этой причине пьезоэлектрические свойства кремния являются основой изготовления чувствительных элементов датчиков для измерения различных физических величин — силы, давления, ускорения и т. п.

МОДУЛЬ 2

Изготовление монокристаллических кремниевых пластин

Модуль 2 дисциплины «Процессы и оборудование микротехнологии» посвящен рассмотрению характеристик кремниевых монокристаллических пластин и процессов их изготовления, начиная от получения монокристаллических слитков и завершая оксидированием пластин.

Представлены основные технические характеристики кремниевых пластин для производства изделий микротехнологии. Показано, что помимо требований к наличию монокристаллической структуры и отсутствию дефектов на рабочей поверхности пластин они должны удовлетворять комплексу весьма жестких технических параметров. Рассмотрены основные параметры, характеризующие качество пластин: электрические (удельное сопротивление и его градиент по рабочей полю), геометрические (диаметр, толщина, базовые и дополнительные срезы, базирующие вырезы, периферийные фаски). Выделены параметры, описывающие неплоскостность пластин: прогиб, коробление, общее изменение толщины, полное измеренное показание. Приведены конфигурация периферийной фаски пластин и виды их маркировки.

На основе краткого анализа свойств монокристаллического кремния описаны основные этапы получения технического (металлургического) кремния, получения и очистки трихлорсилана и восстановления его до состояния поликристаллического кремния, выращивания монокристаллов кремния методами Чоральского и бестигельной зонной плавки. Для обоих методов рассмотрены математические модели, позволяющие оценить распределения примесей в слитках.

Изложены основные этапы механической обработки слитков, включающие отрезку хвостовиков, калибровку (круглую шлифовку) слитков, формирование базовых срезов. Рассмотрены особенности обработки кремниевых пластин свободным и связанным абразивом, операции резки слитков на пластины, снятия фасок, шлифовки и полировки пластин, химико-механической полировки рабочей стороны, финишной очистки. Проведено сравнение методов обработки и применяемого оборудования.

Показана значимость оксидирования кремния в микротехнологии, основанного на комплексе замечательных свойств диоксида кремния SiO_2 , позволяющего использовать его в качестве тонкого подзатворного диэлектрика, для маскирования легирующих примесей (в том числе в виде спейсеров), для электрической изоляции активных областей и многослойной металлизации, а также в качестве жертвенного (удаляемого) слоя.

На основе краткого рассмотрения структуры диоксида кремния обозначены способы получения пленок SiO_2 на кремниевых пластинах. Для

наиболее распространенного метода термического оксидирования приведены схемы реализации процесса, рассмотрены стадии оксидирования, а также ключевые особенности физико-химической модели оксидирования Дила — Гроува (Deal — Grove), получены зависимости, описывающие реальный процесс термического оксидирования кремния. Проведено сравнительное рассмотрение вариантов промышленной реализации термического оксидирования.

Ключевые слова: кремниевая монокристаллическая пластина, удельное сопротивление, диаметр, толщина пластин, базирующие срезы и вырезы, неплоскостность пластин, фаска, маркировка, кристаллическая структура, технический кремний, трихлорсилан, водородное восстановление, поликремний, монокристалл, метод Чохральского, зонная плавка, модели распределения примесей, механическая обработка слитков, резка слитков на пластины диском и проволокой, обработка фасок, шлифовка, полировка пластин, химико-механическая полировка, диоксид кремния, термическое оксидирование, стадии оксидирования, модель Дила — Гроува, скорости оксидирования, оборудование для оксидирования.

Планируемые результаты обучения

После изучения модуля 2 «Изготовление монокристаллических кремниевых пластин» Вы сможете:

- перечислить и объяснить не менее двадцати понятий и терминов, в том числе на английском языке, описывающих процессы изготовления монокристаллических кремниевых пластин и их оксидирования;
- представить в виде блок-схем типовые маршруты получения и тонкой очистки монокристаллического кремния, его механической обработки и формирования кремниевых заготовок (подложек);
- на основе физико-химических моделей провести анализ распределения остаточных примесей при формировании монокристаллических слитков для сравнения с заданными значениями;
- провести сравнение и выбрать вид механической обработки кремниевых пластин на различных этапах процесса для заданных выходных параметров;
- применить модель оксидирования кремния для оценки скорости процесса сухого и влажного оксидирования;
- представлять результаты работы с информацией в виде концептуальных карт (карт памяти) [1–4], аналитических обзоров и презентаций по заданным правилам.

2.1. Кремниевые пластины как объект производства

Технологическими заготовками для большинства изделий микроэлектроники и МЭМС являются кремниевые пластины (подложки). На поверхности пластины формируют активные микроструктуры, при этом сама пластина играет роль несущей основы при выполнении операций групповой обработки.

Ежегодно в мире изготавливается более 150 млн таких пластин разных размеров для удовлетворения нужд полупроводникового производства. Массовое по объему, производство кремниевых пластин сосредоточено преимущественно на ограниченном числе фирм-производителей.

Это объясняется тем, что кремниевые пластины должны удовлетворять комплексу весьма жестких, часто беспрецедентных требований к широкому спектру параметров. Производство кремниевых пластин – сложный, наукоемкий процесс, требующий вложения значительных ресурсов. При этом мировая потребность в таких изделиях постоянно растет, что делает их производство весьма рентабельным с годовой прибылью более 7 млрд долл.

Внешне кремниевые монокристаллические пластины выглядят как тонкие диски темно-серого цвета, у которых по крайней мере одна сторона отполирована до зеркального блеска (рис. 2.1, *а*). В зависимости от вида производства могут использоваться подложки различного диаметра — от 75 до 300 и даже 450 мм (рис. 2.1, *б*), в лабораторных условиях могут применяться пластины диаметром 25, 50 мм.



а



б

Рис. 2.1. Кремниевые монокристаллические пластины:

а — полированная кремниевая пластина; *б* — пластины диаметром 300 и 400 мм

Несмотря на внешнюю простоту, кремниевые пластины как объект производства являются уникальными изделиями. Достаточно сказать, что список технических требований, предъявляемых к пластинам на основе международных стандартов, разработанных SEMI (*Semiconductor Equipment and Materials International*), содержит более 20 параметров. Для их контроля разработаны и повсеместно используются стандарты США ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Прежде всего, как следует из технологического анализа изделий микро-технологии, пластины должны иметь монокристаллическую структуру, а их верхняя рабочая поверхность должна быть свободной от дефектов, т. е. не иметь нарушенного слоя.

Кроме того, весьма жесткие технические требования предъявляются к электрическим, механическим и химическим параметрам кремниевых монокристаллических пластин, а также к параметрам их поверхности.

2.1.1. Электрические параметры

Пластины могут иметь p - или n -тип проводимости в зависимости от применяемого легирующего элемента: при использовании бора В — пластины с проводимостью p -типа, при использовании фосфора Р, сурьмы Sb, мышьяка As — пластины с проводимостью n -типа.

Степень легирования определяет удельное электрическое сопротивление пластин, обычно измеряемое в ом-сантиметрах (Ом·см). Как следует из анализа рис. 2.2 и табл. 2.1, при увеличении концентрации примеси (повышении степени легирования) сопротивление кремния уменьшается.

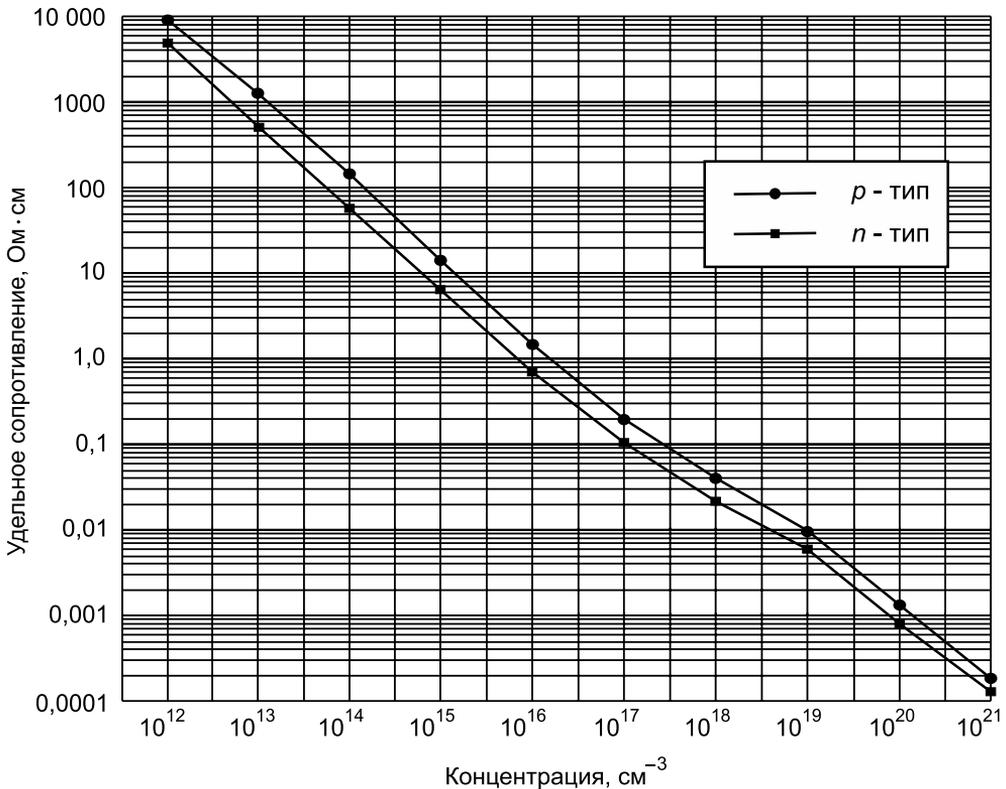


Рис. 2.2. Зависимость удельного сопротивления кремния от концентрации легирующих примесей

Таблица 2.1

Уровень легирования	Обозначение	Концентрация примеси, см ⁻³	Удельное сопротивление, Ом·см, при проводимости	
			<i>n</i> -типа	<i>p</i> -типа
Очень слаболегированный	<i>n</i> —, <i>p</i> —	<10 ¹⁴	>100	>30
Слаболегированный	<i>n</i> —, <i>p</i> —	10 ¹⁴ –10 ¹⁶	1–100	0,3–30
Среднелегированный	<i>n</i> , <i>p</i>	10 ¹⁶ –10 ¹⁸	0,03	0,02–0,3
Сильнолегированный	<i>n</i> +, <i>p</i> +	10 ¹⁸ –10 ¹⁹	0,01–0,03	0,005–0,02
Очень сильно легированный	<i>n</i> ++, <i>p</i> ++	10 ¹⁹	0,001–0,01	0,005

Важным параметром является также радиальное отклонение удельного сопротивления от среднего значения по пластине, определяющее разброс параметров формируемых на ней структур.

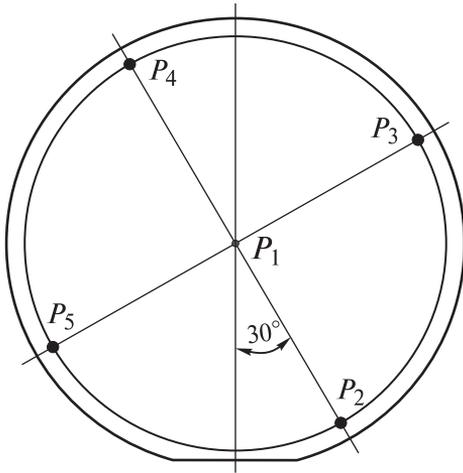


Рис. 2.3. Расположение контрольных точек P_1 – P_5 на пластине при измерении радиального градиента электрического сопротивления кремния

Для измерения как удельного электрического сопротивления, так и его радиального градиента используют 4-зондовый метод. В этом случае измерения в соответствии со стандартом ASTM F81 проводят в пяти точках (P_1 – P_5) (англ. *Point* — точка) на пластине (рис. 2.3).

Значение сопротивления в точке P_1 в центре пластины принимают за удельное электрическое сопротивление, а его градиент *RRG* (англ. — *Resistivity Radial Gradient*) в процентах вычисляют по формуле

$$RRG = \frac{(P_2 + P_3 + P_4 + P_5)/4 - P_1}{P_1} \cdot 100 \%$$

2.1.2. Геометрические параметры

В группу геометрических параметров входят размеры пластин (диаметр, толщина) и допуски на них, а также отклонения формы пластин — прогиб, коробление, неплоскостность и др.

Диаметр кремниевых пластин постоянно увеличивается (рис. 2.4, а), что позволяет размещать на рабочем поле все большее количество кристаллов.

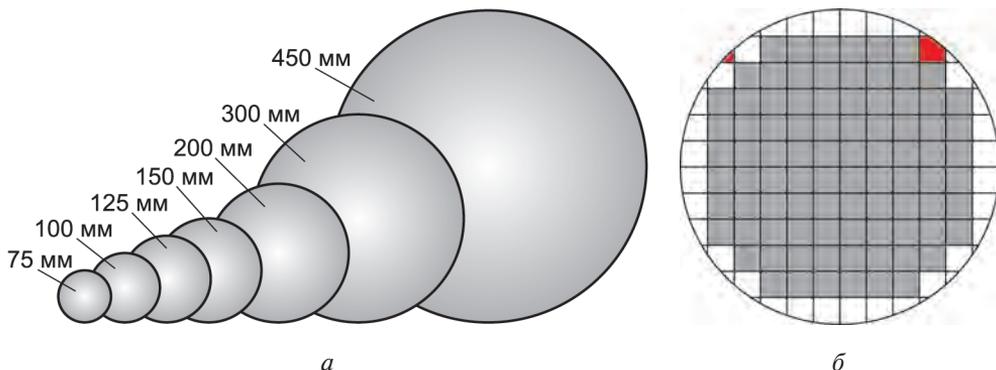


Рис. 2.4. Взаимосвязь размеров пластин и кристаллов:

а — диапазон диаметров кремниевых пластин; б — к расчету числа кристаллов на пластине

Приблизленно число кристаллов N_D , которые помещаются на пластине заданного диаметра (рис 2.4, б), можно определить по формуле

$$N_D = \frac{\pi(D_W/2)^2}{S_D} - \frac{\pi D_W}{\sqrt{2S_D}}. \quad (2.1)$$

Первая составляющая правой части формулы (2.1) — это отношение площади пластины (*Wafer*) с диаметром D_W к площади кристалла S_D (*Die*).

Вторая составляющая правой части (2.1) оценивает число кристаллов, не поместившихся полностью на круглой пластине. На пластине справа (см. рис. 2.4, б) выделен кристалл, у которого лишь малая часть отрезана окружностью пластины, а слева — кристалл, практически весь не поместившийся в контуре окружности. В среднем можно допустить, что кристаллы обрезаются окружностью пластины по их диагоналям, которые для квадратных кристаллов равны $\sqrt{2S_D}$.

Деление длины окружности на диагональ кристалла дает примерное значение числа обрезанных кристаллов.

По формуле (2.1) легко рассчитать, что, например, увеличение диаметра пластин с 200 до 300 мм приводит к росту числа кристаллов практически в 2,5 раза.

Кроме того, при постоянном увеличении размеров самих кристаллов их размещение на пластинах больших диаметров повышает эффективность производства.

Следует при этом учитывать, что перевод производства на новый размер пластин влечет за собой радикальную модернизацию оснастки, а чаще всего — переход на новые комплексы оборудования.

Это требует огромных капитальных вложений. Так, для перевода производства пластин диаметром 200 мм на пластины диаметром 300 мм в период с 1996 по 2003 г. было затрачено около 12 млрд долл., переход на пластины диаметром 450 мм потребует вложений более 20 млрд долл.

При этом микроэлектронное производство на основе пластин диаметром 300 мм может быть рентабельно при минимальном объеме обработки 80 000 пластин в месяц. Для пластин диаметром 450 мм это значение составляет уже 150 000 пластин в месяц.

По этой причине множество мелких и средних производителей микроэлектроники и МЭМС используют пластины меньших диаметров (75...150 мм), экономя на приобретении нового высокопроизводительного и, соответственно, очень дорогого технологического оборудования.

Допуск на диаметр пластин важен при их ориентации и базировании на ряде технологических операций, его значение составляет $\pm (0,1...0,2)$ мм.

Базовые срезы на кремниевых пластинах (основной и дополнительный) служат для идентификации кристаллографической ориентации пластины и типа ее проводимости (рис. 2.5).

Они также могут использоваться для ориентации и базирования пластины в технологической оснастке (рис. 2.6, *а*).

Базовые и дополнительные срезы выполняют на пластинах диаметром до 150 мм включительно. Начиная с пластин диаметром 200 мм, взамен базового среза используют вырез (*notch*) треугольной формы (рис. 2.6, *б*).

Вырезы, так же как базовые срезы, используют для ориентации и базирования пластин (рис. 2.6, *в*), однако они уже не позволяют идентифицировать тип проводимости и кристаллографическую ориентацию пластин.

Толщина пластин, на первый взгляд, кажется непропорционально малой по сравнению с их диаметрами. Однако следует напомнить (см. модуль 1), что активные микроструктуры формируются в приповерхностном слое толщиной всего 6...10 мкм, который составляет 1...2 % от общей толщины пластины. Поэтому значения толщины пластин в диапазоне от 380 до 800 и даже 925 мкм можно считать компромиссом между требованиями к жесткости и прочности подложки и стоимостью монокристаллического кремния.

Толщину пластины обычно измеряют в ее центре. При выполнении серии измерений в нескольких точках можно определить *общее изменение толщины пластины* (*Total Thickness Variation — TTV*), которое равно разности максимального (t_{\max}) и минимального (t_{\min}) значений измеренной толщины (*thickness*):

$$TTV = t_{\max} - t_{\min}$$

Для описания *отклонений формы пластин* используют ряд параметров (параметры деформации), приведенных в табл. 2.2.

