ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

Е.П. Новокрещенова

ВВЕДЕНИЕ
В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2012

УДК 621.382

Новокрещенова Е.П. Введение в микроэлектронику: учеб. пособие / Е.П. Новокрещенова. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. 106 с.

В учебном пособии рассмотрены основные термины и определения микроэлектроники, дана классификация интегральных микросхем, приведены типы структур интегральных схем и рассмотрены вопросы технологии их изготовления.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»), дисциплине «Введение в микроэлектронику».

Учебное пособие подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD XP и содержится в файле «Микроэлектроника. Введение».

Табл. 2. Ил. 54. Библиогр.: 7 назв.

Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов);
канд. физ.-мат. наук, доц. Е.П. Николаева

© Новокрещенова Е.П., 2012
© Оформление. ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012

ВВЕДЕНИЕ

По точности технологии, по чистоте производства**,** по количеству выпускаемых промышленностью приборов и областей их применения нет такого, который мог бы приблизиться к транзистору. На основе транзисторов созданы интегральные схемы – одни из самых совершенных продуктов нашего времени.

Возникшая в середине прошлого столетия полупроводниковая электроника стала самым крупным достижением второй половины двадцатого века. К концу столетия полупроводниковая электроника трансформировалась в микроэлектронику. Основные изделия микроэлектроники - интегральные схемы, микропроцессоры, запоминающие устройства стали основой информационной техники, бытовой электроники, медицины, автомобилестроения, авиации, космической техники и др. Перечень отраслей не имеет конца, потому что логика развития любой отрасли науки и техники в настоящее время немыслима без использования микрочипов.

Дисциплина «Введение в микроэлектронику» дает возможность первокурсникам познакомиться с будущей специальностью. В первой главе учебного пособия дан исторический обзор развития электроники и сформулированы основные понятия микроэлектроники. Вторая глава содержит необходимые для понимания дисциплины сведения о полупроводниках. Для студентов, хорошо подготовленных по физике в рамках школьного курса, эта глава может быть использована как справочная, для остальных студентов с этой главы следует начать изучение дисциплины.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

1.1. Исторический обзор

Электроника – раздел науки и техники, в котором исследуются электронные явления в веществе; на основе результатов этих исследований разрабатываются методы создания электронных приборов, электронных схем и систем.

Электронные схемы и системы лежат в основе инструментальной базы автоматики, информатики, вычислительной техники, телемеханики и др.

Электроника прошла три этапа развития:

- ламповая,
- полупроводниковая,
- интегральная полупроводниковая электроника (микроэлектроника).

Наноэлектроника – это современный четвертый этап развития электроники.

В основе первого этапа развития электроники лежит эффект эмиссии электронов из нагретого катода и управление потоком этих электронов в вакууме с помощью электрического поля. На основе этого эффекта был создан активный схемный элемент – радиолампа, позволяющая выпрямлять и усиливать электрический сигнал, также генерировать электромагнитные колебания.

Двухэлектродная лампа, содержащая катод и анод, служит выпрямителем переменного тока.

В трехэлектродной лампе (триоде) есть еще один электрод - сетка, подавая напряжение на который можно управлять анодным током. Поэтому диод и триод называют *активными* схемными элементами. Резисторы (электрические со-

противления), конденсаторы (электроемкости) и катушки индуктивности относят к *пассивным* элементам.

Электронные схемы первого поколения состояли из дискретных активных и пассивных элементов. Ламповая электроника использовалась для создания не очень сложных электронных схем. В середине прошлого века перед электроникой встали проблемы:

- повысить надежность электронных схем;
-снизить их габариты, вес и энергопотребление;
-уменьшить себестоимость производства;
- увеличить быстродействие.

Ламповая электроника не могла решить эти проблемы.

Дискретные элементы изготовлялись из различных материалов по несовместимым технологиям. Снизить их себестоимость и увеличить производительность было невозможно.

Электронные схемы получались путем соединения дискретных элементов, например, пайкой. Межсоединения были самой ненадежной частью схем, их невозможно было полностью автоматизировать. В сложных схемах было так много межсоединений , что в электронике возникла ситуация, названная «тиранией межсоединений». Первая ламповая ЭВМ (1948 г.) содержала 20 000 радиоламп и еще большее число межсоединений, беспрерывно работать она могла только несколько часов.

Современные интегральные микросхемы (ИМС) содержат до миллиарда элементов и обеспечивают бесперебойную работу на протяжении десятков лет.

Уменьшить габариты, вес и энергопотребление радиоламп практически невозможно. Первая ламповая ЭВМ имела площадь 200 $м^2$ и потребляла 200 кВт электроэнергии. Этот недостаток не позволял создание мобильной электронной аппаратуры, необходимой для военной и космической техники.

К пятидесятым годам прошлого века ламповая электроника полностью исчерпала свои возможности. Возникла иная

электроника, основанная на особых свойствах полупроводниковых структур, представляющих границу раздела между областями полупроводника с различными свойствами.

Если граница разделяет слои полупроводника с электронным и дырочным типами проводимости, то она называется p-n переходом и так же, как и диод, обладает односторонней проводимостью.

Граница раздела слоев различного состава называется гетеропереходом. Кроме того используются структуры, включающие слои металла, диэлектрика и полупроводника, которые называются МДП или МОП-структурами. В МОП-структуре диэлектриком служит окисел полупроводника, например, двуокись кремния SiO_2.

Эру *полупроводниковой электроники* открыло в 1947 г. изобретение американских физиков Дж. Бардина и У. Браттейна точечного транзистора (триода). Прибор имел два точечных контакта, образованных между поверхностью германия и тонкими золотыми проволочками. У. Шокли проанализировал полученные результаты и предложил конструкцию сплавного транзистора, которая была реализована в следующем году.

Термин «биполярный транзистор» связан с тем, что в нем используются носители заряда двух видов: электроны и дырки. Слово «транзистор» (от англ. transfer resistor) означает, что этот прибор согласует низкоомную цепь эмиттера с высокоомной цепью коллектора. В 1956 г. Шокли, Бардин и Браттейн получили Нобелевскую премию по физике за создание биполярного транзистора.

Ламповые диод и триод были заменены кристаллическими диодом и транзистором. Возникла электроника, основанная на использовании дискретных полупроводниковых приборов. Надежность электронных схем значительно увеличилась, уменьшились их габариты, вес и энергопотребление,

но «тирания межсоединений» сохранилась. Себестоимость изделий электроники осталась высокой.

Электроника, основанная на дискретных полупроводниковых приборов, существовала недолго, после 1960 г. ее сменила интегральная полупроводниковая электроника (*микроэлектроника*). Начался третий этап развития электроники. Основными элементами электронных систем стали интегральные микросхемы (ИМС).

ИМС – это микроминиатюрный функциональный узел электронной аппаратуры, в котором активные, пассивные и соединительные элементы изготавливаются в едином технологическом цикле на поверхности и в объеме материала и имеют общую оболочку.

Изготовление всех элементов ИМС в едином технологическом цикле и в одном материале позволяет использовать вместо последовательной технологии (индивидуальной для каждого элемента) параллельную (интегральную) технологию. Себестоимость производства сложных электронных схем в расчете на один схемный элемент резко уменьшилась.

Возможность перехода на интегральную технологию связана с тем, что полупроводниковая структура обладает практически всеми необходимыми схемными свойствами: отдельный p-n переход может использоваться как резистор, конденсатор, диод, переключатель сигнала, стабилизатор напряжения, фоточувствительный элемент, светодиод, полупроводниковый лазер, а в сочетании с другими p-n переходами и как транзистор, тиристор и т.п. Следовательно, формируя в полупроводниковом кристалле в одном технологическом цикле множество p-n переходов, можно создать сложную ИМС.

Развитие твердотельной интегральной электроники шло по пути уменьшения габаритов, увеличения быстродействия, объема памяти и надежности схем. На этом пути были разработаны методы миниатюризации элементов ИМС, открывшие возможности перехода к наноэлектронике.

Возникновение и развитие полупроводниковой микро- и наноэлектроники стало возможным благодаря развитию современной квантовой теории твердого тела. Чтобы разобраться в принципе действия полупроводниковых приборов, ИМС и наноэлектронных устройств, необходимо изучить основы квантовой механики.

Отметим хронологию наиболее важных открытий и изобретений в области полупроводниковых приборов и ИМС.

1947 г. – создание точечного транзистора.

1950 г. – получение монокристаллического германия.

1951 г. – промышленный выпуск биполярных транзисторов. Изобретение полевого транзистора с управляющим p-n переходом.

1952 г. – получение монокристаллического кремния.

1955 г. – промышленный выпуск кремниевых биполярных транзисторов.

1956 г. – изобретение диффузионного транзистора.

1958 г. – изобретение планарного транзистора.

1959 г. - промышленный выпуск интегральных схем (ИС).

1960 г. – создание эпитаксиальных транзисторов, МДП-транзисторов, диодов Шоттки. Выпуск ИС малой степени интеграции (число элементов на одном кристалле не более 100).

1962 г. - разработка цифровых ИС по технологии МОП.

1966 г. – выпуск ИС средней степени интеграции (с числом элементов на кристалле до 1000).

1969 г. – выпуск ИС большой степени интеграции (с числом элементов до 10 000 на кристалле) или больших ИС (БИС). Изобретение приборов с зарядовой связью (ПЗС).

1971 г. – разработка микропроцессоров.

1975 г. – разработка ИС сверхбольшой степени интеграции (с числом элементов на кристалле более 10 000) - СБИС.

1981 г. – создание сканирующего туннельного микроскопа (СТМ).

1986 г. – вручение Нобелевской премии за СТМ.

С созданием СТМ получила интенсивное развитие нанотехнология. *Нанотехнология* - это совокупность методов изготовления и обработки материалов, устройств и систем, размеры которых составляют 1 – 100 нм (хотя бы в одном измерении).

1.2. Полупроводниковые ИМС

В первых дискретных полупроводниковых приборах (точечных и сплавных) электронно-дырочный переход формировался после разделения полупроводниковой пластины на кристаллы. Поэтому каждый кристалл требовал индивидуальной обработки.

Предпосылкой для создания монолитных микросхем стало получение электронно-дырочных переходов диффузией примеси в твердой фазе (1953 г.). Это позволило перейти к *групповой технологии* - созданию переходов одновременно для всех приборов в одной пластине до ее разделения. Это снизило трудоемкость обработки и стоимость приборов.

Сначала транзисторы с диффузионными переходами создавались по мезатехнологии: методом термической диффузии примесей создавался базовый, а затем и эмиттерный слои по всей площади пластины; базовые и эмиттерные области отдельных приборов маскировались, кремний вокруг этих областей протравливался до коллекторного слоя, который до разделения пластины на кристаллы оставался общим для всех приборов. Поэтому мезаструктура имела сложный рельеф, т.к. базовые и эмиттерные области возвышались уступами над коллекторным слоем. Маскирование можно было проводить только через трафарет, применяя пчелиный воск, битум или другие стойкие к травителям вещества.

Для переноса изображения и создания масок в 1957 г. был предложен метод фотолитографии, а в 1958 г. был разработан метод окисного маскирования кремния.

Соединение этих двух методов позволило перейти к *планарной технологии* (1959 г.): в 1958 г. был изобретен планарный транзистор, а уже в следующем году – освоен промышленный выпуск интегральных схем. С помощью фотолитографии создавались миниатюрные и точные по размерам окна в термостойком слое двуокиси кремния, в которые избирательно проводилась диффузия примеси. В результате любая диффузионная область ограничивалась p-n переходом с донной и боковых сторон и имела выход лишь на рабочую плоскость пластины.

Планарная технология обеспечивает выход всех областей элементов схемы на общую плоскость пластины и возможность их соединения с помощью пленочных проводников (межсоединений, которые формируются тоже методом фотолитографии). Таким образом планарная технология в сочетании с групповой обработкой большого количества идентичных схем на общей пластине (*групповая пластина*) решила проблему создания ИМС.