Деформации пластины в свободном состоянии — *прогиб и коробление* — определяются как исходным качеством изготовления пластины, так и воздействием на нее высокотемпературных операций нанесения функциональных слоев и легирования.

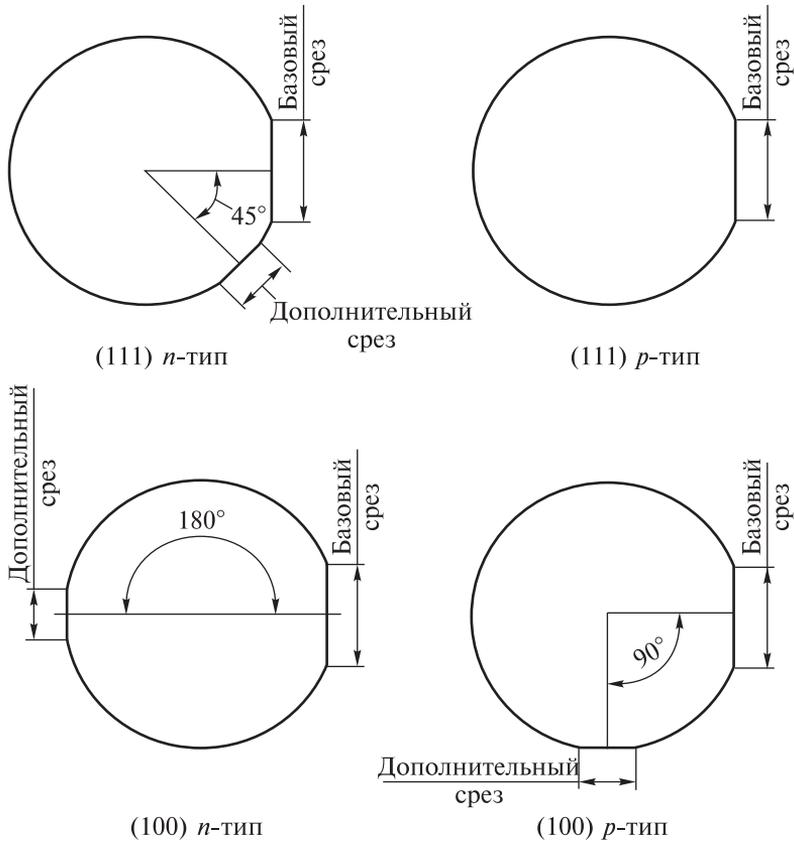


Рис. 2.5. Базовые и дополнительные срезы на кремниевых пластинах различной кристаллографической ориентации и типом проводимости

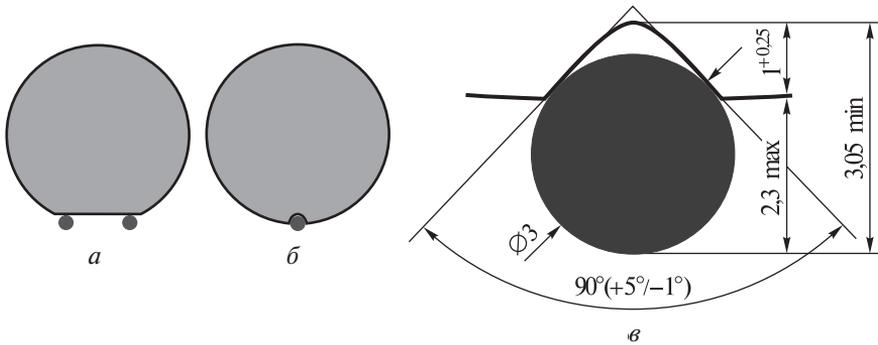
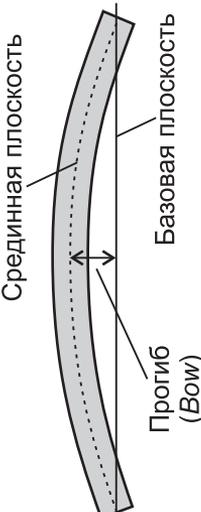
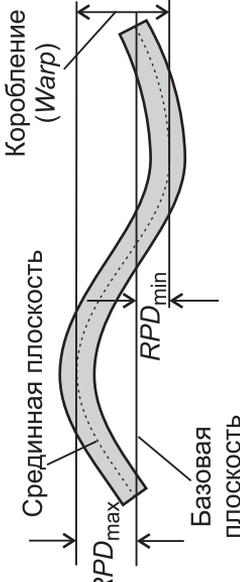
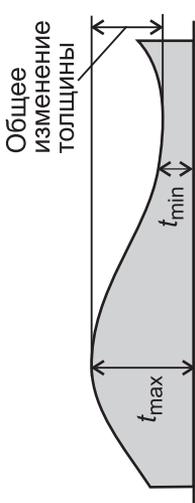
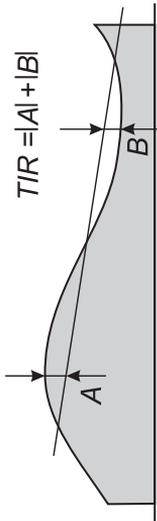


Рис. 2.6. Схемы базирования и ориентации кремниевых пластин: *a* — по базовому срезу; *б* — по треугольному вырезу; *в* — взаимодействие треугольного выреза и базирующего штифта (масштаб увеличен)

Таблица 2.2

Параметр	Определение	Эскиз
<p>Прогиб (<i>Bow</i>)</p>	<p>Отклонение центральной точки пластины в свободном состоянии от базовой поверхности</p>	
<p>Коробление (<i>Warp</i>)</p>	<p>Разность максимального отклонения средней точки пластины в свободном состоянии от базовой поверхности</p>	
<p>Общее изменение толщины (<i>Total Thickness Variation — TTV</i>)</p>	<p>Разность максимального и минимального значений толщины пластины</p>	
<p>Полное измеренное показание (<i>TIR — Total Indicated Reading</i>)</p>	<p>Максимальные отклонения поверхности пластины вверх <i>A</i> и вниз <i>B</i> от базовой (фокальной) плоскости</p>	 $TIR = A + B $

В отличие от *прогиба* (*Bow*), измеряемого только в центре пластины, *коробление* (*Warp*) оценивает деформации всей срединной поверхности и учитывает максимальные (RPD_{\max} — *Reference Plane Deviation*) и минимальные (RPD_{\min}) отклонения срединной поверхности вверх и вниз от базовой плоскости:

$$Warp = RPD_{\max} - RPD_{\min}.$$

Важнейшим параметром пластин является *плоскостность*. При этом учитывают, что во время выполнения прецизионных операций микротехнологии пластину обычно крепят на вакуумном подложкодержателе. Ее обратную сторону плотно прижимают к плоской опорной поверхности держателя, которая также становится максимально плоской.

Для оценки плоскостности используют следующие параметры (см. табл. 2.2):

- *общее изменение толщины пластины TTV*, поскольку при прилегании обратной стороны пластины к плоскому держателю разность максимального t_{\max} и минимального t_{\min} значений измеренной толщины пластины характеризует ее неплоскостность;

- *полное измеренное показание TIR* — максимальные отклонения поверхности пластины вверх и вниз от базовой плоскости. Чаще всего в качестве базовой используют фокальную плоскость, поэтому этот параметр имеет эквивалентное название *отклонение фокальной плоскости (Focal Plane Deviation — FPD)*.

Базовую плоскость проводят через выступы и впадины на поверхности пластины на основе регрессионного анализа измеренных значений. Выявляемый при этом угол наклона верхней плоскости относительно нижней (опорной) может быть устранен в установке совмещения и экспонирования поворотом плоскости подложкодержателя на требуемое значение угла.

Следует отметить, что значения неплоскостности определяют как для всей поверхности пластины (*Global Flatness*), так и для отдельных ее участков (*Site Flatness*).

Для уменьшения микросколов, внутренних напряжений и утолщений функциональных слоев на кромке пластины профильным шлифованием формируется *фаска*. Контур фаски в соответствии со стандартом SEMI M73 может быть полукруглой формы или иметь более сложную форму (рис. 2.7).

В последнем случае контур включает скосы под углом φ к поверхностям пластины, плечи, образованные окружностями с радиусом r , и вершину. Параметры такого контура для пластины диаметром 450 мм приведены в табл. 2.3.

Маркировка пластин необходима для их идентификации на протяжении многочисленных операций технологического цикла. Частично эту функцию для пластин диаметром до 150 мм выполняют базовые срезы. Расширение информативности обеспечивает лазерная маркировка в виде буквенно-цифровых кодов или штрихкодов, применяемая как на пластинах с базовым срезом (рис. 2.8, *а*), так и с базирующим вырезом (рис. 2.8, *б*).

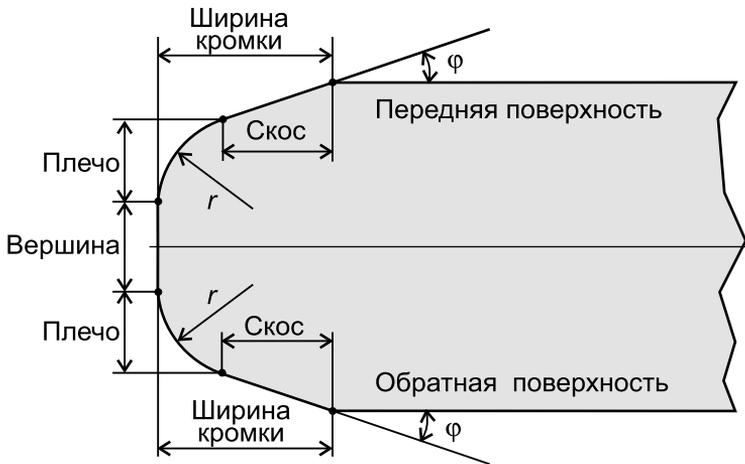


Рис. 2.7. Конфигурация и параметры фаски на кремниевой пластине

Маркировка занимает часть рабочей поверхности пластины, что уменьшает число размещаемых на ней кристаллов. Для устранения этого недостатка маркировку можно размещать на вершине фаски пластины (рис. 2.8, в).

Таблица 2.3

Параметр	Значение
Ширина кромки, мкм (<i>Edge Width</i>)	350
Угол скоса ϕ , град (<i>Bevel Angle</i>)	22,5
Радиус плеча r , мкм (<i>Shoulder Radius</i>)	202,5

Рассмотрение основных характеристик кремниевых пластин позволяет провести анализ их количественных параметров, которые указывают в спецификациях на пластины.

Полная спецификация параметров кремниевых монокристаллических пластин, оформленная в соответствии с международными стандартами SEMI (*Semiconductor Equipment and Materials International*), занимает несколько страниц.

Выборка наиболее существенных параметров пластин диаметром 300 мм:

- диаметр $300 \pm 0,2$ мм;
- ориентация: $(100) \pm 1^\circ$;
- легирование бором/фосфором;
- удельное электрическое сопротивление $1 \dots 30$ Ом·см;
- радиальный градиент электрического сопротивления $\leq 10 \%$;
- концентрация кислорода ≤ 30 ppm;
- концентрация углерода ≤ 1 ppm;
- концентрация металлов на поверхности $\leq 1 \cdot 10^{10}$ см⁻²;
- количество частиц размером 0,2 мкм на поверхности пластины ≤ 30 ;
- количество частиц размером 0,12...0,16 мкм на поверхности пластины ≤ 50 ;

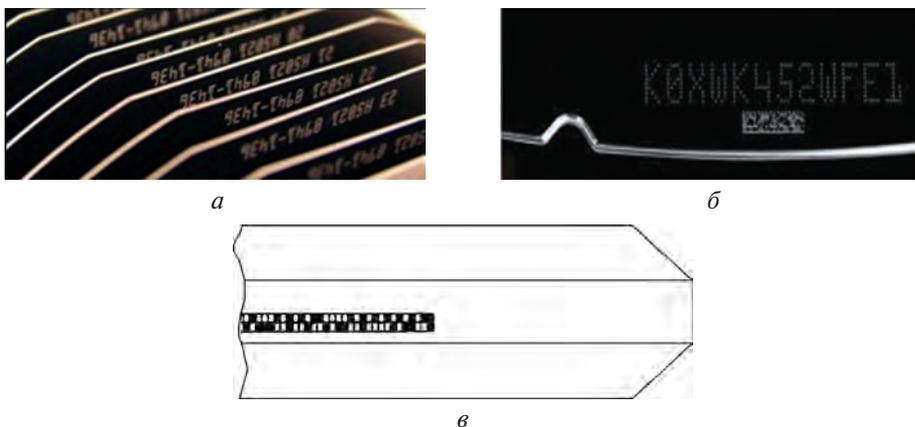


Рис. 2.8. Маркировка кремниевых пластин:

a — с базовым срезом; *б* — с базирующим вырезом; *в* — на вершине фаски

- толщина 775 ± 25 мкм;
- коробление/прогиб ≤ 40 мкм;
- неплоскостность:
 - $TTV \leq 2$ мкм;
 - $GBIR \leq 5$ мкм;
 - $STIR \leq 0,25$ мкм;
 - $SFQR = 20...30$ нм;
- шероховатость поверхности $Ra \leq 1$ нм.

В выборке обозначены:

- *ppma* — число атомов примеси, приходящихся на миллион атомов кремния;
- *TTV* — общее изменение толщины;
- *GBIR* — общий диапазон изменений относительно идеальной задней поверхности;
- *STIR* — максимальные отклонения поверхности пластины вверх и вниз от базовой плоскости ее отдельных участков;
- *SFQR* — диапазон отклонения элементов участка поверхности пластины от передней базовой плоскости наибольшего соответствия.

Приведенные значения параметров пластин существенно различаются по сложности их реализации в технологическом процессе.

Так, допуск на диаметр пластин, необходимый для обеспечения работы систем загрузки, транспортировки, ориентации и базирования пластин, составляет доли миллиметра.

В то же время допуск на толщину пластин не превышает 25 мкм.

Для оценки плоскостности пластин используют несколько параметров. Плоскостность всей поверхности пластины характеризуется показателями *TTV* и *GBIR* — *Global Backside Ideal Focal Plane Range*.

В идеальном случае эти параметры должны быть одинаковы, однако ввиду неплоскостности опорных поверхностей подложкодержателей

и остаточных прогибов пластин при закреплении значения $GBIR$ больше TTV , при этом они не превышают нескольких микронметров.

Локальная неплоскостность определяет возможность реализации последующей микролитографии, поэтому значения параметров $STIR$ и $SFQR$ существенно меньше и составляют доли микронметра.

Параметр $STIR$ (*Site Total Indicated Reading*) описывает аналогично TIR максимальные отклонения поверхности элементов пластины вверх и вниз от базовой плоскости на ее отдельных участках.

В свою очередь, параметр $SFQR$ (*Site Frontside Least Squares Focal Plane Range*) оценивает диапазон отклонения элементов участка поверхности от передней базовой плоскости наибольшего соответствия. Эту плоскость проводят через выступы и впадины на поверхности пластины на основе регрессионного анализа. Обычно $SFQR$ определяют на участке размером 26×8 мм, соответствующим размеру рабочего поля современных сканирующих степперов для микролитографии.

Значения прогибов и короблений важны на этапах изготовления пластин для оценки качества технологических процессов, однако на этапах микролитографии они не имеют столь большого значения, так как компенсируются прижимом пластин к плоским подложкодержателям.

При изготовлении пластин для обеспечения стабильности параметров формируемых на пластине микроструктур необходимо, чтобы радиальный градиент электрического сопротивления не превышал 10 %.

Жесткие ограничения накладываются на содержание примеси в исходном материале кремния. Для оценки концентрации примеси наряду с числом атомов N в кубическом сантиметре [$N \cdot \text{см}^{-3}$] часто используют также параметр $ppma$ (*part per million atoms*); 1 $ppma$ означает, что на 10^6 атомов кремния приходится 1 атом примеси. Поскольку в 1 см^3 кремния содержится $5 \cdot 10^{22}$ атомов, 1 $ppma$ — это концентрация примеси $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Обеспечение задаваемых значений параметра $ppma$ для кислорода и особенно для углерода требует применения специальных методов очистки кремния. Это же относится к концентрации металлов (примеси Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Zn, Ca, K, Na существенно снижают время жизни носителей тока в монокристаллах кремния) и количеству микрочастиц на поверхности пластин.

Шероховатость поверхности пластин (*Roughness*), предназначенных для изготовления интегральных схем, часто не превышает 1 нм.

На рабочих поверхностях пластин, выполненных из монокристаллического сверхвысокоочищенного кремния, не должно быть нарушенного слоя. При этом они являются объектом массового производства.

Жесткие требования, предъявляемые к параметрам кремниевых пластин, обусловили многоэтапность их производства и применение широкого спектра физико-химических и механических методов обработки.

Производство кремниевых пластин включает следующие стадии:

- 1) получение монокристаллического кремния;
- 2) механическая и химико-механическая обработка кремниевых слитков и пластин.

2.2. Получение монокристаллического кремния

Кратко напомним основные свойства кремния.

Кремний — элемент IV группы Периодической системы с атомным номером 14. После кислорода кремний — самый распространенный элемент в природе. Он составляет примерно четверть массы земной коры. Наиболее распространенным соединением кремния является диоксид кремния SiO_2 , который встречается главным образом в виде минерала — кварца. В свободном состоянии кремний в природе не встречается.

Кристаллический кремний — темно-серое вещество, твердое и хрупкое, с металлическим блеском, химически довольно инертное. При комнатной температуре химически устойчив, в воде не растворим.

Плотность твердого кремния при комнатной температуре составляет $2,32 \text{ г/см}^3$, жидкого кремния (при температуре плавления) — $2,53 \text{ г/см}^3$. Температура плавления кремния $1420 \text{ }^\circ\text{C}$, кипит кремний при температуре $2477 \text{ }^\circ\text{C}$.

В кремнии каждый атом образует четыре валентные связи с ближайшими соседями, в результате чего получается кристаллическая решетка типа алмаза (рис. 2.9, *a*). Решетка кремния состоит из двух гранцентрированных решеток, сдвинутых одна относительно другой на $1/4$ постоянной решетки a (рис. 2.9, *б*, *в*).

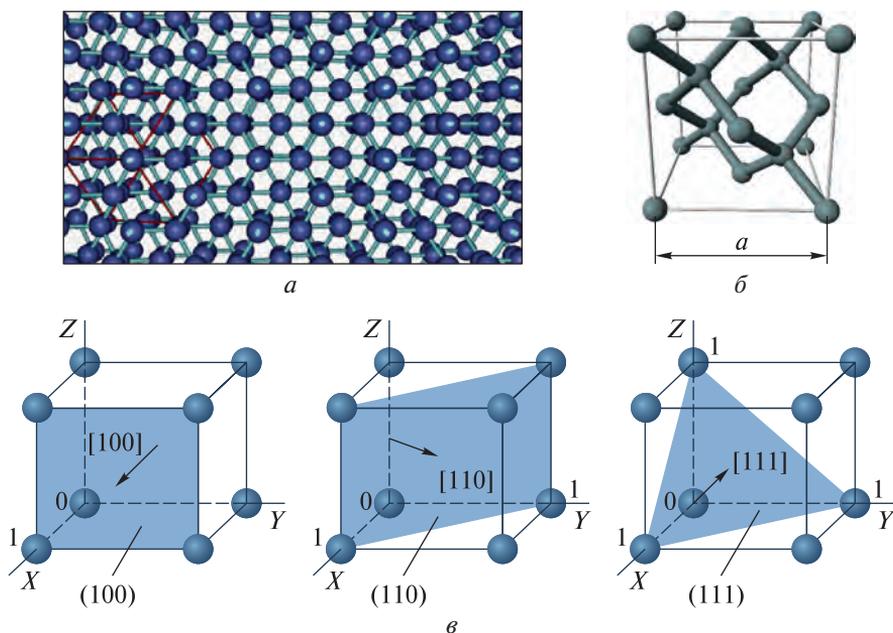


Рис. 2.9. Кристаллическая структура кремния:

a — алмазоподобная кристаллическая решетка; *б* — расположение атомов; *в* — кристаллографические плоскости кремния

Постоянная решетки $a = 0,54$ нм, при этом кратчайшее расстояние между атомами составляет 0,23 нм. Легирующие атомы замещают атомы кремния, занимая их место в кристаллической решетке. Основными легирующими атомами являются фосфор (пятивалентный донор замещения) и бор (трехвалентный акцептор замещения).

Все кристаллические вещества обладают анизотропностью, т. е. свойства кристаллов различны для разных кристаллографических плоскостей. Для задания нужных плоскостей используют индексы Миллера. Наиболее важные плоскости кремниевой кристаллической решетки, обозначенные индексами Миллера, показаны на рис. 2.9, *г*.

Ввиду высокого сродства Si к O₂ на поверхности Si даже при комнатной температуре нарастает пленка SiO₂ толщиной 0,005...0,01 мкм, которая пассивирует кремний и защищает его от воздействия атмосферы. При высоких температурах (более 600 °С) возможно получение функциональных пленок SiO₂ необходимой толщины.

Кремний устойчив к кислотам и растворяется только в смеси азотной и фтористоводородной кислот, легко растворяется в горячих растворах щелочей с выделением водорода. Кремний реагирует с фтором при комнатной температуре, с остальными галогенами — при нагреве.

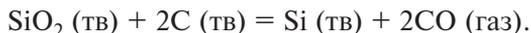
2.2.1. Этапы производства кремния

Технология получения монокристаллов полупроводникового кремния включает следующие основные этапы:

- 1) получение технического (металлургического) кремния;
- 2) превращение технического кремния в газообразное соединение, его очистка;
- 3) получение поликристаллического кремния методом водородного восстановления;
- 4) выращивание монокристаллов.

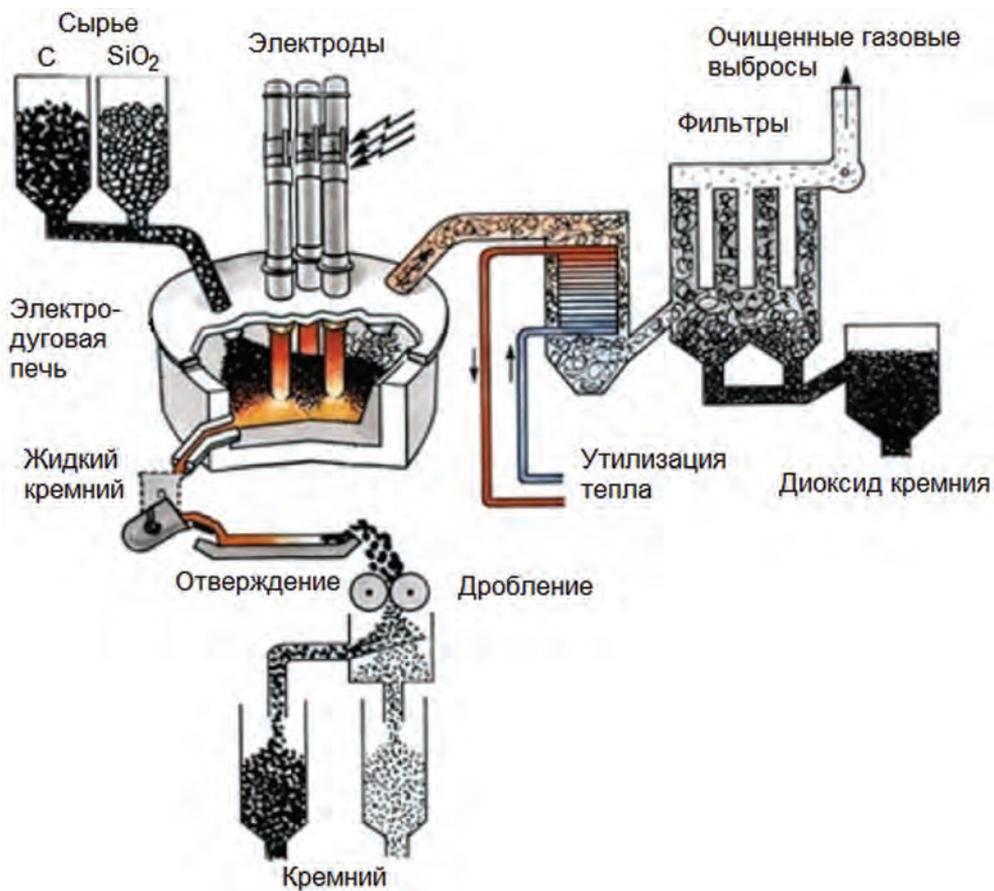
Получение технического кремния

Производственная цепочка получения кремния начинается с диоксида кремния (кремнезема) SiO₂. Кремнезем широко распространен в природе в виде песка, кварца и глины. Восстановление кремния из SiO₂ ведут карботермическим процессом за счет взаимодействия диоксида кремния с углеродом при температуре около 1800 °С:

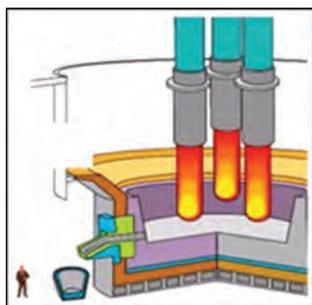


Исходное сырье вносят в состав шихты в виде кварцита — кварцевого песка, содержащего не менее 98 % SiO₂.

Углерод получают из древесного угля, кокса, сажи, древесной щепы.



a



b



в

Рис. 2.10. Получение металлургического поликремния:

a — общая схема получения металлургического поликремния; *b* — вид дуговой печи;

в — трехэлектродная печь

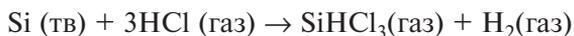
Карботермический процесс ведут в дуговых электропечах (рис. 2.10, б) огромной мощности — от 8 до 25 МВ·А (мегавольт-ампер). Подачу энергии осуществляют с помощью одного, двух или трех графитовых электродов, при этом сила тока составляет 40...80 кА.

Кремний поступает из плавильной печи в чугунные изложницы, футерованные угольными блоками, при температуре 1500...1600 °С. Масса слитков достигает 1200 кг. Далее кремний дробят на куски размерами около 100 мм.

Чистота технического (металлургического) кремния составляет 98...99 % Si, его стоимость 1,5...2 долл. за килограмм. За рубежом такой кремний обозначают *MG-Si* (*Metallurgical Grade Silicon*).

Получение и очистка трихлорсилана

Для последующей очистки кремний превращают в газообразное соединение (рис. 2.11): его хлорируют до получения газообразного трихлорсилана (ТХС) SiHCl_3 :



Газообразный ТХС пропускают через фильтры для выделения твердых частиц. Далее парогазовая смесь поступает на конденсацию, дистиляционное разделение и многократную обработку в ректификационных колоннах.

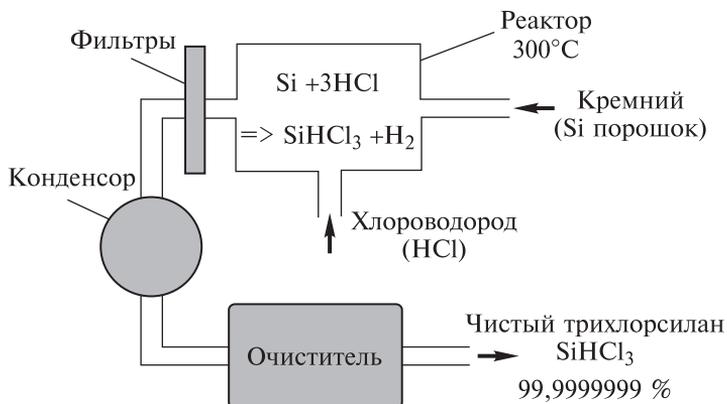


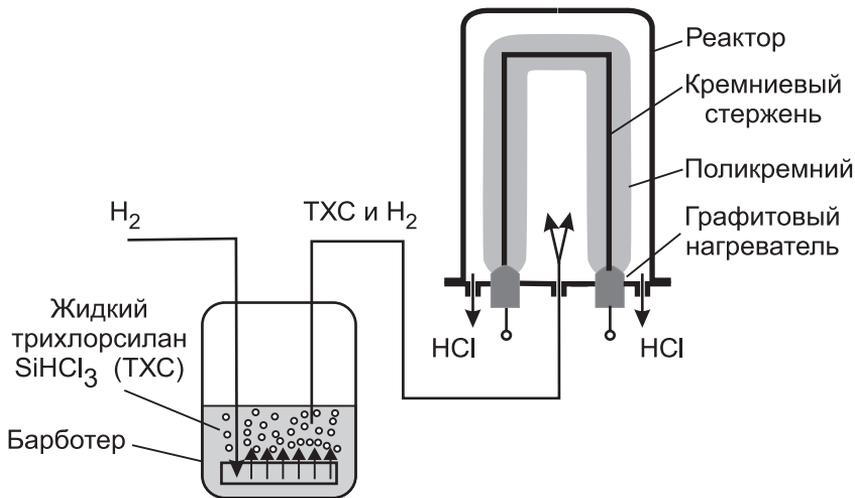
Рис. 2.11. Схема получения и очистки ТХС

Ректификат ТХС содержит суммарное количество примесей не более 10^{-6} %, а отдельных, например бора, до 10^{-9} %.

Получение поликремния методом водородного восстановления

Очищенный ТХС является основным сырьем для получения чистого поликремния. Для этого чаще всего применяется процесс и реактор фирмы «Сименс» (*Siemens*). Сименс-процесс — это процесс химического осаждения поликремния из газовой фазы (*Chemical Vapour Deposition — CVD*).

Газообразный ТХС и водород подают в реактор, в котором размещены стержни-затравки из кремния высокой чистоты (рис. 2.12, *a*).



a



б



в

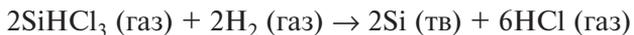


г

Рис. 2.12. Получение поликристаллического кремния:

a — схема реактора фирмы «Сименс»; *б* — компоновка реактора; *в*, *г* — поликристаллические слитки

Стержни нагреты до температуры 1200...1300 °С, поэтому именно на их поверхности ТХС реагирует с водородом, разлагается и осаждается в виде поликремния:



Компоновка реактора фирмы «Сименс» позволяет наращивать одновременно несколько поликристаллических заготовок (рис. 2.12, б), размеры и форма которых определяются конфигурацией и размерами исходных стержней-затравок (рис. 2.12, в, г).

Для легирования получаемого поликремния в реактор совместно с ТХС и водородом подают также легирующие примеси, чаще всего в виде газообразных AsH_3 или PH_3 .

Применяемый в современном производстве поликремний в зависимости от назначения может иметь разную степень чистоты. Так, поликремний, предназначенный для производства элементов солнечных батарей (*Solar Grade Silicon — SoG-Si*) имеет чистоту 99,9999–99,999999 %, т. е. 6–8 девяток. Количество примесей: В < 3 ppm, Р < 10 ppm, общие металлические примеси менее 300 ppm (предпочтительнее менее 150 ppm).

Поликремний для будущих заготовок интегральных микросхем очищается до уровня 99,9999999–99,999999999 %, т. е. 9–11 девяток. Этот тип кремния обозначают *EG-Si (Electronic Grade Silicon)*.

Следует отметить ряд важных особенностей процесса.

Для получения сверхчистого кремния все используемые материалы, включая газы, также должны быть сверхчистыми.

Применяемые в процессе химические реактивы относятся к числу особо опасных. Так, AsH_3 и PH_3 — одни из наиболее ядовитых веществ, известных человечеству, PH_3 (фосфин) даже использовался в период первой мировой войны в качестве боевого отравляющего газа.

Водород и ТХС — легковоспламеняющиеся и взрывоопасные вещества, хлороводород HCl в газообразном состоянии еще более опасен, чем в жидком, и является чрезвычайно активным коррозионным веществом. Применение этих химикатов требует тщательной подготовки систем безопасности, утилизации отходов и построения производства по замкнутому циклу.

При контроле сименс-процесса приходится учитывать, что скорость потока водорода может составлять 100 л/мин, в то время как скорость потока легирующих газов не превышает нескольких миллилитров в минуту (мл/мин), при этом их общий поток должен быть однородным в зоне протекания реакции на кремнии.

Сименс-процесс не очень производителен (около 1 кг/ч) и поэтому не дешев: стоимость поликристаллического кремния существенно выше технического и составляет 50...100 долл. за килограмм.

2.2.2. Выращивание монокристаллов

В промышленных условиях монокристаллические слитки кремния в основном получают методом Чохральского (80...90 % потребляемого электронной промышленностью), в меньшей степени — методом бестигельной зонной плавки.

Метод Чохральского

Суть метода получения кристаллов по Чохральскому заключается в выращивании монокристалла за счет перехода атомов из жидкой фазы вещества в твердую фазу на границе раздела.

В методе Чохральского торец монокристаллической затравки заданной кристаллографической ориентации приводят в соприкосновение с поверхностью расплавленного кремния (рис. 2.13). Контактующий с затравкой слой расплава кремния кристаллизуется, причем структура образующейся твердой фазы кремния полностью повторяет структуру затравки.

Вращая монокристаллическую затравку и одновременно перемещая ее вверх, из расплава вытягивают монокристаллический слиток кремния цилиндрической формы. В настоящее время освоена технология получения слитков диаметром до 300 мм, готовится переход на слитки диаметром 450 мм.

Температуру и скорость вытягивания регулируют так, чтобы в начале процесса формировалась тонкая шейка диаметром 4...8 мм и длиной 200...300 мм, предотвращающая образование дислокаций из-за температурного шока в момент контакта монокристаллической затравки и расплава.

Скорость вытягивания на этом этапе составляет 2...4 мм/мин.

Далее формируют участок с большим диаметром (плечики), а затем идет равномерное вытягивание слитка заданного диаметра со скоростью около 1 мм/мин.

Для уменьшения загрязнений расплава в установке для выращивания кристаллов методом Чохральского используют реактор из плавленного

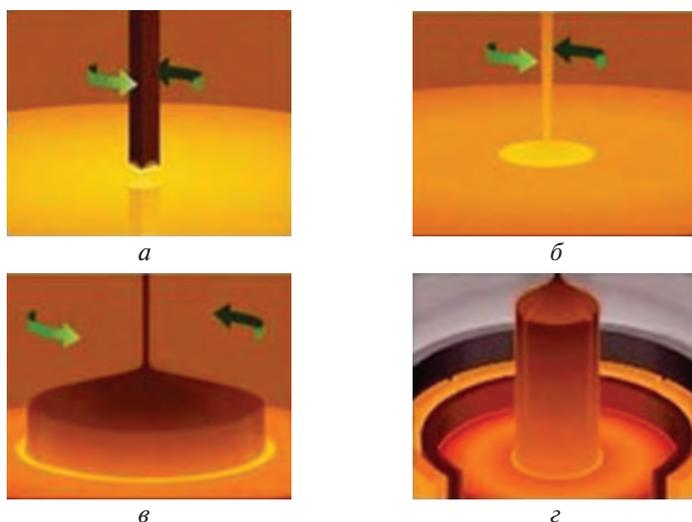
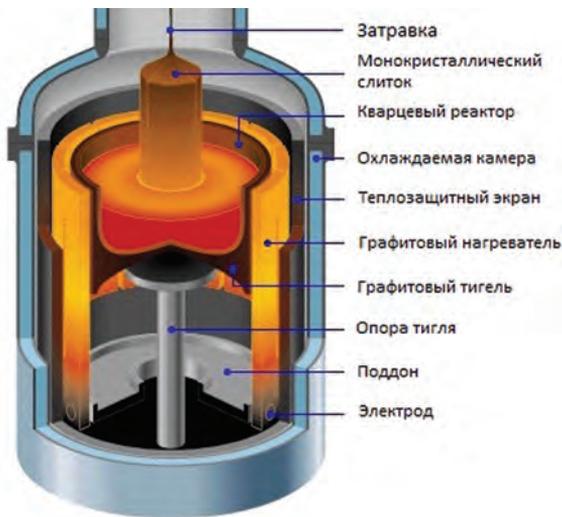


Рис. 2.13. Этапы выращивания монокристаллического слитка кремния по методу Чохральского:

а — погружение монокристаллической затравки в расплав; *б* — образование шейки; *в* — формирование плечиков; *z* — вытягивание слитка



а



б

Рис. 2.14. Установка для получения слитков по методу Чохральского (а), слиток монокристаллического кремния диаметром 200 мм (б)

кварца, размещаемый в графитовом тигле (рис. 2.14). Процесс ведут в среде инертного газа, например аргона.