Полупроводниковая ИМС – это функциональный электронный узел, элементы и соединения которого конструктивно неразделимы и изготовляются одновременно в едином технологическом процессе в объеме и на поверхности полупроводникового кристалла.

Создание полупроводниковой ИМС сводится к формированию в приповерхностном слое полупроводниковой пластины элементов (транзисторов, диодов, резисторов) и их последующему объединению в функциональную схему пленочными проводниками по поверхности пластины (межсоединениями).

Для характеристики типа применяемых в ИМС транзисторов, а также технологических методов их изготовления используют понятие структуры ИМС.

Структура ИМС определяет последовательность слоев в составе микросхемы по нормали к поверхности кристалла, которые различаются материалом, толщиной и электрофизическими свойствами. Существуют структуры на биполярных транзисторах (диффузионно-планарная, эпитаксиально-планарная и др.), на МДП-приборах и пр. Заданная структура позволяет установить состав и последовательность технологических методов обработки пластины, а также определить технологические режимы каждого метода.

На рис. 1.1 изображен фрагмент ИМС с диффузионно-планарной структурой, включающий биполярный транзистор и резистор.

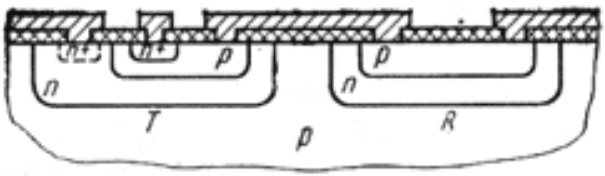


Рис. 1.1. Фрагмент ИМС с диффузионно-планарной структурой: Т – транзистор. R – резистор

Для одновременного формирования транзистора и резистора необходимо, чтобы р-область резистора и изолирующая его n-область имели глубину и электрофизические свойства, одинаковые с областями соответственно базы и коллектора транзистора. Такое соответствие должно выполняться и для всех других элементов, входящих в ИМС. Оно является главным признаком и необходимым условием применения интегральной технологии и позволяет минимизировать число технологических операций изготовления ИМС.

Интегральная технология – это совокупность методов обработки, позволяющая при наличии структурного подобия (*технологической совместимости*) различных элементов ИМС формировать их в едином технологическом процессе.

ИМС одной и той же серии, но различного функционального назначения, имеют единую структуру и единую *базовую технологию*, для которой характерны определенная последовательность обработки, определенный комплект оборудования, а также определенная настройка оборудования, т.е. жесткие технологические режимы. Это повышает эффективность и экономичность производства ИМС.

Базовая технология не зависит от размеров элементов в плоскости пластины, их взаимного расположения и рисунка межсоединений.

Эти свойства ИМС определяются топологическим проектированием и обеспечиваются *фотолитографией* – процессом избирательного травления поверхностных слоев с применением защитной фотомаски.

Топология микросхемы - это чертеж, определяющий форму, размеры и взаимное расположение элементов и соединений ИМС в плоскости, параллельной плоскости кристалла. Поскольку схема включает различные слои (коллекторный, базовый и др.), различают общую и послойную топологию.

По чертежу каждого слоя можно изготовить фотошаблон для создания оксидной маски, используемой для локальной диффузии примеси. Функциональные свойства ИМС определяет ее топология, а именно, рисунок межсоединений.

Можно создать кристалл с универсальным набором элементов (с избытком) и сплошным слоем металлизации. Такие кристаллы в составе общей пластины могут быть доработаны до конкретных функциональных схем в зависимости от рисунка межсоединений.

Такая универсальная заготовка – пластина называется *базовым кристаллом*. Она обеспечивает экономичность про-

изводства ИМС узкого назначения, выпускаемых в небольших количествах.

1.3. Основные принципы интегральной технологии

Важнейшим принципом является технологическая совместимость элементов ИМС с наиболее сложным элементом, которым является транзистор.

Структура элементов (диодов, резисторов, конденсаторов) должна содержать только те области, на основе которых построен транзистор. Поэтому технологический процесс изготовления кристалла строится с учетом лишь структуры транзистора, а остальные элементы формируются попутно.

Второй принцип – принцип групповой обработки, которая должна охватывать как можно большее число операций. Возможность групповой обработки ИМС связана с широким использованием физико-химических процессов (эпитаксии, диффузии, обезжиривания, травления, отмывки), в которых используются в качестве рабочей среды газообразные и жидкие вещества. Возможность одновременной обработки больших поверхностей позволяет вести многоместную обработку нескольких групповых заготовок (пластин) одновременно на ряде операций.

В результате одновременной обработки и получения нескольких тысяч ИМС повышается воспроизводимость их характеристик и снижается трудоемкость и себестоимость изготовления отдельной ИМС.

На рис. 1.2 изображена групповая кремниевая пластина, на которой условно показаны границы отдельных ИМС (кристаллов). На пластине диаметром 50 мм можно изготовить 625 ИМС размерами 1×1 мм, или 400 размерами 1,25×1,25 мм, или 275 размером 1,5×1,5 мм.

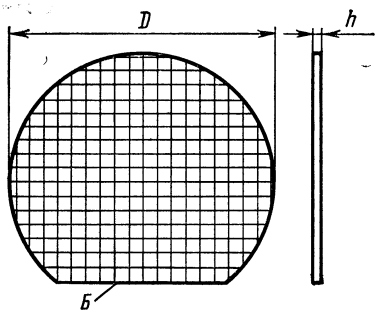


Рис. 1.2. Кремниевая групповая пластина - заготовка:
D –диаметр пластины,
h – толщина пластины (200 – 300 мкм),
Б – базовый срез

Имеется тенденция увеличения размера пластин, которая лимитируется технологическими трудностями обеспечения равномерных свойств материала на большой площади.

На рис. 1.3 приведена фотография кремниевой пластины диаметром 450 мм.

На такой пластине можно разместить более двух тысяч кристаллов, содержащих миллиард транзисторов – рис. 1.4.

Важным принципом является принцип универсальности процессов обработки: для производства ИМС различного функционального назначения используются идентичные по физической сущности процессы с одинаковыми технологическими режимами. Поэтому можно последовательно без переналадки процесса или даже одновременно изготовлять различные схемы.

Таким образом при мелкосерийном или даже в единичном производстве появляется возможность использования преимуществ крупносерийного и массового производства.

Рис. 1.3. Кремниевая пластина диаметром 450 мм

Четвертый принцип – принцип унификации пластин - заготовок, содержащих максимальное число признаков микросхемы. Весь процесс производства можно разделить на два этапа: заготовительный этап, в результате которого получают универсальную пластину-заготовку, и этап специальной обработка, в результате которой микросхема приобретает определенные функциональные свойства. Для универсальных пластин-заготовок экономически целесообразнее крупное централизованное производство. Поэтому область заготовительных процессов следует расширять, сужая область специальной обработки.

Для изготовления структур с диэлектрической и комбинированной изоляцией можно применять пластины-заготовки с заранее сформированными сплошным эпитаксиальным и скрытым слоями, серийно выпускаемые специализированными предприятиями; например, пластины p-Si диаметром 60 и

75 мм толщиной 300 – 550 мм (ρ = 10 Ом·см) с эпитаксиальным n-слоем толщиной 2,5 – 20 мкм (ρ = 0,15 - 7 Ом·см) и скрытым n^+ - слоем толщиной 3 - 15 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 10 – 50 Ом.

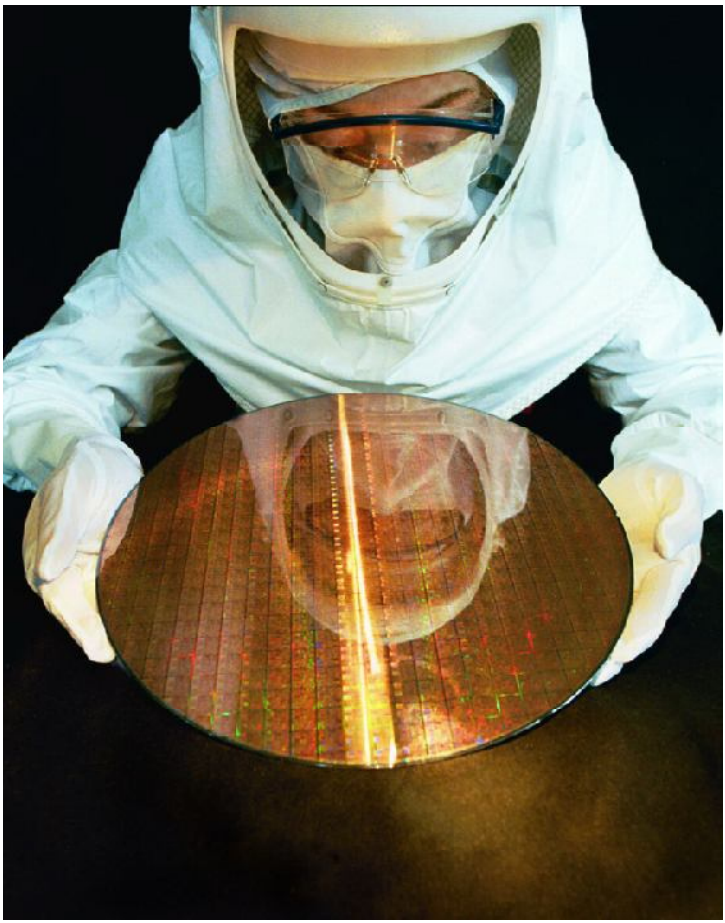


Рис. 1.4. Пластина кремния диаметром 450 мм, содержащая более двух тысяч кристаллов с миллиардом транзисторов в каждом

1.4. Гибридные и совмещенные интегральные схемы

Применение полупроводниковых ИМС ограничено следующими причинами: производство полупроводниковых ИМС экономически оправдано лишь в крупносерийном и массовом производстве (основные затраты идут на проектирование и изготовление комплекта фотошаблонов); существуют ограничения на параметры элементов и ИМС в целом, такие как: невысокая точность диффузионных резисторов ($\pm$ 10%), отсутствие возможности их подгонки, невозможность получения конденсаторов большой емкости, температурные ограничения, ограничения по мощности и др.

Поэтому наряду с полупроводниковыми выпускаются *гибридные* ИМС (ГИС).

В ГИС пассивные элементы создаются нанесением пленок на пассивную диэлектрическую подложку.

Активные элементы (диоды и транзисторы) по пленочной технологии не могут быть изготовлены, они создаются по полупроводниковой технологии и затем монтируются на подложку – рис. 1.5.

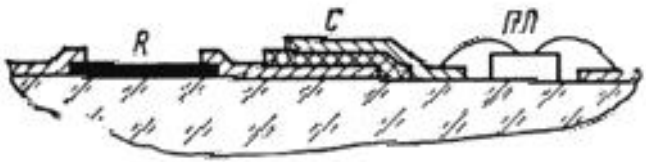


Рис. 1.5. Фрагмент гибридной ИМС:
R – резистор, C - конденсатор,
ПП – кристалл полупроводникового прибора

Гибридная пленочная ИМС – это ИМС, в которой вместе с пленочными элементами, полученными интегральной технологией, содержатся компоненты с самостоятельным конструктивным оформлением.

В зависимости от метода нанесения на подложку пленочных элементов (и толщины пленок) различают тонкопленочные и толстопленочные ГИС. В *тонкопленочных ГИС* пленки, имеющие толщину менее 1 мкм, создаются термическим вакуумным напылением или распылением ионной бомбардировкой, в *толстопленочных* используется метод трафаретной печати с последующим вжиганием. Толщина пленок в этом случае составляет более 1 мкм, обычно она порядка нескольких десятков микрометров.

ГИС имеют худшие технические показатели (размеры, массу, быстродействие, надежность), чем полупроводниковые.

Достоинством ГИС является то, что они позволяют реализовать практически любые функциональные схемы. Они экономически целесообразны в условиях серийного и мелкосерийного производства. К фотошаблонам и трафаретам, используемым для создания пленочных элементов, предъявляются менее жесткие требования. Для изготовления ГИС не требуется дорогостоящего оборудования. В ГИС пленочные резисторы имеют точность ± 5 %, конденсаторы - ± 10 %, а применение подгонки позволяет получить их с точностью до десятых долей процента.

Кроме ГИС существуют и другие комбинированные схемы. При их изготовлении полупроводниковую технологию совмещают с тонкопленочной для создания пассивных элементов, к которым предъявляются повышенные требования.

Совмещенная ИМС – это комбинированная интегральная полупроводниковая микросхема, в которой некоторые эле-

менты (пассивные) наносят на поверхность кристалла методами пленочной технологии – рис. 1.6.

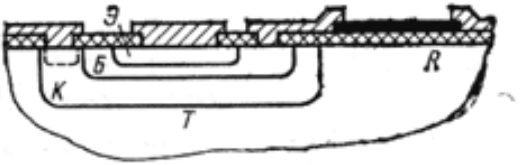


Рис. 1.6. Фрагмент совмещенной ИМС:
Т – транзистор, R – пленочный резистор

Не все сложные функциональные схемы можно изготовить интегральной технологией. Компромиссным решением являются *микросборки* – объединение нескольких кристаллов ИМС средней степени интеграции с помощью пленочных межсоединений на общей диэлектрической подложке и в общем корпусе (типа большой ГИС, включающей вместо активных элементов кристаллы ИМС).

Одним из недостатков полупроводниковых ИМС является невозможность исправления брака. При наличии хотя бы одного дефектного элемента ИМС бракуется.

Высокий процент выхода годных БИС достигается методом *элементной избыточности*. При проектировании БИС расчленяют на ряд ячеек, каждую из которых дублируют в кристалле БИС несколько раз. Первый уровень межсоединений создают в пределах ячейки; определяют дефектные ячейки. Второй уровень межсоединений объединяет группы ячеек в общую схему, при этом дефектные и неиспользованные годные ячейки отключаются разрывом проводников фотолитографией или лазером.

1.5. Степень интеграции

Степень интеграции К – это показатель сложности ИМС, характеризуемой числом элементов N, полученных интегральной технологией на общем кристалле:

$$К = lg\ N.$$

В зависимости от К различают ИМС малой степени интеграции (для них $N < 100$, $К = 2$), средней степени интеграции ($N < 1000$, $К = 3$), большой ($N < 10000$, $К = 4$) – БИС и сверхбольшой ($N > 10000$, $К = 5$) – СБИС.

Повышение степени интеграции является важнейшей задачей микроэлектроники. До настоящего времени действует закон Мура: число транзисторов на кристалле удваивается каждые 18 месяцев.

Одним из факторов, ограничивающих степень интеграции, является технологический фактор. Чаще всего наибольшее число дефектов вносит процесс фотолитографии.

Качество защиты пластины маской из двуокиси кремния, через которую проводится локальное легирование (рис.1.7), зависит от ее однородности и сплошности. При наличии в окисной маске проколов (микроотверстий) примесь проникает через них, образуя в полупроводнике незапланированные легированные области, которые (в зависимости от расположения) могут привести к браку. Причинами появления проколов могут быть неоднородности в светочувствительном слое - фоторезисте (пыль, пузырьки и др.), дефекты в рисунке фотошаблона, наличие пылинок в воздухе на пути света. Образование проколов в окисной маске показано на рис. 1.7: прокол в фотослое(1) и непрозрачный дефект фотошаблона(2) приводят к проколам в фотомаске – 3 и к проколам в окисной маске – 4.

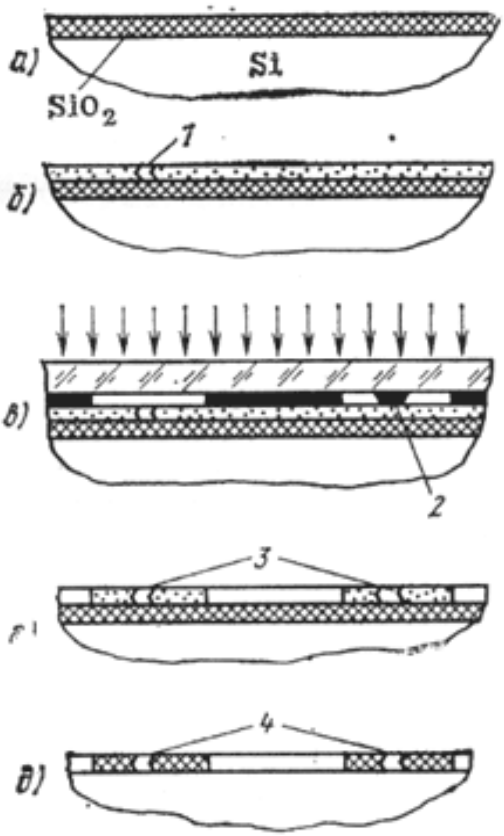


Рис. 1.7. Формирование окисной маски:
а – окисление поверхности пластины,
. б – нанесение фотослоя (фоторезиста)
. в – экспонирование через фотошаблон,
. г – проявление и образование фотомаски,
. д – травление окисла и снятие фотомаски

2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

2.1. Собственные и примесные полупроводники

Собственный полупроводник. Рассмотрим механизм проводимости полупроводниковых материалов на примере элементарных полупроводников. В кристалле кремния (он находится в четвертой группе таблицы Менделеева) четыре валентных электрона каждого атома образуют четыре ковалентные связи. Каждая связь образована двумя электронами, принадлежащими соседним атомам, - рис. 2.1. В узле решетки находится ион кремния с зарядом +4, ему принадлежат четыре валентных электрона (электроны изображены черными точками). В идеальном полупроводнике, изображенном на рис. 2.1.а, все электроны связаны. Если такой полупроводник поместить в электрическое поле, то ток через него не потечет, так как нет свободных носителей заряда. Если под внешним энергетическом воздействии (например, тепловом) произойдет разрыв валентной связи, то электрон станет свободным и сможет двигаться в электрическом поле . Такой процесс называется *генерацией*. На месте электрона остается незанятая связь, имеющая избыточный положительный заряд, так как он не скомпенсирован зарядом электрона. Вакантное место в ковалентной связи называется *дыркой*. В целом кристалл остается электронейтральным. На рис. 2.1.б свободные электроны и дырки изображены темными и светлыми кружками. Если свободный электрон вернется к своему атому в ковалентную связь, то он будет связанным. Такой процесс называется *рекомбинацией*.

Вакантное место в ковалентной связи – дырка будет перемещаться во внешнем электрическом поле, что равносильно перемещению по полю положительного заряда, а отрицатель-

но заряженный электрон двигается против поля. Механизм проводимости, обусловленный движением связанных электронов по вакантным связям, называется *дырочной проводимостью*.

Полупроводник, в котором в результате разрыва ковалентных связей образуется равное количество свободных электронов и дырок, называется *собственным*. Энергия, необходимая для разрыва ковалентной связи, называется *шириной запрещенной зоны полупроводника* – E_g.

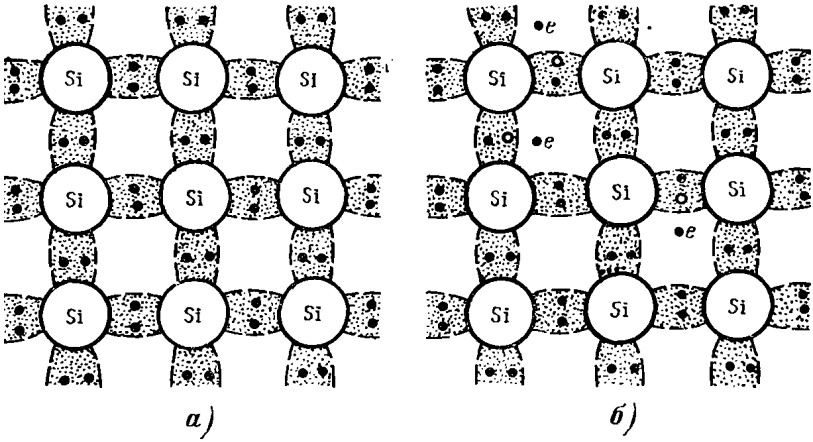


Рис. 2.1. Ковалентные связи в собственном полупроводнике (кремнии)

Ширина запрещенной зоны является важнейшей характеристикой полупроводника, например, для кремния она равна E_g = 1,1 эВ, для германия – 0,66 эВ, для арсенида галлия – 1,43 эВ . Единица измерения 1 эВ соответствует энергии электрона , ускоренного разностью потенциалов в 1 В, поэтому 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ К · 1 В = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

При комнатной температуре концентрация свободных электронов и дырок в германии равна 10^{13} см$^{-3}$, в кремнии –

10^{10} см$^{-3}$. С ростом температуры увеличивается число разорванных связей, и концентрация свободных электронов и дырок растет по экспоненте. При приложении электрического поля свободные электроны и дырки (носители заряда) двигаются под воздействием поля, их направленное движение называется *дрейфом*.

Важной характеристикой полупроводникового материала является *подвижность носителей заряда* μ. Она численно равна скорости дрейфа v носителей заряда в электрическом поле единичной напряженности

$$\mu = \frac{v}{E}, \qquad (2.1)$$

где E – напряженность электрического поля. Подвижность электронов μ_n и дырок μ_p разные: $\mu_n > \mu_p$ практически во всех полупроводниках. Чем выше подвижность носителей заряда в полупроводнике, тем более быстродействующие приборы можно изготовить на его основе, тем лучше будет его электропроводность.

В чистом полупроводнике, не содержащем примесей, осуществляется электронная и дырочная проводимость. Электрический ток в собственном полупроводнике складывается из двух составляющих – электронного и дырочного токов, текущих в одном направлении.

Прохождение тока в веществе подчиняется закону Ома I = U/R, где U – разность потенциалов на концах проводника, а R – его сопротивление. В дифференциальной форме закон Ома связывает плотность тока j с электропроводностью σ и напряженностью электрического поля E:

$$j = \sigma \cdot E. \qquad (2.2)$$

Электропроводность σ является обратной величиной удельному сопротивлению ρ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \qquad (2.3)$$

Электропроводность (или проводимость) зависит от концентрации носителей заряда и их подвижности. Поскольку ток в собственном полупроводнике переносится электронами и дырками, то и электропроводность собственного полупроводника σ_i имеет два слагаемых:

$$\sigma_i = e \cdot n_i \cdot \mu_n + e \cdot p_i \cdot \mu_p, \qquad (2.4)$$

где e – заряд электрона, n_i и p_i – концентрация электронов и дырок. Индекс i показывает, что параметры относятся к собственному полупроводнику (intrinsic английское слово - собственный). В собственном полупроводнике $n_i = p_i$

$$\sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p). \qquad (2.5)$$

Электропроводность σ_i зависит от ширины запрещенной зоны E_g и температуры T:

$$\sigma_i = \sigma_0 \cdot \exp[-E_g/(2kT)], \qquad (2.6)$$

где σ_0 – предэкспоненциальный множитель, слабо зависящий от температуры, k – постоянная Больцмана.

Примесный полупроводник. Рассмотрим электропроводность элементарного полупроводника, в котором один из атомов замещен элементом пятой группы, например, мышьяк в кремнии. Полупроводник, имеющий примеси, называется *примесным*, а проводимость, созданная примесью, называется *примесной*.

У мышьяка пять валентных электронов. В решетке кремния четыре валентных электрона мышьяка участвуют в образовании ковалентной связи – рис. 2.2.а. Пятый электрон в ковалентную связь не вступает, он электрически связан с атомом мышьяка (уравновешивает его заряд), но эта связь намного слабее ковалентной. При низких температурах пятый электрон локализован около атома мышьяка, но при повышении температуры он отрывается от атома примеси и может свободно двигаться по кристаллу, а атом мышьяка превращается в положительный ион.

Энергия отрыва пятого электрона от атома примеси $\Delta E_{пр}$ намного меньше энергии отрыва электрона из ковалентной связи $\Delta E_{пр} \ll E_g$. $\Delta E_{пр}$ называется *энергией активации примеси*. $\Delta E_{пр}$ в кремнии и германии составляет сотые доли электроновольта. Например, $\Delta E_{пр}$ для мышьяка в кремнии составляет 0,05 эВ.