Монокристаллическую затравку и тигель с расплавом обычно вращают в противоположные стороны, что обеспечивает радиальную однородность температурного поля, а также способствует однородности растущего кристалла.

Легирование слитка осуществляют добавлением в расплав сильнолегированных гранул кремния.

На однородность распределения примесных атомов по длине слитка сильное влияние оказывает явление сегрегации, которое обусловлено различной растворимостью атомов в жидкой и твердой фазах.

Отношение концентраций примесей в твердой C_S и жидкой C_L (индексы S — от англ. *Solid*, твердый; индекс L — от англ. *Liquid*, жидкий) фазах называется коэффициентом сегрегации примеси k_0 , его значения для наиболее распространенных примесных атомов приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Коэффициент	Примесь				
	P	As	Sb	B	Al
$k_0 = C_S/C_L$	0,35	0,30	0,023	0,80	0,002

Анализ процесса постепенного затвердевания расплава кремния с учетом сегрегации примесей позволяет оценить их распределение по длине слитка.

Пусть в начальном объеме расплава V_0 содержится некоторое количество примесей I_0 , что соответствует концентрации примесей в расплаве C_0 .

В процессе вытягивания текущее значение объема расплава становится равным V_L , при этом количество примесей в нем составляет I_L , а соответствующая концентрация примесей равна C_L .

Объем затвердевшего слитка обозначим V_S , а концентрацию примесей в нем как C_S .

При затвердевании части объема расплава dV_S из него переходит в расплав некоторое количество примеси dI :

$$dI = -k_0 C_L dV_S. \quad (2.2)$$

Выражение (2.2) легко преобразуется к виду

$$dI = -k_0 \frac{I_L}{V_0 - V_S} dV_S. \quad (2.3)$$

Проведем интегрирование выражения (2.2):

$$\int_{I_0}^{I_L} \frac{dI}{I_L} = -k_0 \int_0^{V_S} \frac{dV_S}{V_0 - V_S}, \quad (2.4)$$

получим

$$I_L = I_0 \left(1 - \frac{V_S}{V_0} \right)^{k_0}, \quad (2.5)$$

а учитывая, что $C_S = -\frac{dI_L}{dV_S}$, окончательно имеем

$$C_S = C_0 k_0 (1 - f)^{k_0 - 1}, \quad (2.6)$$

где $f = V_S/V_0$ — относительный объем затвердевшего слитка.

Выражение (2.5) позволяет оценить концентрацию примеси по ее исходному значению в расплаве C_0 , присущему ей коэффициенту сегрегации k_0 и относительному объему затвердевшего слитка f .

Метод бестигельной зонной плавки

Метод бестигельной зонной плавки основан на проплавлении в исходном слитке кремния узкой зоны и перемещении ее вдоль слитка. При этом исключен контакт расплава кремния с тиглем, что позволяет получать более тонкую очистку, чем методом Чохральского.

Расплавленную зону формируют кольцевым нагревателем, например индукционной катушкой, которая перемещается вдоль оси слитка (рис. 2.15).

При использовании затравочного кристалла с нужной кристаллографической ориентацией можно одновременно с очисткой формировать из исходного поликремния монокристаллические слитки.



a



b

Рис 2.15. Зонная плавка:

a — схема процесса; *b* — фото зоны расплава

Зона расплава удерживается в слитке только силами поверхностного натяжения и обычно не превышает в диаметре 20...30 мм. Поэтому для изготовления слитков приемлемого диаметра используют метод, получивший название пропускания слитка через «игольное ушко» (*needle eye*).

Область контакта слитка поликристаллического кремния с монокристаллической затравкой разогревают до плавления с помощью СВЧ-индуктора, после чего узкая зона расплава перемещается по стержню к противоположному концу, оставляя за собой монокристаллический кремний. Вследствие явления сегрегации вместе с зоной расплава перемещается и значительная доля примесных атомов.

Выбирая соответствующую скорость перемещения зоны расплава, можно регулировать диаметр формирующегося монокристалла, однако получить слитки с диаметром более 150 мм пока не удалось.

Перемещая зону расплава по всему слитку несколько раз, можно добиться того, что большая часть примесных атомов будет скапливаться вблизи верхнего торца слитка. Эту область отрезают и в результате получают монокристаллический слиток с малым содержанием примесных атомов.

Удельное сопротивление слитков кремния, выращенных методом Чохральского, редко превышает значение 25 Ом·см вследствие загрязнения

слитка неконтролируемыми примесными атомами (в первую очередь кислородом). Удельное сопротивление кристаллов, выращенных методом бестигельной зонной плавки, может изменяться в широких пределах, достигая значения 200 Ом·см. При выращивании в вакууме можно получить кристаллы с очень высоким удельным сопротивлением — до 30 000 Ом·см.

Для оценки распределения примесей по длине слитка в методе зонной плавки следует учесть длину зоны расплава L (рис. 2.16), начальную концентрацию примесей в исходном слитке C_0 , концентрацию примесей в расплаве C_L и в кристаллизующейся твердой фазе C_S .

В начальной стадии процесса в расплавленной зоне внизу слитка количество примесей в объеме с единичной площадью будет I_0 . В дальнейшем в зоне расплава количество примесей станет I_L , оно изменится за счет вытеснения примесей из твердой фазы формирующегося монокристалла.

При перемещении зоны расплава на расстояние dx количество примесей в нем изменится на величину dI :

$$dI = (C_0 - k_0 C_L) dx. \quad (2.6)$$

Поскольку для объема единичной площади $C_L = I_L/L$, получаем

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{\left(C_0 - \frac{k_0 I_L}{L}\right)} = \int_0^x dx. \quad (2.7)$$

Учитывая в дальнейшем, что $I_0 = C_0 L$, $C_S = k_0 I_L/L$, имеем

$$C_S = C_0 \left(1 - (1 - k_0) e^{-\frac{x k_0}{L}}\right). \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) позволяет по исходной концентрации примеси оценить ее распределение по длине слитка, задавая относительные координаты x/L .

Сравнительные характеристики рассмотренных методов формирования и очистки монокристаллических слитков приведены в табл. 2.5.

Метод зонной плавки обеспечивает по сравнению с методом Чохральского более высокое удельное сопротивление монокристаллического кремния и меньшее количество примесей, особенно кислорода.

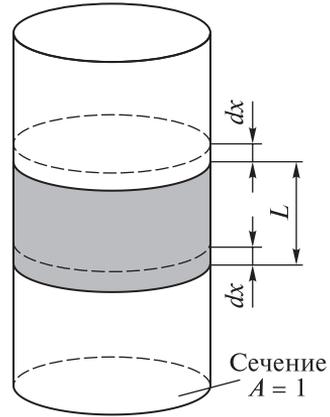


Рис.2.16. Схема оценки распределения примесей по длине слитка при зонной плавке

Таблица 2.5

Характеристика	Метод	
	Чохральского	зонной плавки
Скорость роста, мм/мин	1...2	3...5
Наличие тигля	Есть	Нет
Стоимость расходных материалов	Высокая	Низкая
Время нагрева/охлаждения	Длительное	Краткое
Осевая равномерность удельного электрического сопротивления	Хуже	Лучше
Содержание атомов кислорода ($N/\text{см}^3$)	$>1 \cdot 10^{18}$	$>1 \cdot 10^{16}$
Содержание атомов углерода ($N/\text{см}^3$)	$>1 \cdot 10^{17}$	$>1 \cdot 10^{16}$
Примеси металлов	Больше	Меньше
Время жизни неосновных носителей заряда, мс	5...100	1000...20 000
Диаметр слитков, мм	150...300 (450)	100...150
Квалификация оператора	Средняя	Высокая

С одной стороны, метод зонной плавки обеспечивает по сравнению с методом Чохральского более высокое удельное сопротивление монокристаллического кремния и меньшее количество примесей, особенно кислорода.

С другой стороны, необходимость предварительного формирования исходного слитка (в методе Чохральского используют просто куски поликремния), ограничения по диаметру (до 150 мм против 200, 300 и даже 450 мм) затрудняют применение зонной плавки для производства специальных полупроводниковых приборов, например детекторов или силовых приборов.

2.2.3. Обработка кремниевых слитков и пластин

Механическая обработка слитков

Монокристаллические слитки кремния, полученные и очищенные методами Чохральского или зонной плавки, являются основными заготовками для получения кремниевых пластин (рис. 2.17).

Предварительно слиткам придают надлежащую форму (рис. 2.18).

С обоих концов отрезают хвостовики, проводят калибровку по диаметру, формируют базовый срез.

Отрезку хвостовиков выполняют на том же оборудовании, что и последующую резку слитков на пластины.

Калибровка или круглая шлифовка слитка по диаметру (рис. 2.19, а) необходима для выравнивания его поверхности и получения впоследствии пластин равного диаметра.



Рис. 2.17. Монокристаллические слитки кремния



Рис. 2.18. Этапы формирования слитка

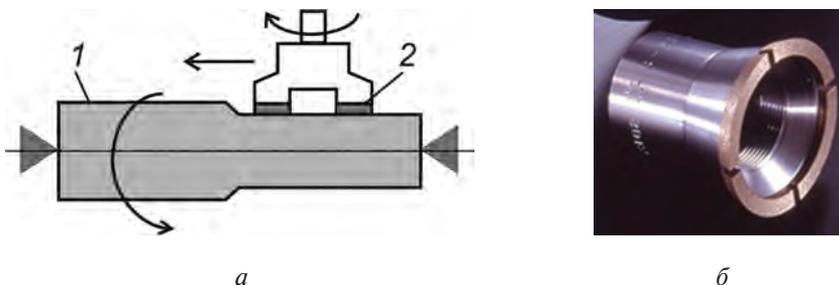


Рис. 2.19. Шлифование кремниевых слитков:
a — калибровка; *б* — чашечный алмазный круг

Калибровку ведут на шлифовальных станках чашечными алмазными кругами (рис. 2.19, *б*). Для калибровки слитка предварительно к его торцам наклеивают мастику, крепящую центры. При шлифовании слиток охлаждают водой.

Формирование базовых срезов выполняют чашечными алмазными кругами того же типа, что и для калибровки слитков.

Последующее разделение слитка на пластины и их механическую обработку можно считать первыми операциями технологического процесса производства микроструктур. В результате выполнения этих операций получают комплекс физических, электрических, геометрических параметров, обеспечивающих кремниевой пластине свойства технологической подложки.

Механическая обработка кремниевых пластин

Особенности механической обработки кремниевых пластин определяются высокой твердостью и хрупкостью кремния. Поэтому обработку ведут с использованием абразивов как в связанном состоянии (алмазные диски и шлифовальные круги), так и в свободном (абразивные суспензии и алмазные пасты).

Монокристаллический кремний весьма дорог, и его потери при формообразовании пластин снижают эффективность производства микроструктур.

При абразивной обработке кремния нарушается совершенство кристаллической решетки приповерхностного слоя кремниевой пластины — на ее поверхности возникает механически нарушенный слой, структура которого может быть разделена по толщине на три зоны (рис. 2.20).

Первая зона — это нарушенный *рельефный слой*, состоящий из хаотически расположенных выступов и впадин. Ниже расположена вторая зона, которая характеризуется одиночными выколками и идущими на всю ее глубину трещинами — *трещиноватый слой*. Третья зона представляет собой монокристаллический слой без механических повреждений, но имеющий упругие деформации — *напряженный слой*.

После абразивной обработки кремниевых пластин нарушенный слой должен быть полностью удален с их поверхностей.



Рис. 2.20. Структура нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины

Механизмы разрушения кремния при обработке свободным и связанным абразивами имеют различия.

Частицы *свободного абразива*, вдавливаясь в поверхность кремния, вызывают образование в ней микротрещин (рис. 2.21, *а*). В процессе обработки они увеличиваются и распространяются вглубь от поверхности, формируя сеть микротрещин, которые при смыкании вызывают сколы (микровыколки) отдельных участков кремния (рис. 2.21, *б*), в результате происходит послойное удаление материала.

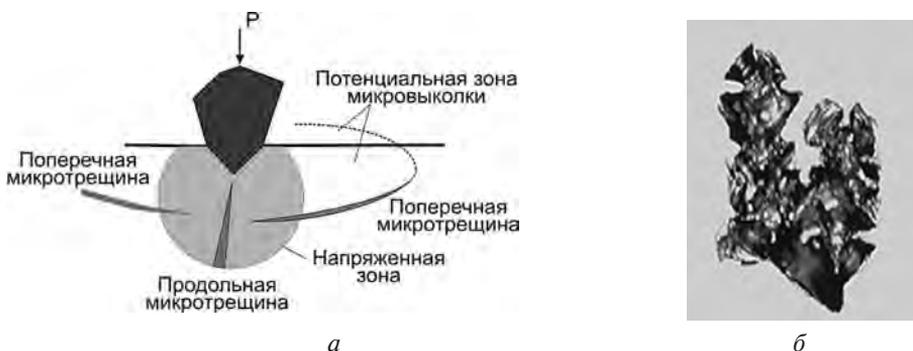


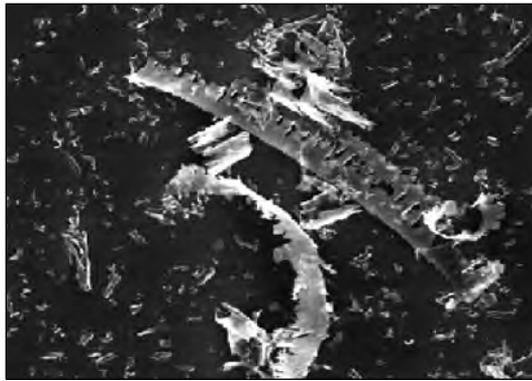
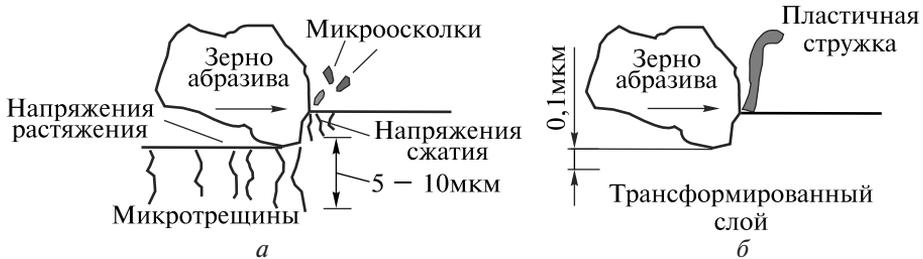
Рис. 2.21. Зона обработки свободным абразивом:
а — формирование микротрещин и зоны микровыколки; *б* — микроосколок кремния

Свободный абразив подают в зону обработки в виде жидких абразивных суспензий, т. е. абразивного порошка, который находится в жидкости во взвешенном состоянии и равномерно распределен в ней.

Жидкость переносит новую порцию абразивных зерен, поступающих из дозатора, и выносит из зоны обработки разрушенные частицы обрабатываемого материала, уменьшает перегрев обрабатываемых поверхностей. Использование в качестве жидкости щелочных или кислотных растворов при абразивной обработке обеспечивает химическое воздействие на обрабатываемый кремний.

Кроме того, жидкость проникает в микротрещины на поверхности кремния и способствует откалыванию от его поверхности отдельных частиц за счет расклинивающего действия сил поверхностного натяжения.

При обработке связанным абразивом помимо действия нормальной силы, направленной перпендикулярно поверхности, добавляется действие сдвигающей силы, направленной вдоль поверхности пластины (рис. 2.22, а). Это обеспечивает срезание микровыступов поверхности закрепленным зерном абразива.



в

Рис. 2.22. Особенности обработки связанным абразивом:

а — режим хрупкого разламывания; б — режим пластического деформирования;
в — пластичная стружка на фоне микроосколков кремния

При обработке *свободным абразивом* ударная сила направлена внутрь обрабатываемого кремния и абразивные зерна приводят к сильному разрушению поверхностного слоя. При обработке *связанным абразивом* основная часть сил направлена не внутрь, а вдоль обрабатываемой поверхности, что вызывает меньшую глубину разрушения исходного материала при той же толщине удаленного слоя.

Жидкость при обработке *связанным абразивом* используют лишь для охлаждения режущего инструмента и обрабатываемого материала.

При определенном сочетании скорости резания и силы подачи абразива возможно формирование продуктов резания кремния не в виде микроосколков, а в виде пластичной стружки (рис. 2.22, б, в). При этом трансформированный слой в зоне резания не превышает долей микрометра, что делает этот режим обработки наиболее эффективным. Однако достижение таких режимов пока не оработано до уровня, пригодного для промышленного применения.

Типовой технологический процесс изготовления пластин включает следующие операции:

- резка слитков на пластины;
- снятие фасок;
- шлифовка и полировка;
- химико-механическая полировка рабочей стороны;
- финишная очистка.

Резка слитков на пластины — первая формообразующая операция на этапе получения подложек. Поскольку кремний обладает высокой твердостью, его резка сопряжена с большими нагрузками и температурой в зоне обработки. Именно на этом этапе формируется максимальный по глубине нарушенный слой, последующие процессы шлифовки и полировки приводят к уменьшению глубины залегания этого слоя.

В современной технологии наиболее широко применяют резку слитков дисками с внутренней режущей кромкой и проволокой.

Резка дисками — традиционный и наиболее распространенный в настоящее время метод разделения слитков на пластины для микроэлектронного производства. Инструментом для резки здесь является тонкий круглый диск из холоднокатаной стальной ленты, в центре которого выполнено отверстие диаметром, соответствующим диаметру разрезаемого слитка (рис. 2.23).

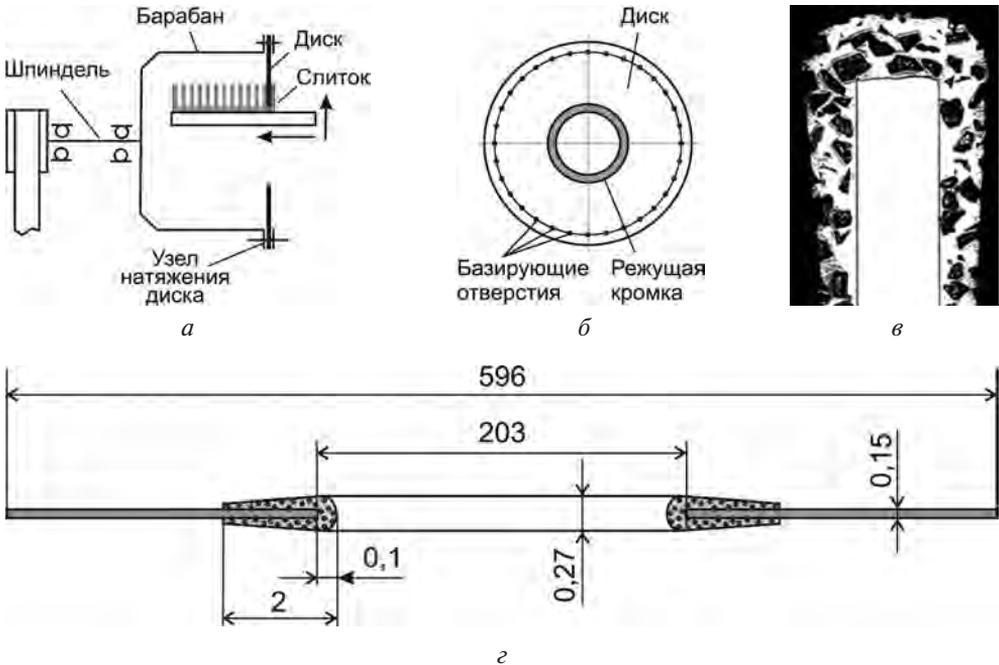


Рис. 2.23. Резка диском с внутренней режущей кромкой:

a — принцип действия; *б* — вид диска в плане; *в* — режущая кромка диска; *г* — сечение и характерные размеры диска

На края отверстия диска нанесено алмазное покрытие, формирующее режущую кромку диска. Нанесение проводят электролитическим способом из взвеси алмазного порошка в никелевом электролите. Размер алмазных зерен составляет 20...46 мкм.

По периферии диска выполнены базирующие отверстия для закрепления на торце полого цилиндрического корпуса — барабана. Барабан вращается с частотой до 5000 об/мин, скорость подачи слитка к режущей кромке — 30...40 мм/мин при резке кремния.

При закреплении диска его равномерно растягивают для обеспечения жесткости и уменьшения радиальных биений при резке. Возможные варианты схем натяжения диска показаны на рис. 2.24.

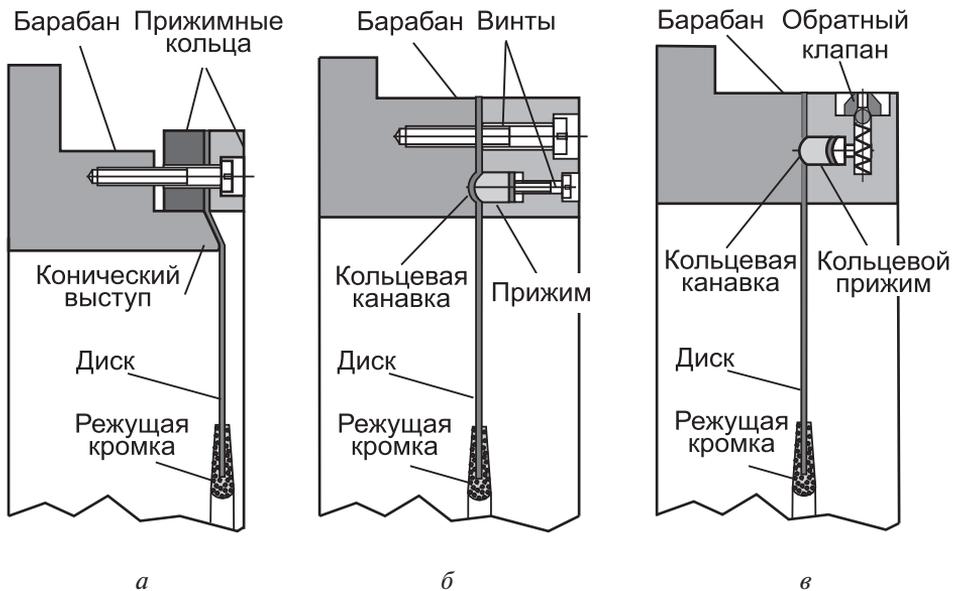


Рис. 2.24. Схемы натяжения диска с внутренней режущей кромкой по коническому кольцевому выступу (*а*), кольцевыми прижимами с натяжением винтами (*б*) и гидравлически (*в*)

Толщина диска составляет 0,1...0,2 мм и является компромиссом между шириной реза и жесткостью диска. Диаметр диска с внутренней режущей кромкой примерно в 4–5 раз превышает диаметр разрезаемого слитка. По этой причине барабаны для закрепления таких дисков имеют большие размеры и массу, что с учетом высокой скорости вращения ограничивает диаметр разрезаемых слитков до 200 мм.

Шпиндель 1 с диском с внутренней режущей кромкой вращается в вертикальной плоскости, слиток 2 подается горизонтально (рис. 2.25).

С повышением скорости резания качество поверхности пластин улучшается и увеличивается точность обработки, что объясняется уменьшением силы

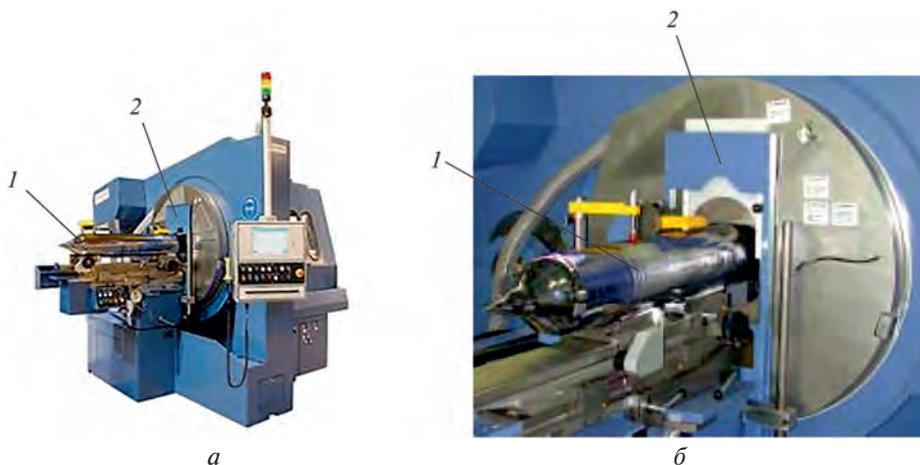


Рис. 2.25. Установка для резки слитков внутренним режущим кругом:
а — компоновка установки; *б* — загрузка слитка для отрезки торцев;
 1 — слиток; 2 — шпиндель

резания и, следовательно, местных деформаций круга и непараллельности плоскостей отрезаемых пластин. Однако при увеличении скорости резания выше 22 м/с, что соответствует скорости вращения шпинделя 5000 об/мин, возникают вибрации станка, повышается температура в зоне резания, что ухудшает качество обработки.

С повышением скорости подачи качество обработки снижается, так как при этом силы резания резко возрастают, в результате чего круг изгибается. Рекомендуются следующие режимы резания: окружная скорость 17...22 м/с, скорость подачи 30...40 мм/мин при резке кремния.

Современные установки позволяют повернуть слиток на требуемый угол для обеспечения резки пластин максимально параллельно заданной кристаллографической плоскости.

Начиная с 1980-х годов для резки слитков на пластины все более широко применяют резку проволокой. При этом используют проволоку из коррозионно-стойкой стали диаметром 110...140 мкм и длиной до 100 км, которая перематывается со скоростью 10...20 м/с с подающей катушки на приемную.

Установки для резки проволокой позволяют обрабатывать одновременно несколько слитков как круглого, так и прямоугольного сечения (рис. 2.26).

Направляющие ролики, на которых нарезано несколько сотен канавок с заданным шагом, формируют проволочное полотно, ширина которого может достигать до 2 м. Сила натяжения проволоки составляет 10...20 Н.

Слитки кремния прижимают к сеточному полотну, в зону контакта кремния со стальной проволокой подают абразивную суспензию. Как правило, это смесь частиц карбида кремния зернистостью 10...15 мкм с маслом.

Шаг сеточного полотна определяет толщину отрезаемой пластины, диаметр проволоки — ширину реза (рис. 2.27).

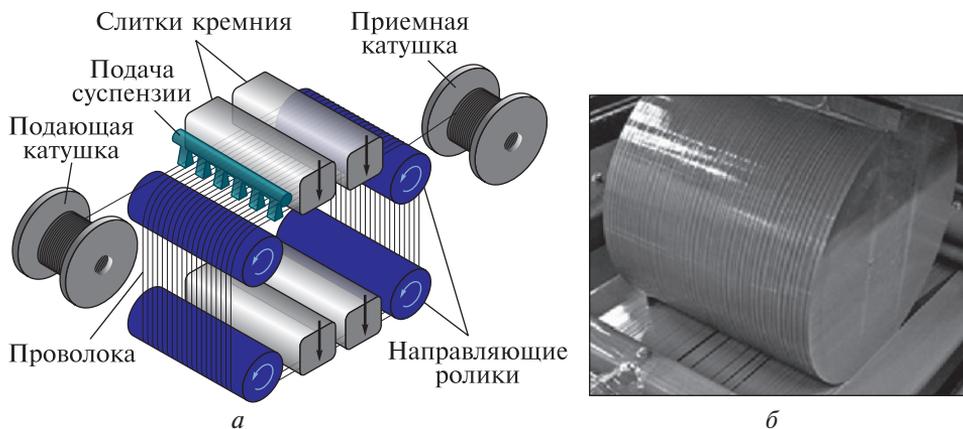


Рис. 2.26. Резка слитков проволокой:
a — схема резки нескольких слитков; *б* — слиток после резки проволокой

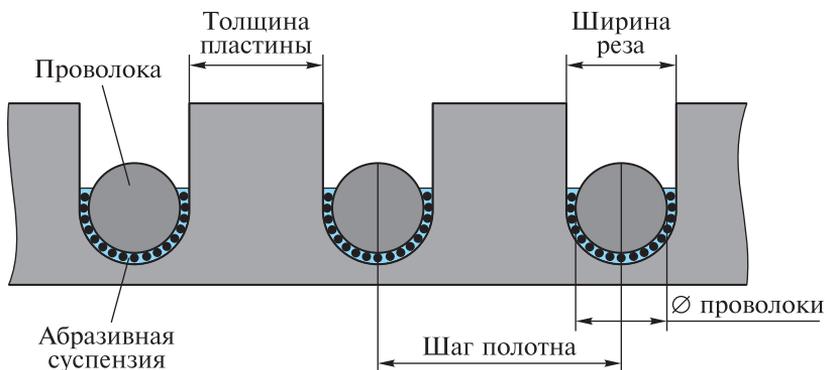


Рис. 2.27. Параметры процесса резания слитка проволокой

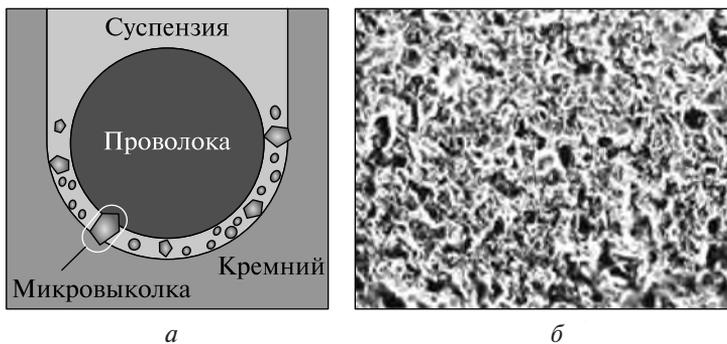


Рис. 2.28. Резка проволокой с абразивной суспензией:
a — зона резания; *б* — поверхность пластины

Абразивные частицы вдавливаются проволокой в зону реза, перекатываются и перемещаются вдоль нее (рис. 2.28, а).

В зоне контакта формируются микротрещины и отделяются микровыколки кремния. Происходит, по сути, локальное вышлифовывание кремния свободным абразивом. Поверхность кремниевой пластины после резки действительно выглядит шлифованной (рис. 2.28, б).

Помимо карбида кремния SiC в качестве абразива может использоваться также алмазный порошок. Оба материала весьма дороги, их стоимость составляет 25...35 % общей стоимости операции резки слитка. Объемное содержание SiC в суспензии от 20 до 60 %. Основная задача суспензии — перемещать частицы абразива в зону резания, а также предотвращать их агломерацию. При этом в процессе протягивания проволоки лишь малая часть суспензии попадает в зону резания.

Данные для сравнения методов резки пластин дисками и проволокой приведены в табл. 2.6. Из таблицы следует, что метод резки проволокой по большинству параметров существенно превосходит метод резки дисками.

Таблица 2.6

Параметр	Метод резки	
	проволокой	дисками
Резка	Свободным абразивом	Связанным абразивом
Глубина нарушенного слоя, мкм	10...15	20...30
Производительность, см ² /ч	1900...13 000	1300...2600
Число пластин за проход	1000	1
Ширина реза, мкм	200...300	300...500
Минимальная толщина отрезаемой пластины, мкм	200	300
Выход пластин толщиной 635 мкм со слитка длиной 1 дюйм (25,4 мм)	30	27
Максимальный диаметр слитка, мм	300 и более	200

Дальнейшее развитие метода резки — применение проволоки с нанесенным на нее абразивом. Основным преимуществом метода является увеличение скорости резания в 3—5 раз и, кроме того, повышение чистоты и экологичности процесса за счет устранения жидкой суспензии.

Диаметр применяемой проволоки — от 180 мкм, размер зерен абразива — от 20 мкм и более. Зерна абразива распределены по диаметру и вдоль проволоки и зафиксированы на ней в слое электролитического никеля (рис. 2.29).

Жесткие требования к стабильности диаметра проволоки с нанесенным абразивным покрытием ограничивают пока широкое применение метода резки в промышленности. Однако уже используют его разновидность на

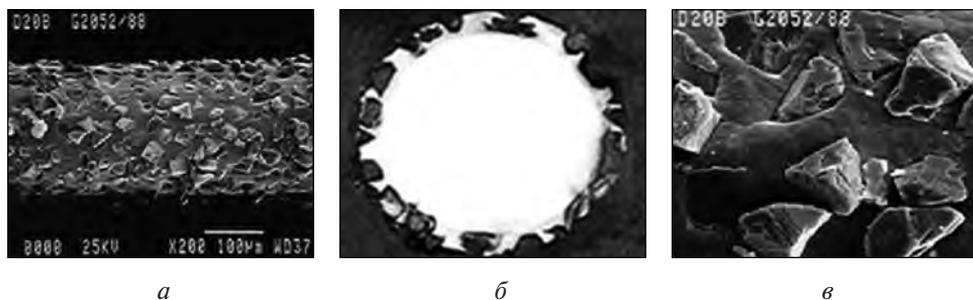


Рис. 2.29. Проволока с нанесенным абразивом:

a — распределение абразива вдоль проволоки; *б* — по контуру сечения; *в* — абразив в связующем материале

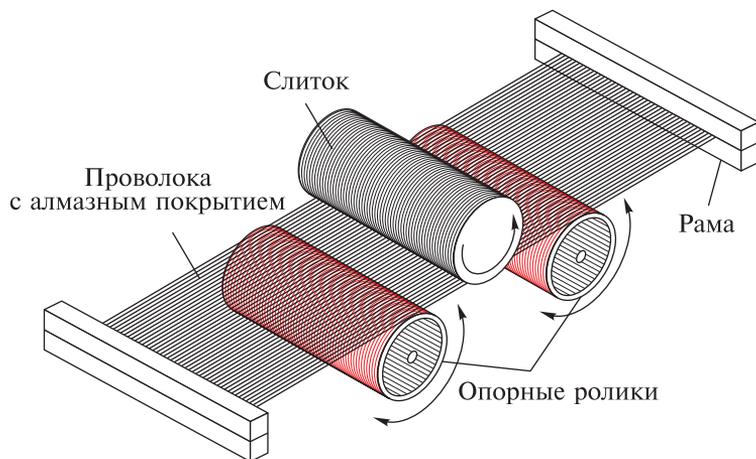


Рис. 2.30. Резка проволочным полотном

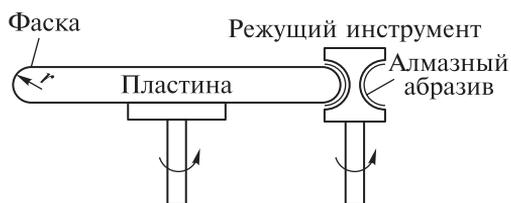


Рис. 2.31. Схема формирования фаски на кремниевой пластине:

r — радиус фаски

основе закрепленного на раме проволочного полотна, совершающего возвратно-поступательное движение (рис. 2.30).