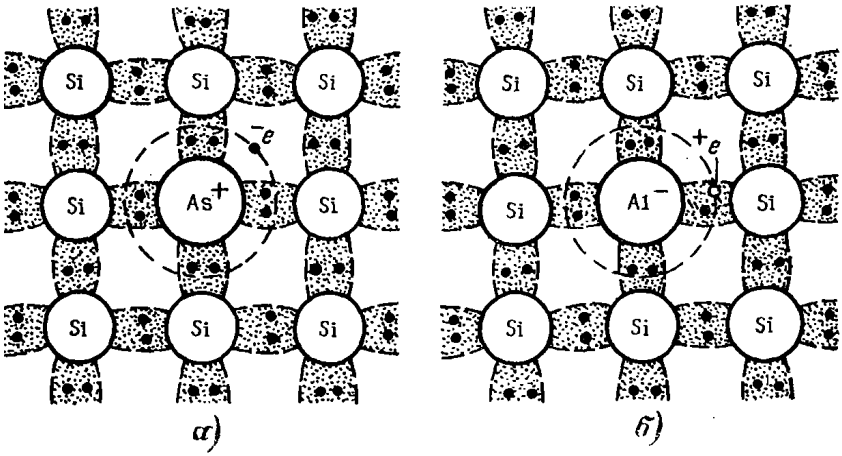


Рис. 2.2. Кристаллическая решетка донорного (а) и акцепторного (б) полупроводников

Вместе с ионизацией примеси может происходить и ионизация основного вещества. Но при не очень высоких температурах количество электронов, оторванных от примеси, будет на порядки больше количества свободных электронов и дырок, образовавшихся за счет разрыва ковалентных связей. Поэтому в таком полупроводнике количество электронов n будет намного больше количества дырок p, такой полупроводник называется *электронным или n-типа*, а примесь, отдающая электроны, называется *донорной.*

Донорными примесями в германии и кремнии являются элементы пятой группы таблицы Менделеева: сурьма, фосфор, мышьяк.

Электроны в полупроводнике n-типа называются *основными носителями заряда, а дырки – неосновными.*

При комнатной температуре в кремнии и германии вся примесь ионизирована, каждый атом примеси отдал один электрон, поэтому концентрация свободных электронов n равны концентрации примеси $N_{пр}$: $n = N_{пр}$, а формулу (2.4) можно записать в виде

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p, \qquad (2.7)$$

учитывая, что $p \ll n$,

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n = \sigma = e \cdot N_{пр} \cdot \mu_n. \qquad (2.8)$$

Если в качестве примеси в кристаллическую решетку полупроводника с ковалентной связью ввести атомы элементов третьей группы таблицы Менделеева, например, алюминий в решетку кремния, то одна ковалентная связь не будет полностью заполнена – рис. 2.2.б. В незаполненную связь около атома алюминия может перейти электрон от атома кремния, при этом образуется отрицательный ион алюминия

и свободная дырка, которая перемещается по связям кремния и принимает участие в проводимости полупроводника.

Примесь, захватывающая электроны, называется *акцепторной.* В этом случае для образования свободной дырки требуется значительно меньшая энергия (энергия активации примеси) $\Delta E_{пр}$, чем для разрыва ковалентных связей кремния: $\Delta E_{пр} \ll E_g$. Поэтому количество дырок p будет значительно больше количества свободных электронов n и электропроводность кристалла будет *дырочной*. В таком полупроводнике основными носителями будут дырки, а электроны - неосновными носителями. Полупроводник с акцепторной примесью называется *дырочным или p-типа*.

Типичными акцепторами в кремнии и германии являются элементы третьей группы таблицы Менделеева: бор, алюминий, галлий. $\Delta E_{пр}$ акцепторов в кремнии и германии имеет такой же порядок величины, как и $\Delta E_{пр}$ доноров, и составляет сотые доли электроновольта. Для алюминия в кремнии она составляет $\Delta E_{пр} = 0{,}06$ эВ.

Для электропроводности такого полупроводника, учитывая $p \gg n$, формула (2.7) примет вид

$$\sigma = e \cdot p \cdot \mu_p = \sigma = e \cdot N_{пр} \cdot \mu_p. \qquad (2.9)$$

При низких температурах, когда тепловой энергии kT недостаточно для полной ионизации примеси ($kT \ll \Delta E_{пр}$) проводимость примесного полупроводника с ростом температуры будет экспоненциально расти

$$\sigma_{пр} = \sigma_0 \cdot \exp\left[-\Delta E_{пр}/(2kT)\right]. \qquad (2.10)$$

Последняя формула одинакова для электронных и дырочных полупроводников.

На этом температурном участке происходит активация примеси, концентрация основных носителей в примесном по-

лупроводнике с ростом температуры растет по экспоненте; этот участок называется *участком примесной проводимости*.

Температурный участок, на котором примесь полностью ионизирована (концентрация основных носителей равна $N_{пр}$), а собственная проводимость $\sigma_i \ll \sigma_{пр}$, называется *участком истощения примесной проводимости*. Для этого участка можно считать, что с ростом температуры проводимость практически не изменяется $\sigma_{пр} = e \cdot \mu_{пр} \cdot N_{пр} \approx \text{const}$, так как $\mu_{пр}$ слабо зависит от температуры.

При дальнейшем повышении температуры, когда концентрация собственных носителей заряда n_i становится сравнимой с $N_{пр}$, начинается *участок собственной проводимости*, для которого справедлива формула (2.6). Таким образом, при высоких температурах все примесные полупроводники становятся собственными (при этом исчезают разница между полупроводниками n- и p-типа).

Температура перехода к собственной проводимости зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника и от концентрации примеси. Чем больше ширина запрещенной зоны, тем при более высоких температурах наблюдается собственная проводимость.

2.2. Контакт электронного и дырочного полупроводников (p-n переход)

Для создания контакта электронного и дырочного полупроводников в одну часть кристалла вводится акцепторная примесь, а в другую часть – донорная. Граница раздела между областями кристалла с разного типа проводимостью называется *электронно-дырочным или p-n переходом.*

В области контакта существует большой градиент концентраций электронов и дырок. Это вызывает диффузию электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в n-область. Возникновение диффузионных потоков приводит к

разделению зарядов: в n-области у границы перехода появится положительный объемный заряд, а в p-области у границы перехода – отрицательный – рис. 2.3. Объемные заряды в области контакта создают сильное электрическое поле, направленное от n-области к p-области, которое препятствует дальнейшему движению электронов и дырок.

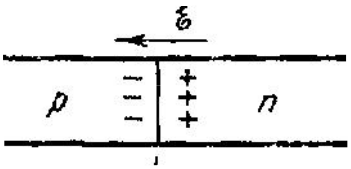


Рис. 2.3. Возникновение электрического поля в p-n переходе

Приложим внешнее напряжение к p-n переходу: минус - к электронному полупроводнику, плюс – к дырочному. Такое напряжение соответствует включению перехода в прямом направлении. Внешнее электрическое поле направлено против внутреннего поля перехода, снижая последнее. Это позволит основным носителям заряда пересекать область перехода, при этом они становятся неосновными носителями, создавая заметный ток.

При включении внешнего напряжения в обратном направлении внешнее поле совпадает по направлению с внутренним, что увеличивает потенциальный барьер и препятствует движению основных носителей заряда.

На рис. 2.4 изображена *вольтамперная характеристика p-n перехода*: обратный ток настолько мал, что p-n переход, включенный в обратном направлении, широко используется для изоляции соседних элементов ИМС друг от друга.

При увеличении обратного напряжения на переходе обратный ток стремится к насыщению - j_s на рис. 2.4. При

больших обратных напряжениях происходит резкий рост обратного тока. Это явление называется *пробоем*.

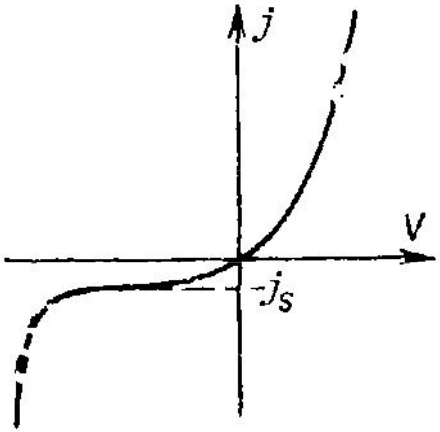


Рис. 2.4. Вольтамперная характеристика p-n перехода

В основе полупроводниковых транзисторов лежит работа p-n переходов. Например, в структуру биполярного транзистора входят два p-n перехода: эмиттер – база и база – коллектор – рис. 2.5.

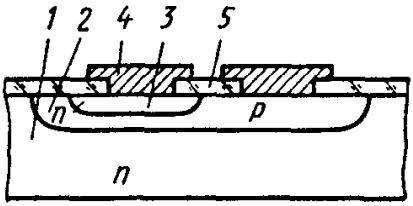


Рис. 2.5. Структура планарного n-p-n транзистора:
1 – высокоомный коллекторный слой, 2 – диффузионная база p-типа, 3 – диффузионный эмиттерный слой n-типа, 4 – алюминиевая металлизация, 5 – слой окисла

3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС. ТИПЫ СТРУКТУР ИМС

3.1. Основные этапы технологии ИМС

Основными этапами изготовления ИМС являются:

- получение чистого полупроводникового материала;
- выращивание из него монокристаллических слитков с заданными электрофизическими свойствами;
- изготовление из слитков полупроводниковых пластин;
- получение на основе пластин базовых полупроводниковых структур (обычно используются эпитаксиальные структуры);
- формирование элементов ИМС в эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры;
- изготовление ИМС в виде отдельных законченных изделий.

3.2. Выбор полупроводникового материала

Технология ИМС предъявляет к полупроводниковому материалу жесткие требования.

Для массового производства приборов и ИМС полупроводниковый материал должен:

- иметь высокую химическую стойкость и стабильность свойств в широком температурном диапазоне;

- обладать хорошей обрабатываемостью механическими, химическими и другими методами;

- давать возможность получать на их основе совершенные и чистые монокристаллические слитки и слои;

- давать возможность получения локальных областей электронного и дырочного типа;

- иметь необходимую ширину запрещенной зоны и высокую подвижность носителей заряда;

- опираться на достаточно емкую сырьевую базу, иметь приемлемую стоимость.

В настоящее время основным полупроводниковым материалом является кремний. Сырье для его получения практически неисчерпаемо: содержание в земной коре составляет около 30 %. Высокие механические, химические, тепловые, оптические и электрофизические свойства кремния обеспечили ему лидирующее место в производстве как дискретных полупроводниковых приборов, так и в производстве ИМС на протяжении 50 лет. Другие полупроводники примеряются намного реже; например, германий до сих пор используется для изготовления дискретных приборов – диодов, транзисторов и др.; арсенид галлия используется для изготовления перспективных ИМС. Кремний остается перспективным материалом и для наноэлектроники.

В области полупроводниковой оптоэлектроники на первое место вышли химические соединения элементов третьей и пятой групп таблицы Менделеева – A^3B^5. Это соединения элементов третьей группы: Al, Ga, In и пятой – P, As, Sb. Используются как двухкомпонентные соединения GaAs, InP, GaP и др., а также многокомпонентные твердые растворы на их основе – AlGaAs, InGaAsP .

3.3. Получение полупроводникового материала

Материалами, используемыми для изготовления ИМС, являются кремний и арсенид галлия. Однако ИМС делают в основном на кремнии, так как технология ИМС на арсениде галлия более сложная и не столь хорошо отработанная, как на кремнии. Поэтому кремний является базовым полупроводниковым материалом для ИМС. Для этого он должен быть хорошо очищен и иметь монокристаллическую структуру.

В массовом производстве кремний получают восстановлением из песка (SiO_2) в смеси с коксом (С) при высоких температурах. Полученный кремний называется техническим. Его чистота (98 %) и структура поликристалла не позволяют использовать такой кремний для изготовления ИМС.

Далее производится его глубокая очистка, для чего кремний переводится в легколетучее соединение, которое может быть легко очищено различными физическими, химическими, физико-химическими методами. После очистки кремний восстанавливается, его чистота называется «полупроводниковой», содержание примесей не превышает 10^{-8} %. Для получения кремния самой высокой чистоты используется *метод зонной плавки*, основанный на том, что примеси хорошо растворяются в жидкой фазе (расплаве) и гораздо хуже в твердой фазе. Создавая расплавленную узкую зону в слитке и проходя этой зоной вдоль слитка, расплавленная зона собирает в себя примеси. Проводя зонную плавку многократно, можно получить максимально возможную чистоту материала. Для кремния проводится вертикальная бестигельная зонная плавка, так как примеси тигля могут загрязнять кремний рис. 3.1.

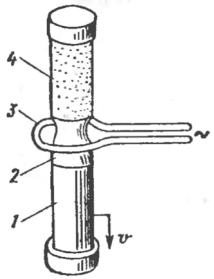


Рис. 3.1. Схема зонной плавки кремния:
1 – монокристалл, 2 – расплавленная зона, 3 – индуктор,
4 – поликристалл

Выращивание монокристаллов обычно проводится *методом Чохральского* – рис. 3.2.

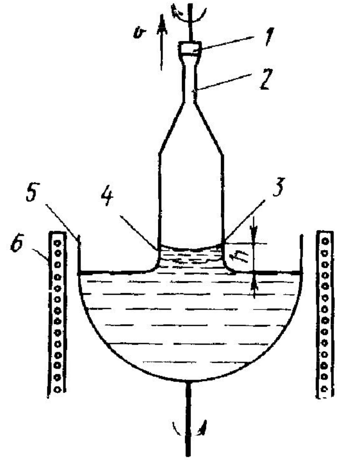


Рис. 3.2. Метод Чохральского:
1 – затравка, 2 – шейка монокристалла,
3 – фронт кристаллизации, 4 - преохлажденная зона,
5 – тигель, 6 - нагреватель

Это метод вытягивания монокристалла из расплава на затравку. Затравкой является небольшой монокристалл кремния, он и задает ориентацию будущего слитка. Одновременно в расплав вводится дозированное количество легирующей примеси (доноров или акцепторов). Поэтому монокристаллические слитки имеют заданный тип проводимости, удельное сопротивление ρ монокристаллов определяется концентрацией введенной примеси $N_{пр}$:

$$\rho = - = \text{———}, \qquad (3.1)$$

где μ – подвижность носителей заряда, δ - электропроводность кремния. Слаболегированные монокристаллы выращивают методом зонной плавки.

Монокристаллические слитки кремния имеют цилиндрическую форму. Метод Чохральского позволяет регулировать диаметр монокристаллов в широких пределах, в настоящее время максимальный диаметр слитков составляет 450 мм - рис. 3.3.

Рис. 3.3. Монокристалл кремния диаметром 450 мм

3.4. Получение полупроводниковых пластин

Полупроводниковые слитки режутся на пластины тонкими стальными дисками с алмазной режущей кромкой - рис.3.4.

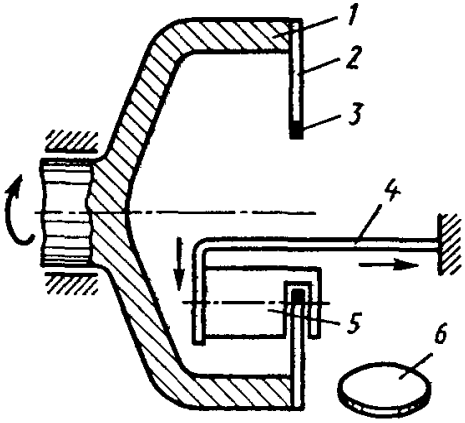


Рис. 3.4. Резка полупроводникового слитка диском с внутренней алмазной режущей кромкой:
1 – шпиндель, 2 – основа диска, 3 – режущая кромка, 4 – держатель слитка, 5 и 6 – полупроводниковые слиток и пластина

Диаметр и площадь пластин определяются диаметром слитка. Чем больше площадь пластины, тем на большее число кристаллов ее можно разделить, тем больше ИМС можно изготовить на одной пластине. На пластине диаметром 450 мм можно разместить более 2000 кристаллов, в каждом из которых можно сформировать до 10^9 схемных элементов.

Пластина, вырезанная из слитка, содержит геометрические и структурные дефекты. Их устраняют шлифовкой и полировкой (сначала механической, потом химической) до 14

класса чистоты. Высота микронеровностей поверхности составляет не более 50 нм.

3.5. Получение эпитаксиальных структур

До 1965 г. выход годных ИМС на биполярных транзисторах не превышал 5 %. Использование в структуре ИМС эпитаксиального слоя позволило увеличить процент выхода годных ИМС до 50 – 70 %.

Современные ИМС на биполярных транзисторах получают на эпитаксиальных структурах. Поэтому они называются базовыми полупроводниковыми структурами.

Эпитаксия – это наращивание монокристаллических слоев на монокристаллическую подложку. Если материал пленки и подложки одинаковый, то такой вид эпитаксии называется *гомоэпитаксией*. Если пленка и подложка имеют разную природу, то это *гетероэпитаксия.*

При изготовлении ИМС обычно используется гомоэпитаксия (кремний на кремнии), в структурах КНС (кремний на сапфире) реализуется гетероэпитаксия. Гетероэпитаксия используется для получения гетероструктур оптоэлектронного назначения, например, на подложке из арсенида галлия GaAs наращивают слой трехкомпонентного твердого раствора AlGaAs.

При любом способе эпитаксии имеются: источники атомов ростового вещества, среда, в которой эти атомы переносятся к подложке, и подложка.

Если средой переноса является вакуум, то это вакуумная эпитаксия. В вакууме атомы обычно переносятся молекулярными пучками. Поэтому такой вид эпитаксии называется *молекулярно-лучевой (МЛЭ).*

Если средой переноса служит газ или пар, то эпитаксия называется *газофазной* или парофазной.

Если атомы поступают из жидкой фазы, то это *жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ).*

3.6. Методы формирования элементов ИМС

Основным элементом полупроводниковых ИМС является p-n переход. Для его образования в полупроводник заданного типа проводимости вводятся атомы примеси, создающей проводимость противоположного типа.

Введение примеси в полупроводник с целью изменения его электрофизических свойств называется *легированием*.

В технологии ИМС широко используются два метода легирования: термическая диффузия примесей и ионная имплантация.

Диффузия примесей – это процесс переноса примесных атомов из среды, где их концентрация велика, в область с меньшей концентрацией за счет теплового хаотического движения частиц вещества. Движущей силой диффузии является градиент концентрации вещества.

Поток диффундирующих примесей направлен в сторону, противоположную градиенту концентрации, и пропорционален его величине. Коэффициент пропорциональности (D) называется *коэффициетом диффузии*.

Коэффициент диффузии в твердом теле экспоненциально зависит от температуры T:

$$D = D_0 \cdot [\exp (- U_a /(kT)] , \qquad (3.2)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель, U_a - энергия активации процесса диффузии, k – постоянная Больцмана.

Примесные атомы за счет тепловой энергии переходят из одного устойчивого положения в кристалле в другое, преодолевая потенциальный барьер U_a.

С ростом температуры частота диффузионных перескоков возрастает и коэффициент диффузии увеличивается.

Достаточная скорость диффузии примесей в кремнии достигается при температурах 1000 – 1250 °С. При таких высоких температурах в кремний диффундируют и посторонние примеси (фоновые), что может приводить к браку. В этом один из недостатков диффузионного легирования.

Ионная имплантация (ионное легирование) – это введение легирующей примеси в кристалл путем его бомбардировки ионами примесных атомов с энергиями более 10^4 эВ. Глубина проникновения ионов невелика и составляет менее 1 мкм.

Бомбардировка кристалла ионами нарушает его структуру, для восстановления которой проводится отжиг при температурах более низких (600 – 800 °С), чем температуры диффузионного легирования. В этом одно из преимуществ ионной имплантации.

Другим преимуществом является абсолютная чистота процесса легирования, которая достигается использованием магнитных сепараторов, разделяющих ионы разной массы за счет их движения по различным траекториям в магнитном поле.

Элементы ИМС соединяются между собой токопроводящими тонкопленочными дорожками.

Изоляция отдельных элементов от кремния осуществляется тонким слоем диэлектрика, или обратносмещенным p-n переходом. Поэтому кроме получения полупроводниковых слоев в составе микросхемы создаются изолирующие и проводящие слои.

Для получения диэлектрического слоя на кремнии он термически окисляется в кислородосодержащей газовой среде с образованием диоксида кремния SiO_2.

Простейшим методом получения металлических слоев является термическое вакуумное напыление.

3.7. Общая характеристика технологического процесса производства ИМС

Общее количество операций технологического процесса может достигать 200 в зависимости от структуры ИМС и конструкции корпуса.Все операции могут быть разделены на три группы - рис. 3.5.

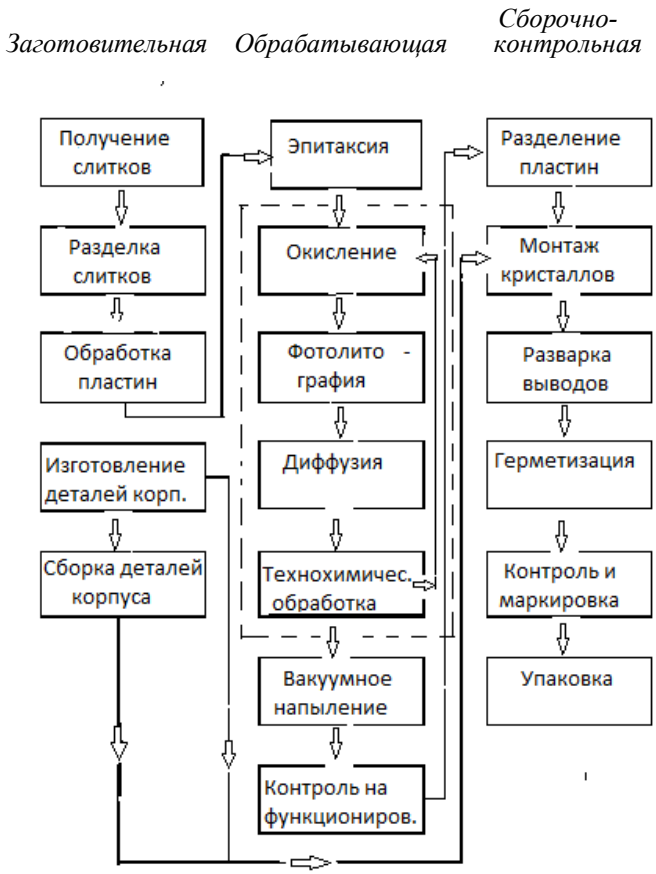


Рис. 3.5. Классификация частных технологических процессов

Первая группа включает *заготовительные процессы*: получение монокристаллических слитков определенного типа проводимости и заданного удельного сопротивления, резку слитков на пластины, обработку их поверхности, изготовление отдельных деталей и узлов корпуса ИМС.

Вторая группа процессов – *обрабатывающая* - объединяет все операции, необходимые для формирования структур ИМС в групповых пластинах и их контроль на функционирование. Это окисление, диффузия примесей, эпитаксия , ионная имплантация, вакуумное напыление, фотолитография, технохимическая обработка.

К третьей группе – сборочно-контрольной – относятся разделение групповой пластины на кристаллы, монтаж кристаллов в корпус, разварка выводов, герметизация, контроль и классификация, механические и климатические испытания, маркировка и упаковка.

Первая группа процессов близка к приборостроительному производству. Эта группа процессов не зависит от конкретной структуры ИМС; она может осуществляться на отдельных специализированных предприятиях.

Третья группа процессов также характеризуется специфическими методами обработки и оборудованием, но имеет более тесную связь с процессами второй группы. Для этой группы процессов целесообразно создание специализированных цехов или участков (в зависимости от масштабов производства) в пределах одного предприятия.