Снятие фасок по периферии кремниевых пластин выполняют с помощью профилированных абразивных инструментов (рис. 2.31).

В реальной производственной практике применяют многосекционные алмазные круги, позволяющие провести как предварительную, так и окончательную шлифовку фаски, а также ее полировку. Многосекционный инструмент (рис. 2.32) последовательно обеспечивает предварительное, получистовое и чистовое шлифование фаски, а также ее полировку.

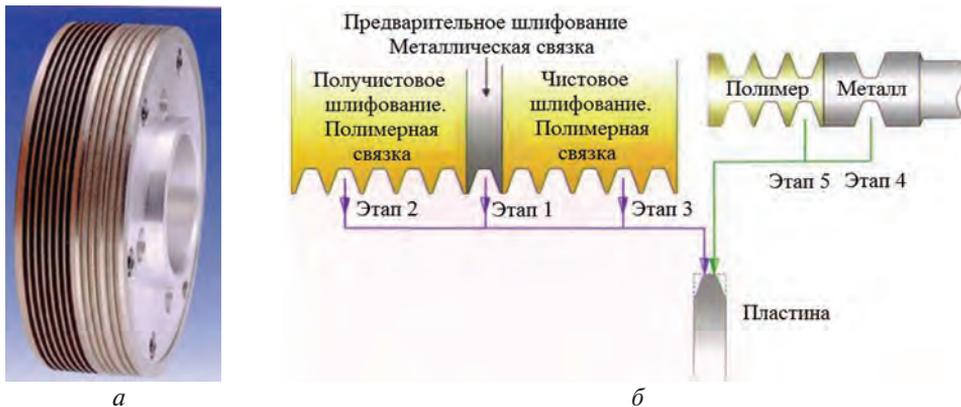


Рис. 2.32. Многосекционный инструмент для обработки фасок кремниевых пластин: *а* — компоновка инструмента; *б* — этапы шлифовки и полировки фаски



Рис. 2.33. Инструмент для шлифовки и полировки базировочного выреза

Аналогичным многосекционным инструментом шлифуют и полируют базировочные вырезы на пластинах большого диаметра (рис. 2.33).

Шлифовка и полировка пластин

Шлифовка пластин является обязательной технологической операцией после резки слитков, поскольку она способствует уменьшению нарушенного слоя, неплоскостности, изгиба пластин и разброса их значений по толщине.

По технологическим признакам шлифовку подразделяют на предварительную и окончательную, по конструктивным признакам — на одностороннюю и двустороннюю, по виду используемого материала — на шлифовку свободным и связанным абразивом.

В современной технологии применяют методы обработки пластин, объединяющие все эти признаки.

Так, предварительная шлифовка для быстрого выравнивания плоскостей пластин — это обычно последовательная односторонняя шлифовка связанным абразивом (*grinding*).

Окончательная шлифовка, одно- или двусторонняя, выполняется с применением свободного абразива (*lapping*).

Завершается процесс полировкой пластин (*polishing*) — это, как правило, односторонняя обработка свободным абразивом.

Шлифовку связанным абразивом выполняют на станках с эксцентрично расположенными осями вращения шлифовального круга и обрабатываемых пластин (рис. 2.34). Главной особенностью этого процесса является

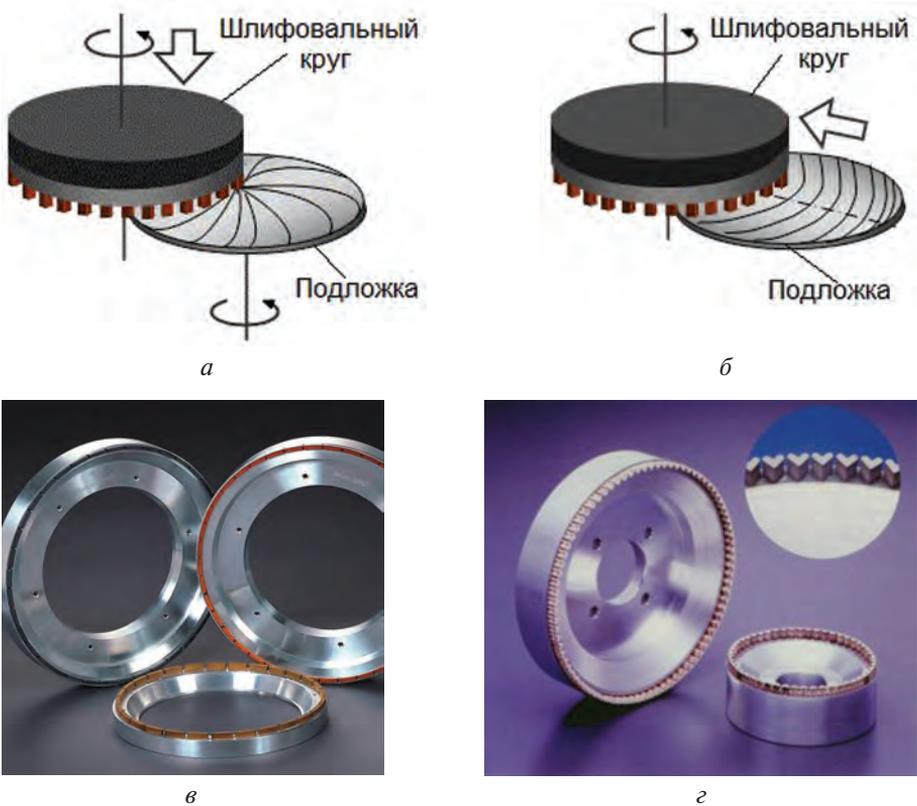


Рис. 2.34. Шлифовка связанным абразивом:
а, б — схемы процесса; в, г — виды шлифовальных кругов

конструкция шлифовального круга, который представляет собой металлический диск с закрепленными на его поверхности абразивными вставками.

Обрабатываемые пластины закрепляют на подложкодержателе, который в процессе шлифовки вращается вокруг своей оси. Шпиндель шлифовального круга, вращаясь с частотой 15 000...18 000 об/мин, приходит в контакт с поверхностью пластин. Алмазные зерна шлифовальника, ударяясь с высокой скоростью о пластины, снимают с поверхности кремния микростружку. Обработанная этим способом пластина имеет специфический рисунок поверхности, который представляет собой сетку из множества рисок. В процессе шлифовки связанным абразивом выделяется много теплоты, поэтому для охлаждения шлифовальника и обрабатываемых пластин в зону обработки подают охлаждающую жидкость.

Шлифовку свободным абразивом выполняют на станках односторонней и двусторонней обработки пластин с использованием абразивных суспензий и паст. В процессе обработки абразивная суспензия создает тонкую прослойку между шлифовальником и обрабатываемой пластиной, в которой абразивные зерна свободно перекатываются, находясь в свободном состоянии.

При двусторонней шлифовке обрабатываемые пластины размещают в гнездах сепараторов между двумя шлифовальными кругами — шлифовальниками (рис. 2.35).

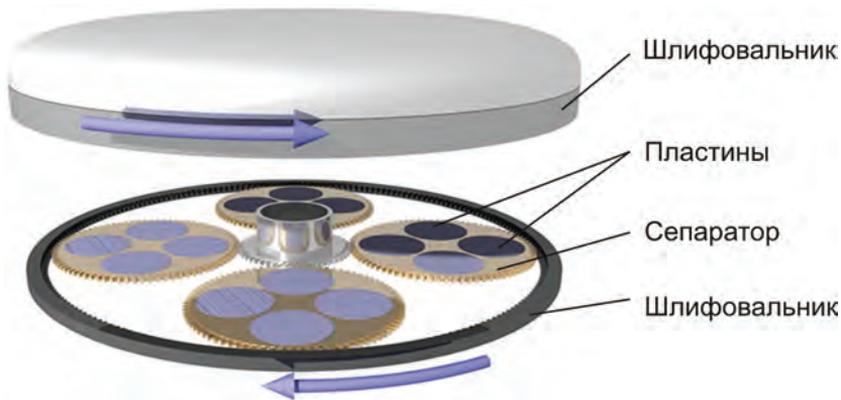


Рис. 2.35. Шлифование свободным абразивом

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.

Абразивную суспензию подают через верхний шлифовальник, она равномерно обволакивает полупроводниковую пластину со всех сторон. При работе станка абразивные зерна перекатываются по верхней и нижней поверхностям пластины, создавая определенное давление, которое приводит к выкалыванию микрочастиц кремния.

Шлифованная поверхность обрабатываемых пластин имеет матовую фактуру и состоит из большого числа кратерообразных микровыколов. Размеры выколов находятся в прямой зависимости от размера зерен абразива, давления на них шлифовальника и скорости шлифовки.

Для предварительной шлифовки выбирают абразивные порошки с размерами зерен 10...14 мкм, для окончательной тонкой шлифовки — 5...7 мкм.

Полировка полупроводниковых пластин

Схема процесса полировки аналогична шлифовке свободным абразивом. Однако при этом используют полировальники в виде жестких дисков, обтянутых мягким материалом: фланелью, замшей, батистом, фетром, велюром, сукном, шелком и др. В качестве абразива применяют микропорошки с размерами зерна не более 3 мкм из синтетического алмаза, оксида алюминия, оксида хрома, диоксида кремния или диоксида циркония.

Предварительно алмазный порошок с размером зерна 3 мкм втирают в приготовленный батистовый полировальник. На полировальник помещают рабочие головки с наклеенными на них пластинами. Частота вращения полировальника не должна превышать 30...40 об/мин для исключения перегрева пластин.

Далее процесс повторяют с новым покрытием полировальника и применением алмазного порошка с размером зерна 1 мкм.

На заключительном этапе тонкой полировки снова меняют полировальник, а в качестве абразивного материала используют, например, оксид хрома с размером зерна менее 1 мкм. Обычно применяют оксид хрома двух сортов: грубый с размером зерна 0,6...0,8 мкм и тонкий с размером зерна 0,2...0,4 мкм.

На последних этапах в качестве абразивного материала часто используют диоксиды кремния или циркония с размером зерна не более 0,1 мкм.

Постепенное уменьшение размеров абразивного материала позволяет уменьшить толщину нарушенного слоя на поверхности пластины и повысить класс ее шероховатости (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Размер абразива, мкм	Толщина нарушенного слоя, мкм	Шероховатость поверхности
14	20...30	1,25
10	15...25	0,32...0,63
2...3	9...11	0,02...0,04
0,5...1	5...7	0,02
0,3...0,5	Менее 3	0,01...0,02
0,1...0,3	Менее 3	0,01

Химико-механическая полировка (*Chemical-mechanical polishing — CMP*) — это процесс окончательной планаризации поверхности пластин и полного удаления нарушенного слоя с использованием как механического воздействия абразива, так и химического воздействия применяемых реактивов. Химикаты реагируют с кремнием, разрыхляют его и способствуют удалению абразивными частицами с минимальной силой.

Схема реализации процесса показана на рис. 2.36.

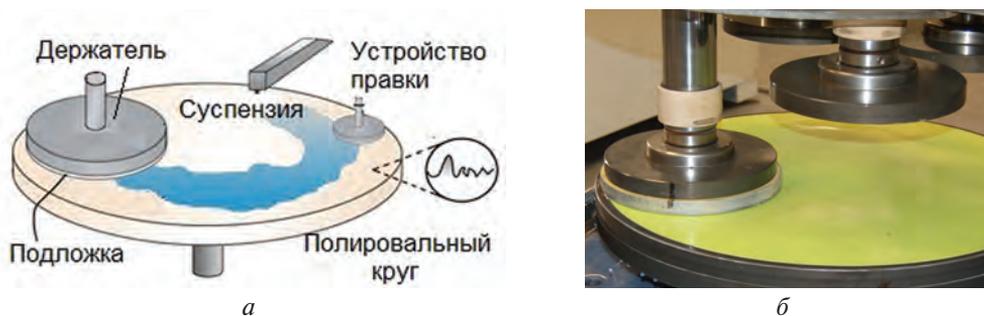


Рис. 2.36. Химико-механическая полировка пластин:
а — схема процесса; б — компоновка блока держателей пластин

Полировальную суспензию (смесь частиц SiO_2 размером около 100 \AA и реактива-окислителя NaOH) подают на вращающийся плоский стол, покрытый полировальным материалом.

Подложку закрепляют в металлическом держателе шпинделя через промежуточную прокладку. Стол и шпиндель вращаются, при этом шпиндель совершает еще и осциллирующие движения. Полировальник выполняют из пористого полимерного материала с размерами пор $30 \dots 50 \text{ мкм}$. Периодически полировальник подвергают правке с помощью правильного круга.

Под действием теплоты от трения пластины о полировальник поверхность пластины окисляется (химический этап процесса), а затем частицы оксида кремния счищают окисленный кремний с поверхности пластины (механический этап).

Процесс проводят в две стадии. На первой стадии используют суспензию высокой концентрации, процесс длится около 30 мин со скоростью удаления кремния 1 мкм/мин . Вторую стадию проводят с очень разбавленной суспензией, более мягким полировальником в течение $5 \dots 10$ мин для удаления слоя материала всего 1 мкм с поверхности пластины.

С учетом активной химической реакции между кремнием и химикатом суспензии немедленно после завершения процесса пластины должны промываться в деионизированной воде. Это поможет предотвратить появление матовых и оксидных пятен.

Скорость и качество химико-механической полировки зависит от многих факторов. В их числе сила прижима пластины к полировальнику, температура в зоне обработки, скорость вращения стола, рН суспензии и ряд

других, которые должны экспериментально подбираться для заданных условий обработки.

Химико-механическая полировка не влияет на плоскостность пластины и предназначена для удаления остатков нарушенного слоя.

Финишная очистка — это окончательная очистка от всех загрязнений. Изготовленные на предыдущих операциях пластины отвечают всем требованиям спецификации и могут использоваться для создания микроструктур. Однако для запуска их в технологический процесс, предусматривающий нанесение фоторезиста, выполнение высокотемпературных операций (оксидирования, диффузии и др.), пластины необходимо подвергнуть финишной очистке.

В случае значительных загрязнений органическими веществами или металлами кремниевую подложку следует многоступенчато очистить кислотой Каро и затем подвергнуть очистке смесями *RCA*.

Кислота Каро названа так в честь получившего ее немецкого химика Генриха Каро (*Caro*), а *RCA*-процесс — по имени фирмы (*Radio Corporation of America*), на которой он был разработан.

Кислота Каро представляет собой смесь 25%-ной перекиси водорода H_2O_2 и 98%-ной серной кислоты H_2SO_4 в соотношении 1:2.

Обработку кислотой Каро проводят при температуре 130 °С в течение 10...15 мин. Эта стадия часто носит название пираньи-травления из-за способности кислоты Каро «прожорливо» удалять органические примеси.

При воздействии серной кислоты органические примеси восстанавливаются до углерода. Углерод взаимодействует с кислородом, образующимся при диссоциации перекиси водорода. В результате выделяется диоксид углерода CO_2 , вязкость раствора в травильном резервуаре увеличивается.

При травлении кислотой Каро кремний окисляется. Возникающий при этом диоксид кремния следует удалить в разбавленном растворе плавиковой кислоты HF (1...5 %) в течение нескольких минут.

Смесь Каро удаляет органические слои, но не удаляет металлы.

По этой причине пластину следует обработать в смеси *RCA-1* при температуре 70...75 °С в течение 10 мин. Смесь *RCA-1* представляет собой раствор, состоящий из 25%-ной перекиси водорода H_2O_2 , 25%-ной смеси гидроокиси аммония NH_4OH и воды H_2O в соотношении 1:1:5. При обработке смесью *RCA-1* вновь нарастает слой оксида кремния толщиной примерно 10–15 Å. Образовавшийся оксид кремния следует удалить разбавленным раствором HF .

Следующая стадия обработки пластины — обработка смесью *RCA-2* при температуре 80 °С в течение 10 мин. Смесь *RCA-2* представляет собой раствор, состоящий из 30%-ной соляной кислоты HCl , 25%-ной смеси H_2O_2 и H_2O в соотношении 1:1:8.

Последняя стадия обработки — удаление появившегося диоксида кремния SiO_2 погружением в разбавленный раствор HF .

Следует отметить, что после каждой стадии очистки необходимо тщательно отмывать пластины деионизованной водой.

2.3. Термическое оксидирование кремния

Технологический анализ изделий микротехнологии показал, что в их производстве используют огромную номенклатуру всевозможных материалов — полупроводников, диэлектриков, проводников. Особое место среди этих материалов занимает диоксид кремния, обладающий уникальным набором свойств, благодаря которым кремний прочно занимает лидирующее положение среди полупроводниковых материалов.

2.3.1. Свойства диоксида кремния

Ввиду высокого сродства к кислороду поверхность кремниевой пластины уже при комнатной температуре покрывается пленкой оксида толщиной 50...100 Å. Это обеспечивает предельно плотную (на молекулярном уровне) и стабильную во времени связь слоя диоксида кремния с исходной поверхностью кремниевой пластины.

Для увеличения толщины слоя оксида необходима термическая стимуляция оксидирования, поэтому технологические слои толщиной 200...1500 нм получают термическим оксидированием кремния.