Наиболее полно особенности интегральной технологии отражены во второй группе процессов. Существует ряд причин, требующих проведения этих процессов на различных участках одного производства, а именно:

1. взаимосвязь производственных участков, обусловленная цикличностью технологического процесса (групповые

пластины многократно возвращаются на участки для формирования очередного слоя);

2. ограниченное время межоперационного хранения групповых пластин;
3. высокие требования к производственной гигиене.

Характер и последовательность операций второй группы процессов определяется типом структуры ИМС. Режимы обработки на отдельных операциях зависят от толщины и электрофизических свойств слоев и областей структуры.

3.8. Типы структур ИМС

Рассмотрим структуры биполярных ИМС.

Диффузионно-планарная структура. Функции изоляции элементов в ней выполняют p-n переходы, ограничивающие области отдельных элементов и смещенные в обратном направлении. В качестве подложки используется пластина монокристаллического кремния, равномерно легированного акцепторной примесью. После окисления пластины методом фотолитографии в двуокиси кремния избирательно вытравливают участки прямоугольной формы, через образовавшиеся окна проводят диффузию атомов донорной примеси – рис. 3.6.

Процесс диффузии совмещают с термичесикм окислением кремния, в результате которого на поверхности вновь образуется сплошной слой окисла. Так одновременно создаются коллекторные области всех транзисторов и изолирующие области всех диодов и резисторов для всех кристаллов групповой пластины.

Вторичным вскрытием окон меньших размеров в окисле и последующей диффузией акцепторной примеси формируют р-области, выполняющие роль базовых областей транзисторов, анодов диодов и резисторов.

В результате третьего цикла фотолитографии, диффузии и окисления получают области эмиттеров, катоды диодов, а

также высоколегированные области под омические контакты к высокоомным коллекторным областям (n+ - область – сильнолегированный полупроводник).

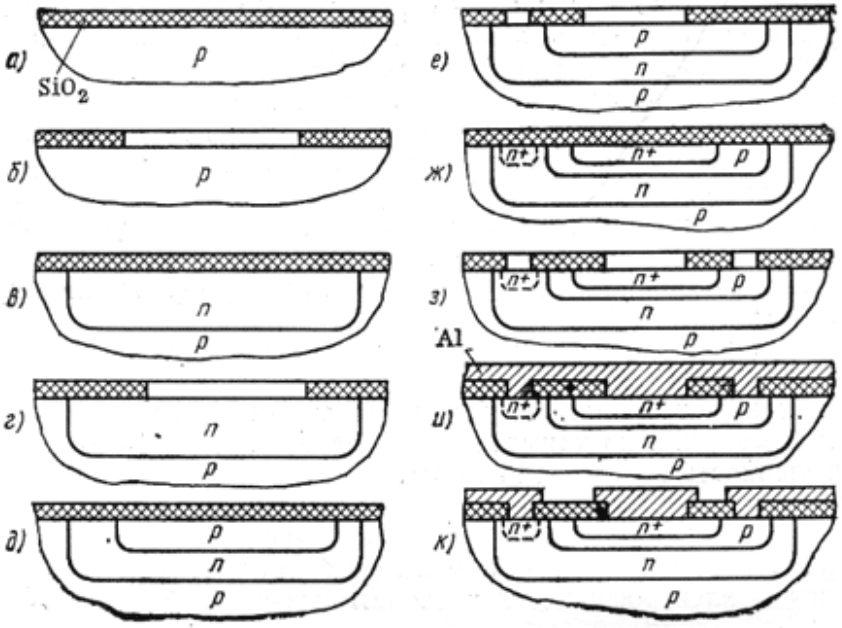


Рис. 3.6. Последовательность формирования диффузионно-планарной структуры:
а – исходная пластина; б, г, е – вскрытие окон в окисле перед диффузией примеси в коллекторные, базовые и эмиттерные области; в, д, ж – диффузия примеси в коллекторные, базовые и эмиттерные области и окисление поверхности; з – вскрытие окон под контакты к диффузионным областям; и – металлизация поверхности; к – избирательное травление металлической пленки и образование межсоединений

Для создания межэлементных связей в слое окисла вновь вскрывают окна и плоскость пластины покрывают сплошной металлической пленкой (обычно алюминиевой). В местах, свободных от окисла, образуется контакт с соответствующими областями кремния. Заключительный цикл фотолитографии по металлу создает систему межсоединений, а также контакты по периферии кристаллов. Они используются для коммутации кристаллов с внешними выводами корпуса.

В диффузионном коллекторе активная примесь распределена по глубине неравномерно: на поверхности ее концентрация максимальна, а на дне коллектора равна нулю. Поэтому слой коллектора под базой имеет высокое сопротивление, это увеличивает напряжение насыщения и время переключения транзистора. Равномерное распределение примеси по толщине коллектора получается в эпитаксиальном слое.

Эпитаксиально-планарная структура. В качестве исходной подложки используется равномерно легированная пластина р- кремния. Для проведения эпитаксии одну сторону пластины освобождают от окисла и тщательно очищают – рис. 3.7. Далее проводится эпитаксия кремния n-типа, поверхность эпислоя окисляют, методом фотолитографии вскрывают окна в виде узких замкнутых дорожек по будущему контуру коллекторных и изолирующих областей ИМС. Через окна проводится диффузия акцепторной примеси до смыкания ее с р-областью подложки.

Таким образом получаются изолированные друг от друга островки равномерно легированного эпитаксиального n-крем - ния. Такой процесс диффузии называется *изолирующей* или *разделительной диффузией.* В дальнейшем в пластине формируют диффузионные базовые и эмиттерные области, а также контакты и межсоединения, так же, как в диффузионно-пла - нарной структуре. Концентрацию примеси в эпитаксиальном слое можно изменять в широких пределах. Но повышение концентрации примеси в эпитаксиальном коллекторе снижает

пробивное напряжение перехода база – коллектор. Поэтому коллектор легируют умеренно, а малую величину его сопротивления получают параллельным включением сильнолегированного скрытого n^+ слоя. Название «скрытый» слой указывает на то, что он не имеет выхода на поверхность пластины. Знак (+) в обозначении n- или p-области указывает на их сильное легирование.

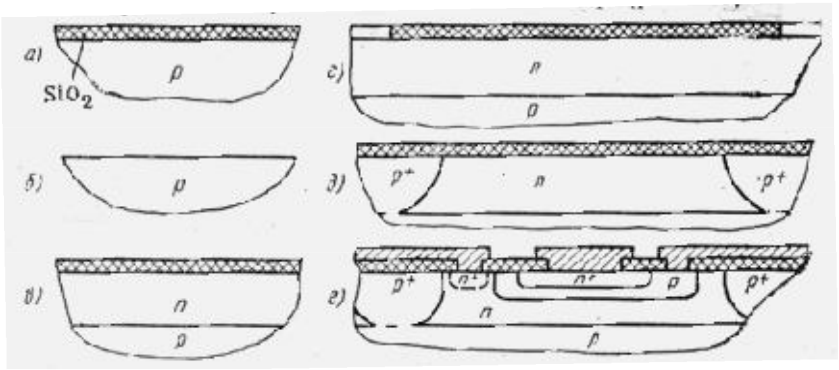


Рис. 3.7. Последовательность формирования : эпитаксиально-планарной структуры:
а – исходная пластина; б – стравливание окисла, подготовка поверхности к эпитаксии; в – эпитаксия n-слоя и окисление поверхности; г – вскрытие окон в окисле под разделительную диффузию примеси; д – диффузия акцепторной примеси, окисление поверхности; е – готовая структура после формирования диффузионных базовых и эмиттерных областей и получения межсоединений

Эпитаксиально-планарная структура со скрытым слоем. Начальные стадии технологического процесса получения такой структуры приведены на рис. 3.8. В окисле подложки p-типа вскрываются окна, через которые проводят диффузию примеси высокой концентрации. Далее поверхность освобож-

дают от окисла и проводят эпитаксию n- кремния. После окисления поверхности процесс обработки проводится так же, как и в структуре без скрытого слоя.

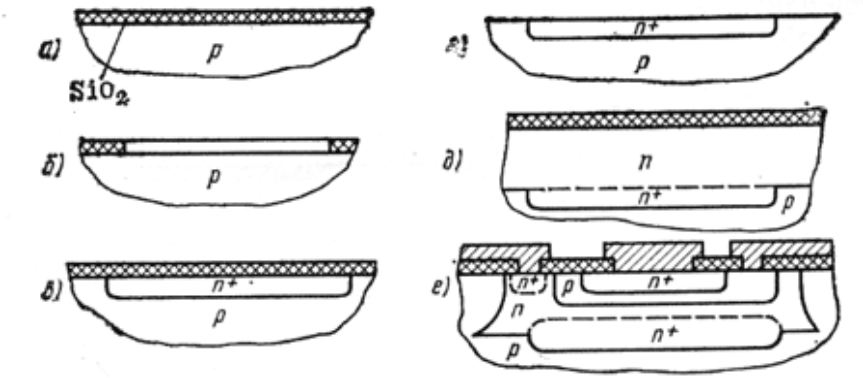


Рис. 3.8. Последовательность формирования эпитаксиально- планарной структуры со скрытым слоем: а – исходная пластина; б – вскрытие окон под диффузию скрытого слоя; в – диффузия n^+ - примеси и окисление поверхности; г – стравливание окисла и подготовка поверхности к эпитаксии; д – эпитаксия n-слоя и окисление поверхности; е – готовая структура после разделительной диффузии, формирования базовых и эмиттерных областей и межсоединений

Изоляция элементов обратносмещенным p-n переходом имеет ряд существенных недостатков: при больших обратных напряжениях происходит пробой; переход имеет большие токи утечки и емкости; расстояние между элементами схемы приходится делать большими; это уменьшает быстродействие схем. Наилучшую электрическую развязку элементов дает диэлектрическая изоляция.

Структура с диэлектрической изоляцией. В этой структуре каждый элемент схемы размещен в «кармане» - области монокристаллического кремния, ограниченную со всех сторон слоем двуокиси кремния. В этом случае расстояние между элементами может быть уменьшено до 8 – 10 мкм. На рис. 3.9 показана структура с диэлектрической изоляцией.

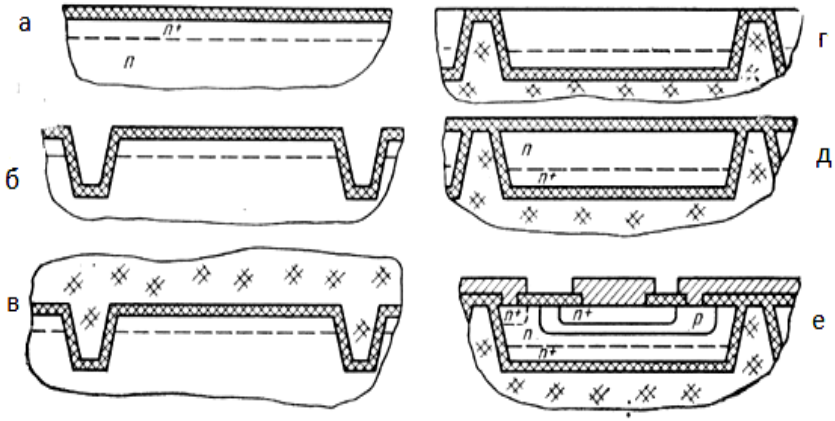


Рис. 3.9. Последовательность формирования изолированных областей в структуре с диэлектрической изоляцией:
а – исходная подложка; б – избирательное травления окисла, глубокое травление кремния, окисление поверхности; в – осаждение поликристаллического кремния; шлифование и полирование обратной стороны пластины; д – окисление поверхности; е – готовая структура после базовой и эмиттерной диффузии и получения межсоединений

В исходной пластине кремния n-типа методом фотолитографии вытравливают участки окиси кремния, а затем и кремния по контуру будущих элементов. В результате обра-

зуются канавки по заданному контуру. Затем поверхность окисляется, и на нее осаждается толстый слой поликристаллического кремния, который служит конструкционной основой будущей ИМС. Обратную сторону шлифуют, удаляя монокристаллический слой до вскрытия окиси кремния по границам областей, и производят доводку (для удаления нарушенного слоя). После протравливания и отмывки поверхности ее окисляют. В изолированных областях монокристаллического кремния n-типа диффузионным методом формируют элементы (базовые области, резисторы, эмиттеры, области под контакты). Затем создают межсоединения по поверхности пластины. Если исходная подложка содержит эпитаксиальный n^+ - слой, то транзисторы получаются со скрытым слоем.

Из-за необходимости шлифования и полирования подложек такие структуры (с диэлектрической изоляцией) очень трудоемки. Наличие толстого поликремния вызывает внутренние механические напряжения, которые приводят к короблению пластины после снятия монокристаллического слоя, что затрудняет фотолитографию Это обусловило разработку комбинированных методов изоляции элементов ИМС.

Изопланарная структура. В этой структуре (рис.3.10) донная часть 2 коллектора изолирована от монокристаллической пластины p-n переходом, а боковая 1 – толстым слоем окисла, полученным сквозным локальным окислением эпитаксиального слоя. Эта структура аналогична эпитаксиально-планарной, в которой разделительная диффузия заменена сквозным окислением.

Вначале на поверхность пластины, содержащей эпитаксиальные n^+- и n-слои осаждают из газовой фазы нитрид кремния Si_3N_4. Методом фотолитографии в этом слое создают защитную маску с окнами по контуру коллекторных областей. Через окна проводится глубокое окисление кремния. Затем маску стравливают и всю поверхность окисляют. Далее про-

водится диффузия для формирования базы и эмиттера, формируются окна под контакты и создаются межсоединения.

Необходимость длительного окисления для образования диэлектрической изоляции в изопланарной структуре является недостатком, так как проводится при высокой температуре и может вызвать нежелательное перераспределение примеси из скрытого слоя в эпитаксиальный коллектор.

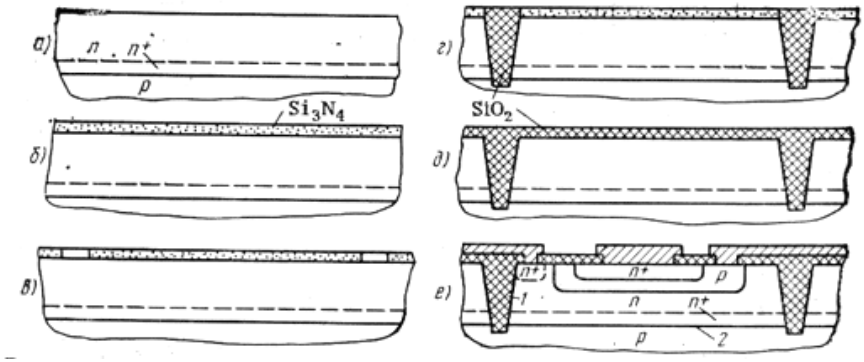


Рис.3.10. Последовательность формирования изолированных областей в изопланарной структуре: а - подложка с эпитаксиальным и скрытым слоями; б – нанесение слоя нитрида кремния; в – избирательное травление нитрида кремния по контуру будущих элементов; г – глубокое окисление кремния; д – стравливание нитрида кремния и окисление поверхности; е – готовая структура после формирования базовых и эмиттерных областей формирования межсоединений

Для сокращения времени окисления уменьшают толщину эпитаксиального слоя и, соответственно, базы и эмиттера (толщина эпитаксиального слоя в изопланарном процессе не более 3 – 4 мкм).

Полипланарная структура. Усовершенствованным вариантом предыдущей структуры является структура с изолирующими V-канавками – рис. 3.11.

В этой структуре вместо сквозного окисления проводится сквозное травление эпитаксиального слоя с последующим окислением полученных канавок и заполнением их поликристаллическим кремнием.

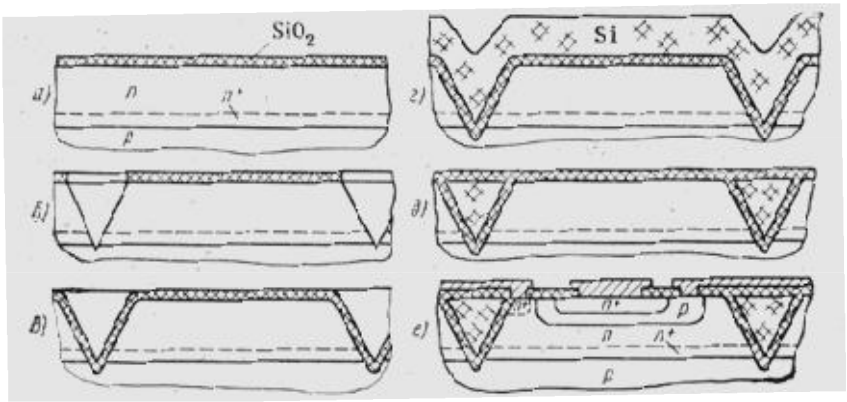


Рис. 3.11. Последовательность формирования изолированных областей в полипланарной структуре:
а – подложка с эпитаксиальным и скрытым слоями, покрытая окисью кремния; б – избирательное травление окиси кремния и анизотропное травление кремния; в – стравливание окиси и окисление всей поверхности; г – осаждение поликремния; д – шлифование, полирование и окисление поверхности; е – готовая структура после формирования базовых и эмиттерных областей, а также межсоединений

Вначале подложку с сформированными n^+ - и n-эпитаксиальными слоями окисляют. Затем методом фотолитографии в окисле вскрывают окна, замкнутые по контуру будущих элементов. Далее методом *анизотропного травления кремния* получают канавки V-образной формы.

Ширина канавки l и ее глубина d связаны соотношением $l/d = 1{,}41$. Глубина канавки должна быть больше толщины эпитаксиального слоя. Бокового подтравливания практически не происходит. Затем поверхность окисляют и на ней осаждают поликремний. Минимальная толщина слоя поликремния должна быть достаточной для полного заращивания всех канавок. Шлифованием и полированием снимают излишки поликремния до вскрытия окисной пленки. После окисления поверхности формируют структуру транзисторов и других элементов ИМС.

Для анизотропного травления пригодны лишь подложки с ориентацией {100}; к недостаткам структуры относятся трудоемкие операции шлифования и полирования.

Для изготовления структур с диэлектрической и комбинированной изоляцией можно применять пластины-заготовки с заранее сформированными сплошным эпитаксиальным и скрытым слоями, серийно выпускаемые специализированными предприятиями; например, пластины p-Si диаметром 60 и 75 мм толщиной 300 – 550 мм (ρ = 10 Ом·см) с эпитаксиальным n-слоем толщиной 2,5 – 20 мкм (ρ = 0,15 - 7 Ом·см) и скрытым n^+ - слоем толщиной 3 - 15 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 10 – 50 Ом.

Существенным уменьшением площади транзисторов с упрощением технологии характеризуются структуры МДП (металл – диэлектрик – полупроводник).

МДП-структуры. Основным элементом этих структур является МДП-транзистор с индуцированным каналом n- или p-типа – рис.3.12.

МДП-транзистор имеет симметричную структуру: области истока и стока и изолированный затвор, с помощью которого можно индуцировать канал и управлять его проводимостью. Так как переходы, ограничивающие области истоков и стоков, всегда смещены в обратном направлении и перенос основных носителей заряда происходит в тонком приповерх-

ностном слое полупроводника между истоком и стоком каждого транзистора, то мер для взаимной изоляции приборов с одноименным типом проводимости канала не требуется.

На рис. 3.13 показана последовательность создания р-канального МДП-транзистора с металлическим затвором.

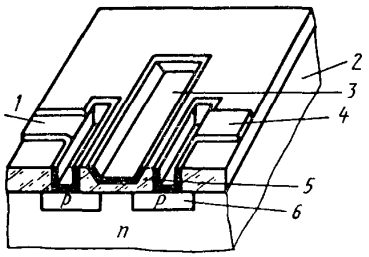


Рис. 3.12. МДП-транзистор с каналом р-типа:
1, 4 – омические контакты к областям истока и стока,
2 –подложка n-типа, 3 – металлический электрод затвора,
5 – подзатворный диэлектрик, 6 – области истока и стока

Комплементарные МДП-структуры (КМДП). Структура, содержащая МДП-транзисторы обоих типов проводимости, позволяет на 2 – 3 порядка по сравнению с n- или р-МДП-структурами снизить мощность, потребляемую при работе в статическом режиме. Такие структуры получили название структур на дополняющих МДП-транзисторах или комплементарных МДП-структур (КМДП-структур). Последовательность формирования КМДП структуры изображена на рис. 3.14. Методом диффузии формируют р-область, далее p^+ -области истоков и стоков р-канальных приборов, а также охранные области, а затем в р-области – n^+ -области истоков и стоков n-канальных приборов. Для формирования областей затворов методом фотолитографии вытравливают участки двуокиси кремния, затем методом термического окисления

кремния получают тонкие слои двуокиси кремния расчетной толщины (подзатворный диэлектрик). Далее вскрывают в окисле окна под контакты и формируют межсоединения, включая затворы.

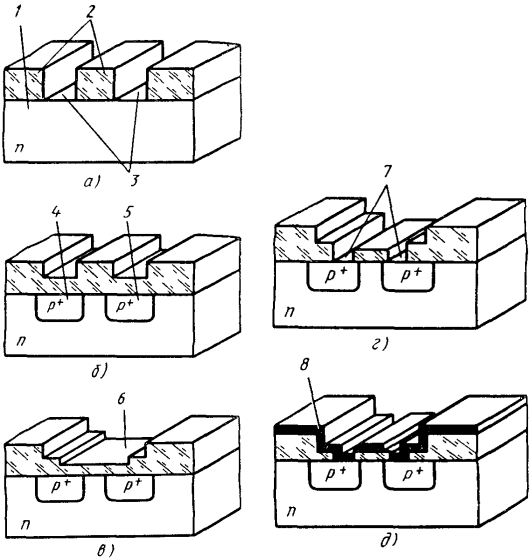


Рис. 3.13. Последовательность формирования р-канального МДП-транзистора ИМС с металлическим затвором:
а, б – формирование окон и создание областей истока и стока, в – нанесение тонкого подзатворного слоя двуокиси кремния, г, д – вскрытие окон под контакты к истоку и стоку и напыление алюминия; 1 – исходная подложка, 2 – слой двуокиси кремния, 3, 7 – окна в слое двуокиси кремния, 4, 5 – области истока и стока, 6 – слой подзатворного диэлектрика, 8 – слой алюминия

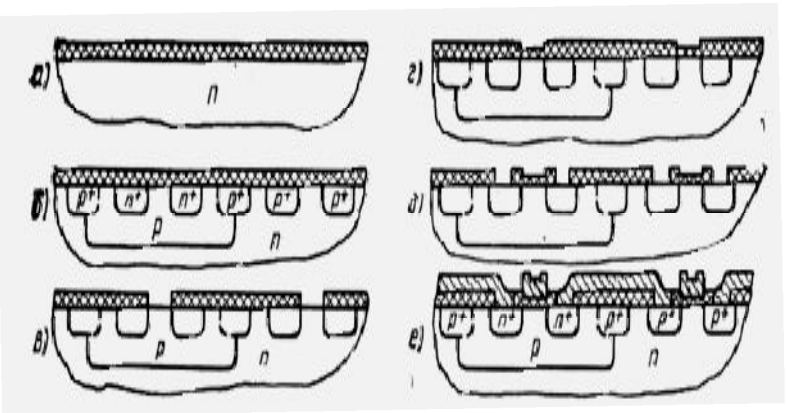


Рис. 3.14. Последовательность формирования КМДП-структуры:
а – исходная пластина; б – последовательное получение p -, p^+- и n^+ - областей методом диффузии;
в – избирательное травление двуокиси кремния;
г - термическое окисление кремния (получение подзатворного диэлектрика); д – избирательное травление двуокиси кремния под контакты к истокам и стокам; е – готовая структура после получения межсоединений

Структуры «кремний на сапфире» - КНС. Полную изоляцию МДП-транзисторов можно обеспечить при их формировании в виде островков на монокристаллической изолиру - ющей подложке. В качестве последней обычно используется монокристаллический синтетический сапфир, имеющий хорошее кристаллографическое сопряжение с кремнием, что важно для гетероэпитаксии. Широкое применение получили МДП-КНС-структуры, особенно КМДП-КНС-структуры. Такие структуры устойчивы к температурным и радиационным воздействиям.