Диоксид кремния — отличный изолятор; его удельное сопротивление лежит в диапазоне 10^{13} ... 10^{17} Ом·см, а электрическая прочность составляет 10^7 В/см.

Используемый в качестве технологических слоев аморфный SiO_2 очень конформен (рис. 2.37) — легко повторяет рельефную структуру подложки.

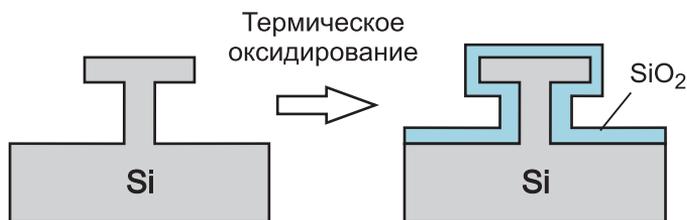


Рис. 2.37. Конформность SiO_2

Слои SiO_2 противостоят большинству химических реактивов, применяемых в обработке кремния, и поэтому могут использоваться в качестве маски для его локальной обработки. В то же время существуют травители, например плавиковая кислота HF , которые селективно травят диоксид SiO_2 , не воздействуя при этом на поверхность кремниевой пластины (рис. 2.38). Аналогичный результат можно получить, применяя плазменное травление.

Диоксид кремния блокирует диффузию основных легирующих элементов (В, Р, Аs), а также нежелательных примесей и поэтому незаменим в качестве маски для локального легирования кремния (рис. 2.39).



Рис. 2.38. Селективность травления Si и SiO₂

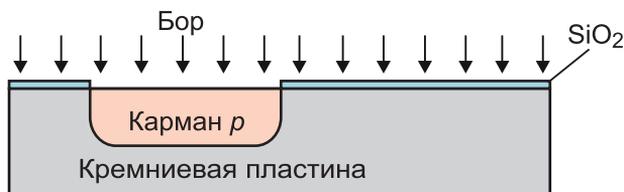


Рис. 2.39. Маска из SiO₂ для локальной микрообработки

Диоксид кремния стабилен при высоких температурах (до 1400 °С), применяемых в технологических процессах изготовления интегральных микросхем.

Физико-химические свойства диоксида кремния обусловили его широкое применение как конструктивного и технологического материала при создании микроструктур. Как следует из материалов модуля 1, основными функциями SiO₂ в микротехнологии являются:

- обеспечение тонкого подзатворного диэлектрика;
- маскирование легирующих примесей, в том числе в виде спейсеров;
- электрическая изоляция активных областей и многослойной металлизации;
- использование в качестве жертвенного (удаляемого) слоя.

Помимо рассмотренных свойств диоксид кремния является также биосовместимым материалом, обладает хорошими теплоизоляционными свойствами, способен модифицировать оптические свойства поверхности кремниевой подложки.

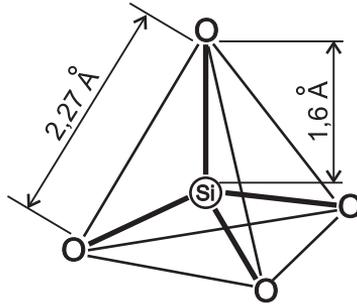
2.3.2. Структура диоксида кремния

Молекула SiO₂ имеет вид четырехгранной ячейки (рис. 2.40, а), в которой атом кремния находится в центре тетраэдра из четырех атомов кислорода, а атомы кислорода — по углам тетраэдра, связывая ячейки между собой.

Возможны две схемы соединения ячеек SiO₂ с образованием соответствующих материалов.

1. Кристаллический кварц — ячейки выстроены в виде кристаллической структуры (рис. 2.40, б).

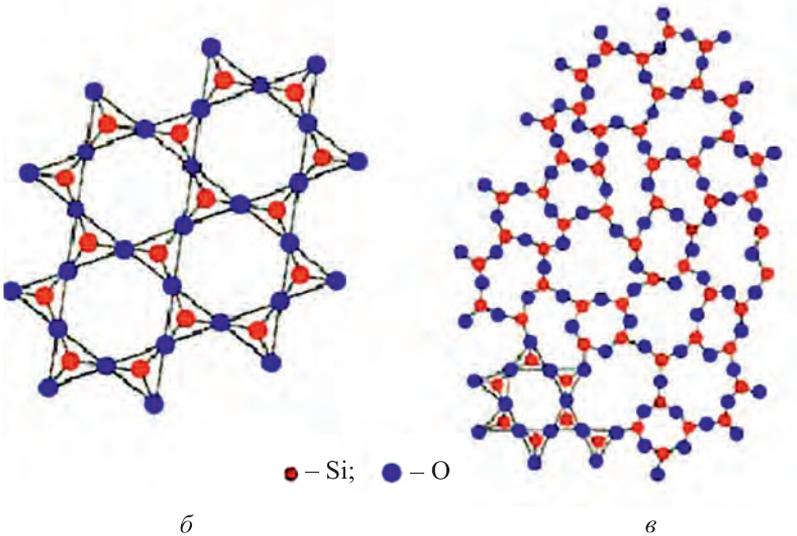
2. Аморфный плавленый кварц (кварцевое стекло) — ячейки соединены бессистемно (рис. 2.40, в).



a

Кристаллический SiO_2
(кварц)

Аморфный SiO_2
(стекло)



б

в

Рис. 2.40. Молекулярная структура диоксида кремния:

a — четырехгранная ячейка SiO_2 ; *б, в* — структура кварца кристаллического и плавленного соответственно

В качестве технологических слоев используют аморфный диоксид кремния SiO_2 , в котором не все кристаллические ячейки соединены атомами кислорода. Поэтому его структура менее упорядочена и плотность ($2,3 \text{ г/см}^3$) меньше, чем у кристаллического кварца ($2,65 \text{ г/см}^3$).

2.3.3. Получение диоксида кремния термическим окислением

Пленки SiO_2 в микротехнологии получают путем окисления кремния различными способами:

- термическое (сухое, влажное);
- анодное;
- пиролитическое;
- плазмохимическое.

Наиболее качественный оксид для основных применений в микротехнологии получают термическим окислением.

Термическое окисление — широко распространенный метод получения слоев SiO_2 нагревом кремниевых пластин в окислительной атмосфере.

Высокая температура (1000...1200 °С) процесса термического окисления характерна и для других операций микротехнологии, например для разгонки примеси при диффузии. Поэтому термическое окисление легко встраивают в общий цикл обработки пластин, совмещают во времени с операциями диффузии и выполняют на том же технологическом оборудовании.

Окисление кремния может проводиться при использовании:

- сухого кислорода, $\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$;
- влажного кислорода (паров воды), $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$.

Схемы проведения процессов окисления показаны на рис. 2.41.

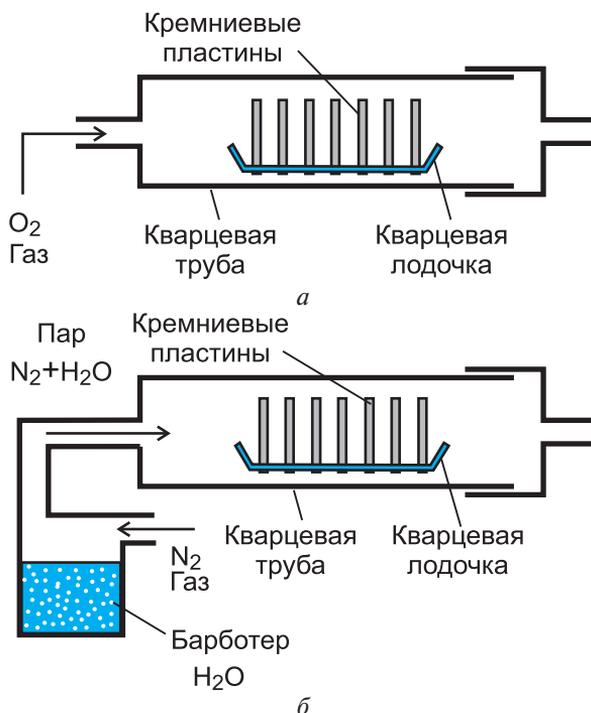


Рис. 2.41. Схемы окисления кремния:

а — в сухом кислороде; б — в парах воды

2.3.4. Стадии оксидирования

При термическом оксидировании кислород взаимодействует с кремнием, диффундируя через слой SiO_2 (рис. 2.42), поскольку коэффициент диффузии O_2 в SiO_2 во много раз больше, чем аналогичный коэффициент диффузии Si в SiO_2 .

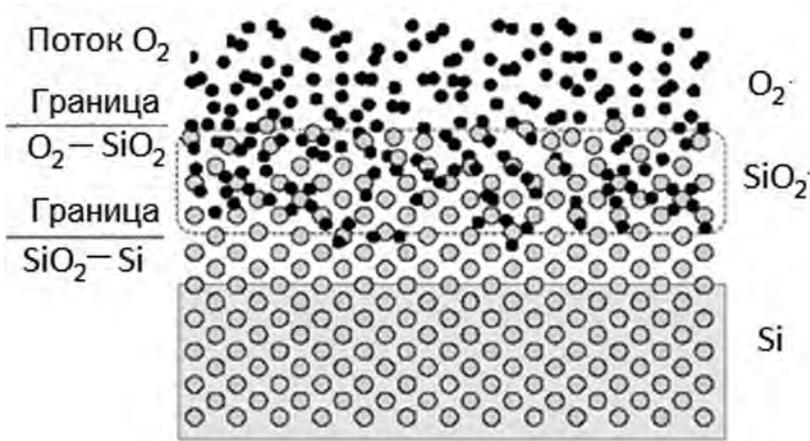


Рис. 2.42. Границы раздела сред при термическом оксидировании

Объемная плотность образующегося диоксида кремния ($2,3 \cdot 10^{22}$ молекул на см^3) примерно в 2 раза меньше, чем у кремния ($5 \cdot 10^{22}$ молекул на см^3).

Из молекул кремния, содержащихся в слое толщиной 1 мкм, образуется слой диоксида толщиной 2,17 мкм. Частично этот слой диоксида внедряется в исходный кремний, а частично нарастает над ним (рис. 2.43), следуя определенному соотношению.

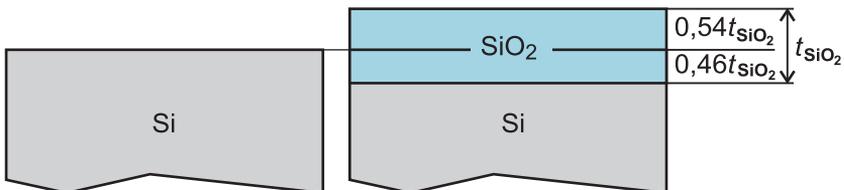


Рис. 2.43. Границы раздела сред при термическом оксидировании:

t_{SiO_2} — толщина слоя SiO_2

Процесс термического оксидирования описывается моделью Дила — Гроува.

2.3.5. Модель роста оксида Дила — Гроува (*Deal — Grove*)

В процессе термического оксидирования выделяют три основных этапа (рис. 2.44).

Этап 1. Молекулы кислорода или паров воды из газовой среды перемещаются к внешней поверхности пластины, на которой в начальной стадии происходит их реакция с кремнием, а затем адсорбция кислорода на формирующемся оксиде.

Этап 2. Молекулы кислорода диффундируют через оксид SiO_2 к кремнию Si.

Этап 3. Химическая реакция кислорода с кремнием происходит на границе SiO_2 –Si.

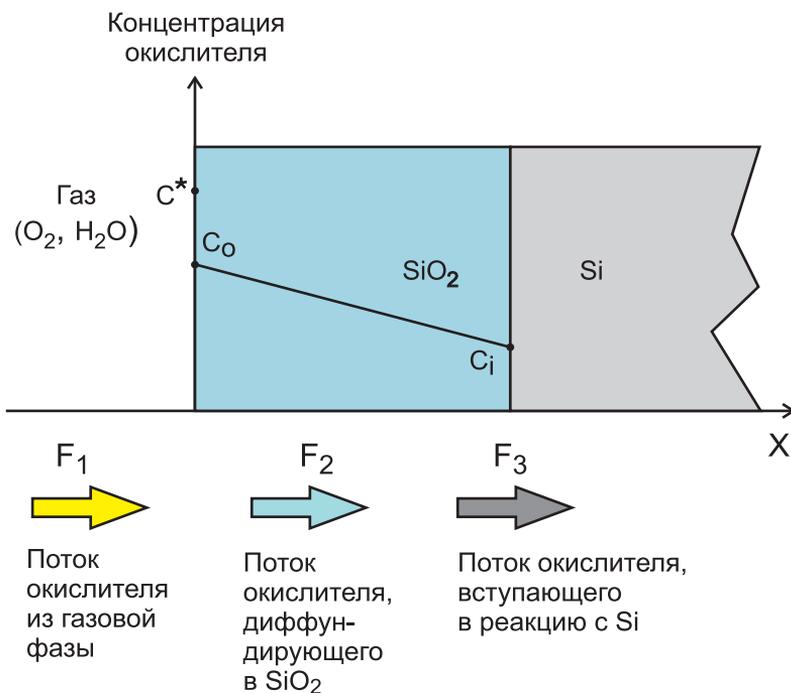


Рис. 2.44. Потоки молекул кислорода при оксидировании кремния

Каждый из этих этапов характеризуется плотностью потока окислителя F , под которой понимают количество молекул, проходящих через единичную поверхность за единицу времени.

Плотность потока окислителя F_1 , характеризующая адсорбцию и растворение молекул окислителя в приповерхностном слое, определяется разностью равновесной концентрации C^* окислителя в газовой фазе, адсорбированного на поверхности пластины, и концентрации C_0 внутри оксида у его внешней поверхности:

$$F_1 = h(C^* - C_0), \quad (2.9)$$

где h — константа скорости растворения молекул окислителя в слое SiO_2 , см/с.

При адсорбции происходит накопление кислорода у границы раздела фаз, при этом зависимость равновесной концентрации адсорбции от парциального давления P_G адсорбата в объемной фазе описывается *законом Генри*:

$$C^* = HP_G, \quad (2.10)$$

где H — постоянная Генри, мера интенсивности адсорбции; P_G — давление газа.

Плотность потока молекул окислителя F_2 через растущий слой оксида кремния описывается *законом Фика* для диффузии в твердом теле:

$$F_2 = D \frac{C_0 - C_i}{X_{ox}}, \quad (2.11)$$

где D — коэффициент диффузии кислорода в оксидный слой, см/с²; C_i — концентрации окислителя в оксиде у границы раздела SiO_2 – Si ; X_{ox} — толщина слоя оксида (индекс *ox* от англ. *oxide*).

Следует отметить, что $C_0 \neq C^*$, поскольку не все молекулы кислорода, адсорбированные поверхностью оксида, проникнут внутрь оксида через его поверхность.

Плотность потока окислителя F_3 определяется химической реакцией на границе раздела SiO_2 – Si и пропорциональна концентрации реагента:

$$F_3 = kC_i, \quad (2.12)$$

где k — константа скорости химической реакции.

В равновесном состоянии все три потока окислителя равны между собой:

$$F_1 = F_2 = F_3 = F.$$

Объединив (2.9) — (2.12), получим

$$h(C^* - C_0) = D \frac{C_0 - C_i}{X_{ox}} = kC_i. \quad (2.13)$$

В (2.13) реально измеряемой и контролируемой величиной является концентрация молекул окислителя в газовой фазе C^* . С учетом этого преобразуем выражение (2.13):

$$C_i = \frac{HP_G}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kX_{ox}}{D}}. \quad (2.14)$$

Учтем, что за время dt толщина слоя оксида кремния увеличивается на dX_{ox} , а его объем при этом увеличится на $dV = SdX_{ox}$, где S — площадь поверхности пластины.

Для такого увеличения толщины оксида потребуется N молекул окислителя, причем

$$N = N_1 dV = N_1 S dX_{ox},$$

где N_1 — количество атомов окислителя в единичном объеме SiO_2 (для влажного оксидирования это количество в 2 раза больше).

Из определения плотности потока следует, что это же количество молекул окислителя $N = F_3 S dt$. Тогда с учетом (2.12) и (2.14) получим

$$N_1 dX_{ox} = \frac{dt \cdot kHP_G}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kX_{ox}}{D}} = \frac{dt \cdot HP_G}{\frac{1}{k} + \frac{1}{h} + \frac{X_{ox}}{D}}. \quad (2.15)$$

Для сухого кислорода $N_1 = 2,3 \cdot 10^{22}$ молекул на см^3 и для паров воды $N_1 = 4,6 \cdot 10^{22}$ молекул на см^3 .

Для решения дифференциального уравнения (2.15) проведем в нем разделение переменных и проинтегрируем. Учтем, что при $t = 0$ на поверхности кремния уже существовал слой SiO_2 толщиной X_i .

Имеем

$$\int_{X_i}^{X_{ox}} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{h} + \frac{X_{ox}}{D} \right) dX_{ox} = \int_0^t \frac{HP_G}{N_1} dt; \quad (2.16)$$

$$\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right) X_{ox} - \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right) X_i + \frac{X_{ox}^2}{2D} - \frac{X_i^2}{2D} = \frac{HP_G}{N_1} t. \quad (2.17)$$

Умножим левую и правую части выражения (2.17) на $2D$ и обозначим параметры модели:

$$A = 2D \left[\frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right]; \quad B = 2 \frac{DHP_G}{N_1}. \quad (2.18)$$

В результате (2.17) преобразуется к виду

$$X_{ox}^2 + AX_{ox} = Bt + (X_i^2 + AX_i),$$

где t — время оксидирования.

Из этого уравнения получаем квадратное уравнение относительно толщины оксидного слоя:

$$X_{ox}^2 + AX_{ox} = B(t + \tau), \quad (2.19)$$

где $\tau = \frac{X_i^2 + AX_i}{B}$.

Решение уравнения (2.19) дает следующую зависимость толщины оксида от времени:

$$X_{ox} = \frac{A}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4B(t + \tau)}{A^2}} - 1 \right) = \frac{A}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{(t + \tau)}{A^2 / 4B}} - 1 \right). \quad (2.20)$$

Анализ выражения (2.20) показывает, что при малом времени оксидирования t , т. е. при выполнении условия

$$\frac{4B(t + \tau)}{A^2} \ll 1 \quad \text{или} \quad t + \tau \ll \frac{A^2}{4B}, \quad (2.21)$$

выражение (2.20) принимает вид

$$X_{ox} \approx \frac{A}{2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{4B(t + \tau)}{A^2} - 1 \right) = \frac{B}{A} (t + \tau). \quad (2.22)$$

При больших значениях времени оксидирования t , т. е. при выполнении условия

$$\frac{4B(t + \tau)}{A^2} \gg 1 \quad \text{или} \quad t + \tau \gg \frac{A^2}{4B}, \quad (2.23)$$

выражение (2.22) преобразуется к виду

$$X_{ox} = \frac{A}{2} \left(\sqrt{\frac{4B(t + \tau)}{A^2}} \right) = \sqrt{B(t + \tau)}. \quad (2.24)$$

Графическая интерпретация полученных результатов (рис. 2.45) показывает, что на начальной стадии оксидирования толщина оксидной пленки линейно зависит от времени, а при длительном оксидировании эта зависимость становится параболической.

На рис. 2.46 представлены зависимости толщины слоя SiO_2 от времени оксидирования в сухом кислороде и парах воды при разных температурах. Видно, что повышение температуры значительно увеличивает скорость роста оксидного слоя.

Повышение скорости роста слоя SiO_2 с температурой объясняется увеличением коэффициента диффузии молекул окислителя в слое оксида

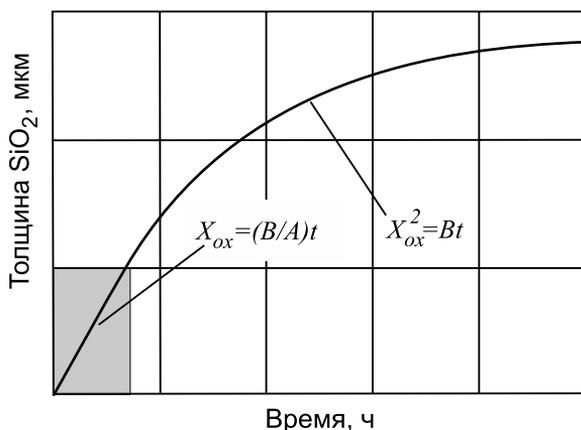


Рис. 2.45. Линейный и параболический участки скорости оксидирования кремния

и увеличением константы скорости химической реакции на границе раздела SiO₂ — Si.

Представленные на рис. 2.46 зависимости качественно описывают реальный процесс термического оксидирования кремния.

Что касается конкретных значений скорости роста слоя SiO₂, то, например, при сухом оксидировании и температуре порядка 1300 °С для получения слоя толщиной 1 мкм требуется примерно 15 ч.

Если термическое оксидирование проводить в атмосфере водяного пара, то аналогичный слой при той же температуре можно нарастить примерно за 1 ч.

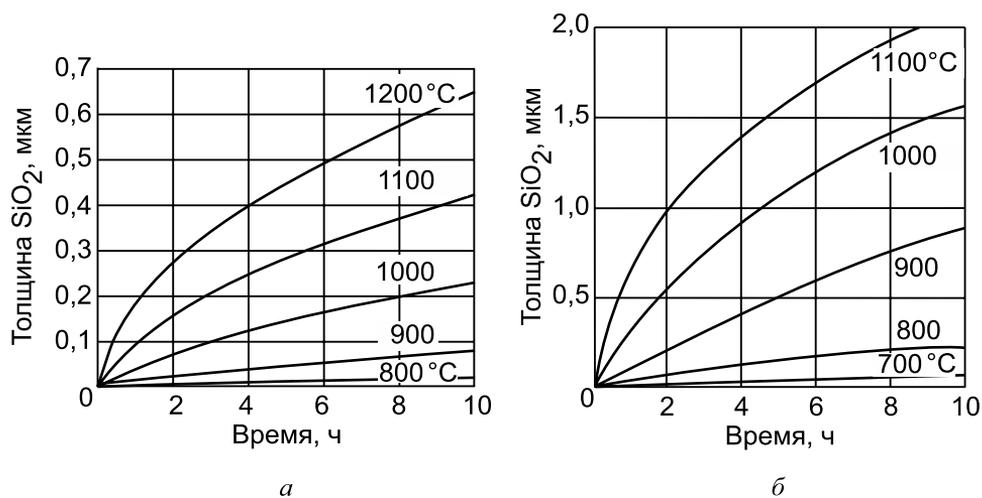


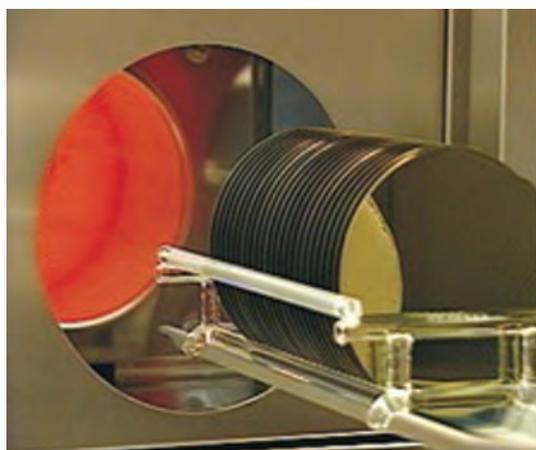
Рис. 2.46. Зависимости толщины слоя SiO₂ от времени оксидирования в сухом кислороде (а) и парах воды (б) при разных температурах

Качество слоев, полученных тем и другим способом, будет разным. При влажном оксидировании созданные слои SiO_2 обладают худшими электрическими и защитными свойствами, чем слои, сформированные сухим оксидированием.

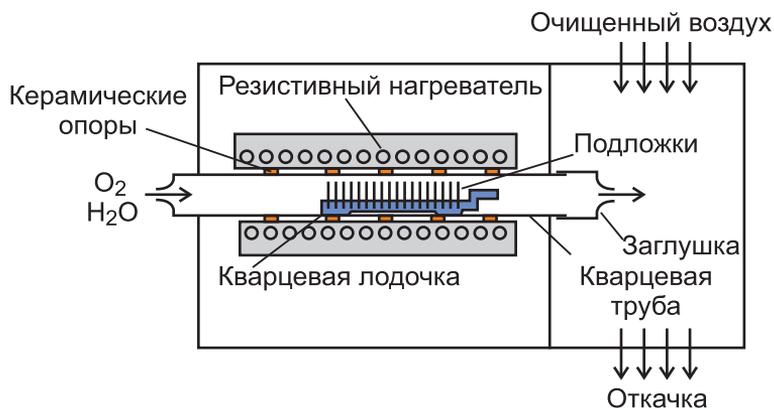
Обычно эти два способа комбинируют, тем самым удается получать слои SiO_2 приемлемого качества с достаточно высокой скоростью.

2.3.6. Промышленная реализация термического оксидирования

Основным промышленным методом проведения термического оксидирования является метод открытой трубы. В соответствии с этим методом кварцевую лодочку с подложками (рис. 2.47, *а*) загружают в кварцевую трубу



а



б

Рис. 2.47. Оксидирование в горизонтальных реакционных трубах: *а* — кварцевая лодочка с подложками; *б* — схема горизонтального реактора



Рис. 2.48. Установки с 3- и 4-трубными системами

(реактор), рабочая зона которой размещена внутри высокотемпературной печи (рис. 2.47, б).

В трубу подается поток влажного или сухого кислорода, который удаляется с ее обратной стороны.

Загрузку и выгрузку лодочек с подложками проводят в камерах с ламинарным потоком воздуха. После прогрева пластин и лодочек в течение 20...30 мин через кварцевую трубу пропускают поток окислителя (кислорода или паров воды). По истечении заданного времени прекращают подачу окислителя и производят разгрузку реакционной трубы.

Длина рабочей зоны каждой трубы составляет 450...600 мм, причем на этой длине неравномерность температуры не должна превышать $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Для повышения производительности установки выполняют в виде 3- или 4-трубных систем, оснащенных автоматизированными системами управления процессом (рис. 2.48).

В последние годы при оксидировании пластин диаметром 200...300 мм все более широко применяют установки оксидирования кремния с вертикальными реакторами (рис. 2.49).

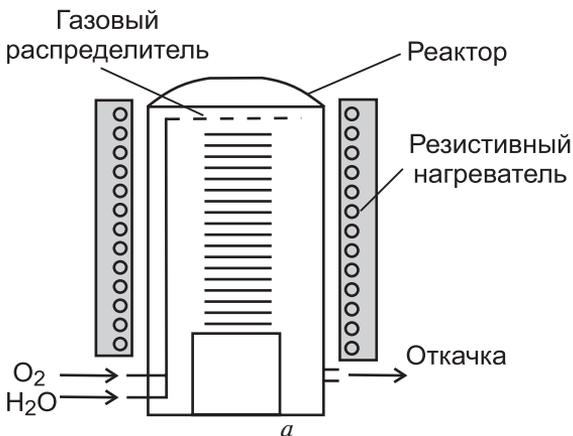


Рис. 2.49. Установка оксидирования кремния с вертикальным реактором:

а — схема; *б* — общий вид

Такие установки обеспечивают большую скорость нагрева до заданной температуры, меньшее время для загрузки партии подложек и возможность автоматизации этой операции.

При вертикальном расположении реактора достигается более высокая равномерность распределения температуры по площади подложек и, соответственно, более равномерная их обработка. Микрочастицы в потоке газа-окислителя в меньшей степени приносят дефектность в формируемые слои, так как практически все оседают на самой верхней подложке.

Очевидные преимущества установок с вертикальными реакторами обусловили все более широкое их применение в крупносерийном производстве изделий микротехнологии.

Заключение

Технические характеристики кремниевых пластин для производства изделий микротехнологии представляют собой беспрецедентный комплекс требований к технологическим заготовкам. Помимо требований к наличию монокристаллической структуры и отсутствию дефектов на рабочей поверхности пластин они должны удовлетворять комплексу весьма жестких технических параметров. К их числу относятся основные параметры, характеризующие качество пластин: электрические (удельное сопротивление и его градиент по рабочему полю), геометрические (диаметр, толщина, базовые и дополнительные срезы, базирующие вырезы, периферийные фаски). К техническим также относятся параметры, описывающие неплоскостность пластин — прогиб, коробление, общее изменение толщины, полное измеренное значение. Необходимо также обеспечить требуемую конфигурацию периферийной фаски пластин, предусмотреть их маркировку.

К числу основных этапов получения монокристаллического кремния относятся получение технического (металлургического) кремния, его преобразование в трихлорсилан и тонкая химическая очистка, последующее восстановление до состояния поликристаллического кремния, выращивание монокристаллов кремния методами Чохральского и бестигельной зонной плавки. Для обоих методов важно оценивать распределения примесей в слитках с помощью математических моделей.

Основные этапы механической обработки слитков включают отрезку хвостовиков, калибровку (круглую шлифовку) слитков, формирование базовых срезов. Особенностью последующей механической обработки кремниевых пластин является применение свободных и связанных алмазных абразивов на операциях резки слитков на пластины, снятия фасок, шлифовки и полировки пластин, химико-механической полировки рабочей стороны, финишной очистки.

Значимость оксидирования кремния в микротехнологии основана на комплексе замечательных свойств диоксида кремния SiO_2 , позволяющего использовать его в качестве тонкого подзатворного диэлектрика, для маскирования легирующих примесей (в том числе в виде спейсеров), для электрической изоляции активных областей и многослойной металлизации, а также в качестве жертвенного (удаляемого) слоя.

Анализ эффективности наиболее распространенного метода термического оксидирования следует проводить на основе рассмотрения схем реализации процесса, стадий оксидирования. Базой для анализа процесса и управления процессом является физико-химическая модель Дила — Гроува, которая включает зависимости, описывающие реальный процесс термического оксидирования кремния.

Задания для самостоятельной работы и самоконтроля

1. Для заданных габаритов кристалла и подложки рассчитать количество кристаллов, которые помещаются на ней полностью.

2. По наличию и расположению базовых срезов на кремниевых пластинах провести идентификацию ее кристаллографической ориентации и типа проводимости.

3. Установлено, что различные кристаллографические плоскости монокристаллического кремния обладают резко выраженной анизотропией свойств при травлении некоторыми жидкостными травителями. Например, скорость травления в щелочи КОН плоскостей (100), (010), (001) в 400 раз превышает скорость травления плоскостей (111). Поэтому при травлении монокристаллического кремния удаляют прежде всего плоскости, обладающие высокой скоростью травления, а оставляют те, которые практически не травятся в КОН, т. е. (111).

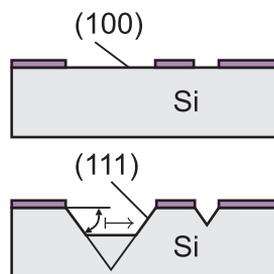


Рисунок к заданию 3

Это позволяет при формировании микроструктур из кремния обеспечивать очень точные размеры элементов. Однако при этом грани формирующихся профилей будут расположены под некоторым углом α к исходной поверхности (см. рисунок к заданию 3). Рассчитайте угол α .

4. Требуется получить монокристаллические слитки:

- а) диаметром 150 мм максимально высокой чистоты;
- б) диаметром 100 мм, легированные бором;
- в) диаметром 300 мм, легированные фосфором.

Выбрать метод получения монокристаллических слитков: по Чохральскому или зонной плавкой. Обосновать выбор.

5. Монокристаллический слиток при выращивании методом Чохральского легируется бором. В пластине, отрезанной от верхней части слитка, концентрация бора составила $3 \cdot 10^{15}$ 1/см³. Какая концентрация бора будет у пластин, отрезанных от части слитка, расположенной на расстоянии 90 % его длины от затравки?

6. При термическом оксидировании часть слоя SiO₂ врастает в исходную поверхность кремниевой пластины, а часть — нарастает над ней,

следуя определенному соотношению. Получить аналитически это соотношение.

7. Кремниевая пластина покрыта оксидом кремния толщиной 0,3 мкм. Какое время необходимо для увеличения этой толщины до 0,5 мкм:

а) во влажном кислороде (температура 1200 °С, $A = 0,05$ мкм и $B = 0,72$ мкм²/ч);

б) в сухом кислороде (температура 1200 °С, $A = 0,04$ мкм и $B = 0,045$ мкм²/ч)?

Ресурсы сети Интернет к модулю 2

1. Polycrystalline silicon. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline_silicon
2. Metallurgical silicon production. URL: <http://englishrussia.com/2011/01/22/metallurgical-silicon-production/>
3. Wafer (electronics). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wafer_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Wafer_(electronics))
4. Silicon Wafer Manufacturing Tour. URL: http://www.afestlouis.org/March_Meeting.htm
5. From quartz rock to electronic circuits. URL: http://www.hscpoly.com/content/hsc_prod/manufacturing_overview.aspx
6. How many silicon chips are there on a 300 mm wafer?
URL: http://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1282825
7. Physics of Thermal Oxidation. URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/hollauer/node10.html>
8. Properties of SiO₂, Structure of SiO₂. URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/hollauer/node11.html#SECTION00611000000000000000>
9. Principles of the Oxidation Process. URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/hollauer/node12.html>
10. Si Oxides. URL: http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/backbone/r6_2_1.html#_dum_21
11. Comparison Vertical vs. Horizontal Furnaces. URL: <https://www.crystec.com/kllcompe.htm>

Содержание

Предисловие	3
Введение	6
Модуль 1	
Технологический анализ изделий микротехнологии	12
1.1. Интегральные микросхемы как объект производства.	13
1.1.1. Структура и принцип действия КМОП-микросхем.	13
1.1.2. Технология КМОП-микросхем	18
1.2. Особенности производства микроэлектромеханических систем	37
1.2.1. Принцип действия и структура микродатчика давления.	38
1.2.2. Технические характеристики микродатчика давления	40
1.2.3. Технология изготовления чувствительного элемента	41
1.2.4. Монтаж кремниевого чувствительного элемента на стеклянное основание	47
Заключение	48
Задания для самостоятельной работы и самоконтроля	49
Ресурсы сети Интернет к модулю 1	52
Приложения к модулю 1	53
Приложение 1. Параметры металлических межсоединений	53
Приложение 2. Особенности формирования медных межсоединений	55
Приложение 3. Диэлектрические свойства материалов микротехнологии	58
Приложение 4. Тензо- и пьезоэффект в кремнии	61
Модуль 2	
Изготовление монокристаллических кремниевых пластин	64
2.1. Кремниевые пластины как объект производства.	65
2.1.1. Электрические параметры	67
2.1.2. Геометрические параметры	68
2.2. Получение монокристаллического кремния	77
2.2.1. Этапы производства кремния.	78

2.2.2. Выращивание монокристаллов	82
2.2.3. Обработка кремниевых слитков и пластин	88
2.3. Термическое оксидирование кремния	105
2.3.1. Свойства диоксида кремния	105
2.3.2. Структура диоксида кремния	106
2.3.3. Получение диоксида кремния термическим оксидированием	108
2.3.4. Стадии оксидирования	109
2.3.5. Модель роста оксида Дила — Гроува (Deal — Grove).	110
2.3.6. Промышленная реализация термического оксидирования	115
Заключение	118
Задания для самостоятельной работы и самоконтроля	119
Ресурсы сети Интернет к модулю 2	121