3.9. Требования к кремниевым пластинам

Групповая кремниевая подложка представляет собой круглую плоскопараллельную пластину диаметром обычно до 300 мм и толщиной (в зависимости от диаметра) в интервале от 0,2 ÷ 0,3 мм до 1 мм. Последующие термическая и фотолитографическая обработки требуют выполнения следующих условий:

- подложки должны иметь совершенную кристаллическую структуру в объеме и на поверхности, так как нарушения поверхности вследствие механической обработки могут породить дефекты в эпитаксиальном слое или исказить фронт диффузии. Плотность дислокаций должна быть не более 10 $см^{-2}$;
- шероховатость поверхности пластины должна быть не ниже 14б – 14в классов. Высота микронеровностей – в несколько раз меньше толщины пленки фоторезиста, наносимого во время фотолитографии, это уменьшает вероятность появления локальных дефектов рисунка;
- прогиб пластин должен быть не более 8 -10 мкм. Прогиб обычно обусловлен разностью остаточных напряжений на сторонах пластины и проявляется после резки слитка на пластины. Зазор между пластиной и фотошаблоном при контактной фотолитографии искажает рисунок фотомаски. При эпитаксиальном наращивании неплотный контакт подложки с нагревателем приведет к ее неравномерному нагреву и неодинаковым свойствам эпислоя в пределах пластины;
- неплоскостность и неплоскопараллельность (клиновидность) пластин должна быть в пределах $\pm$ 10 мкм, влияние этих параметров аналогичны прогибу;
- разориентация поверхности относительно заданной кристаллографической плоскости в пределах ± 1°. От кристаллографической ориентации зависит скорость

протекания различных процессов: эпитаксии, диффузии, травления, окисления и др. и воспроизводимость результатов этих процессов;

- разнотолщинность пластин в пределах партии не должна превышать $\pm$ (5 $\div$ 8) мкм, а отклонение по диаметру $\pm$ 0,5 мм. Это способствует воспроизводимости результатов в пределах партии;
- пластины должны иметь технологические элементы: базовый срез (рис. 1.2) и фаску. Базовый срез указывает направление наилучшего расположения кристаллов с точки зрения качества разделения на пластины, получения канавок нужного профиля при анизотропном травлении. При проведении фотолитографии он правильно ориентирует пластину. Базовый срез образуется в результате снятия лыски с цилиндрического слитка и последующей разрезки его на пластины. Фаска по контуру подложки повышает качество выполнения некоторых операций.

3.10. Схема технологического процесса

На рис. 3.15 представлена схема технологического процесса производства ИМС эпитаксиально-планарной структуры со скрытым слоем (с транзисторами n-p-n типа). Отдельные этапы технологического процесса (фотолитография, диффузия, контроль и испытания и др.) включают от 3 до 10 операций. Например, каждый этап диффузии, указанный на схеме, состоит из загонки примеси (ее внедрения в поверхностный слой), снятия окисла, измерения поверхностного сопротивления и глубины диффузионного слоя на контрольной пластине, разгонки примеси (перераспределения ее вглубь пластины), окисления, контроля вольтамперных характеристик перехода (на контрольной пластине). Поэтому общее число операций изготовления ИМС (без учета заготовительного эта-

па) достигает 150, а продолжительность полного цикла обработки составляет около 100 часов.

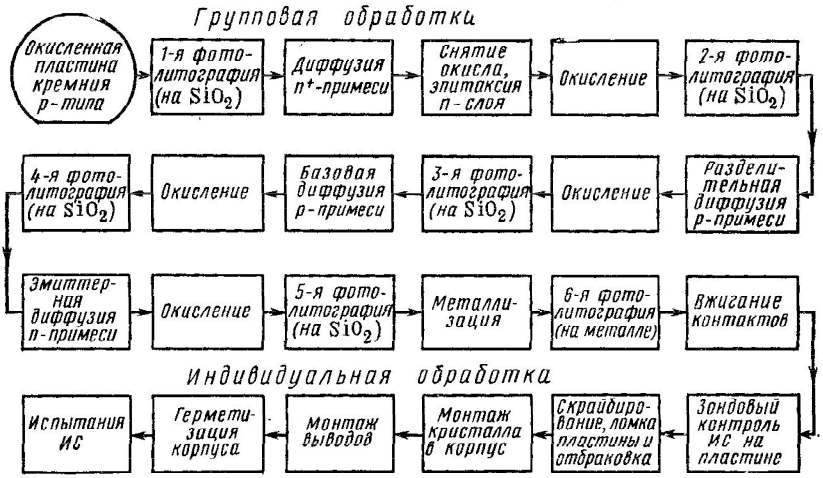


Рис. 3.15. Схема технологического процесса изготовления ИМС эпитаксиально-планарной структуры со скрытым слоем

Основная часть технологического процесса связана с получением структур в групповой пластине. Цикл групповых процессов обработки ИМС заканчивается получением межсоединений на поверхности групповой пластины.

Принцип интегральной технологии исключает возможность обнаружения дефектов на ранних стадиях создания структур. Лишь после формирования межсоединений и периферийных контактов становится возможным контроль ИМС на правильность функционирования.

Зондовый контроль проводится на автоматических установках путем перемещения групповой пластины под головкой, несущей контактные зонды, с шагом, соответствующим размерам кристалла, и последовательного контактирования

зондов с периферийными контактами каждого кристалла. При наличии годного кристалла вырабатывается сигнал на очередное перемещение на шаг, в противоположном случае – сигнал на маркирующее устройство, наносящее метку на дефектный кристалл.

В дальнейшем на групповой пластине наносятся риски по границам кристаллов (эта операция называется *скрайбированием)* – рис. 3.16, пластина разламывается на отдельные кристаллы, дефектные кристаллы, несущие метки, отбраковываются.

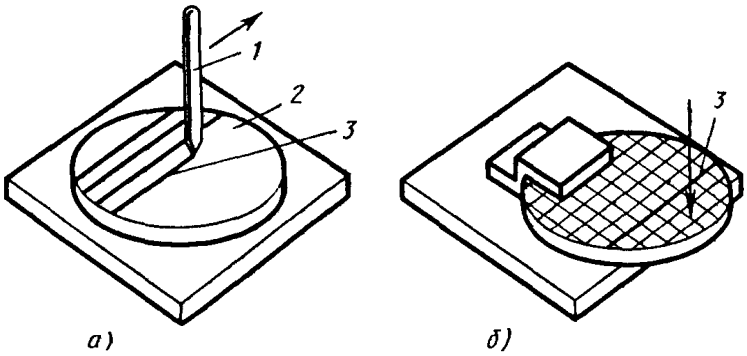


Рис. 3.16. Скрайбирование пластины (а) и разламывание ее на кристаллы (б):
1 – резец, 2 – полупроводниковая пластина, 3 – риски

Монтаж кристаллов в полых корпусах сводится к установке и фиксации с помощью приклеивания или пайки на основании корпуса, а в сплошных (полимерных) корпусах – на промежуточном носителе. Затем периферийные контакты кристалла соединяют с внешними выводами корпуса. Способ монтажа выводов, как и способ герметизации ИМС (пайка, сварка, заливка и др.) зависят от конструкции корпуса.

На рис. 3.17 показана разварка проволочных выводов к контактным площадкам корпуса и кристалла. На завершаю-

щем этапе производится электрический контроль ИМС по статическим и динамическим параметрам, проводятся выборочные механические и климатические испытания.

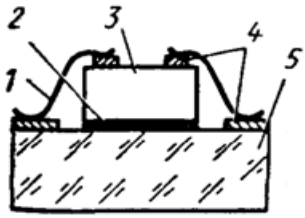


Рис. 3.17. Монтаж проволочных выводов:
1 – вывод, 2 – клей, 3 – ИМС,
4 – контактные площадки, 5 – корпус

3.11. Микроклимат и производственная гигиена

Для повышения выхода годных ИМС и воспроизводимости их параметров важно поддерживать стабильные климатические условия, высокую чистоту воздушной среды, технологических газов и жидкостей.

Температура и влажность относятся к *климатическим параметрам* производственных помещений и определяют понятие *микроклимата*.

Определенная и стабильная температура требуется для фотолитографических процессов, где важна стабильность линейных размеров. Постоянная температура помещения требуется при измерении электрических характеристик. Рабочая температура некоторых процессов (диффузии, эпитаксии, окисления др.) составляет 800 – 1200 ℃ и должна поддерживаться с точностью до десятых долей градуса. Изменение температуры помещения может внести погрешность в значение

стабилизированной температуры процесса за счет изменения условий теплообмена с окружающей средой.

При высокой влажности воздуха производственных помещений пары воды адсорбируются на пластинах, кристаллах, технологических установках, что при нагреве может привести к образованию окислов. Наличие влаги может понизить точность измерений электрических параметров. Поэтому влажность должна быть минимальной, но не ниже 30 %. При низкой влажности усиливается проявление статического электричества, которое может привести к пробою созданных структур.

По температурно-влажностным параметрам установлены три класса производственных помещений – табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры воздушной среды производственных помещений

Характеристика воздушной среды		Класс помещения				
		1	2	3	4	5
Температура, °С	летом	22±0,5	20±1	20±2	По ГОСТ 12.1.005-76	
	зимой	22±0,5	23±1	23±2		
Относительная влажность, %		45±5	50±5	50±10		
Максимальное число частиц размером более 0,5 мкм в 1 л воздуха		4	35	350	1000	3500

Производственная гигиена – это комплекс технологических и организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение чистоты воздушной среды производст-

венных помещений и чистоты технологических сред с целью повышения качества выпускаемых изделий.

Воздушная среда характеризуется *запыленностью*, которая оценивается количеством частиц размером не менее 0,5 мкм в единице объема воздуха (в 1 л или в $м^3$ воздуха).

Аэрозоли (механические частицы в воздухе) являются причиной появления проколов в окисле (рис. 1.7), приводящей к выходу из строя элементов и ИМС в целом. Частицы пыли на поверхности готовых структур приводят к пробоям и коротким замыканиям при электрических испытаниях ИМС и ее эксплуатации. По степени запыленности производственные помещения и ограниченные рабочие объемы делятся на 5 классов – табл. 3.1.

Помещения 1 – 3 классов называются *чистыми комнатами или гермозонами.* Перед подачей в помещения воздух проходит фильтрацию, давление воздуха внутри помещения немного превышает атмосферное для уменьшения проникновения наружного воздуха. Чистая комната содержит рабочее помещение, гардеробное помещение, переходные и обдувочные шлюзы, помещение для обработки приточного воздуха.

Рекомендуемые для различных операций классы микроклимата и запыленности приведены в табл. 3.2. Достичь высокой степени обеспыленности легче в ограниченных локальных рабочих объемах – боксах или скафандрах.

Определенные требования предъявляют к технологическим средам: технологическим газам и воде.

Технологические газы используются в различных целях. *Защитные газы* (азот, аргон, гелий) применяют для исключения окисления и коррозии на высокотемпературных операциях: пайке, сварке, герметизации, продувки реакторов эпитаксиальных и диффузионно-окислительных установок, транспортировке газов-реагентов и др.

Газы-реагенты используются как диффузанты, окислители, травители, восстановители. Аргон, азот, кислород при-

меняются как плазмообразующие газы при ионно-плазменном распылении, вакуумно-плазменном травлении, плазмохимической обработке. Промышленно выпускаемые газы не имеют достаточной чистоты для полупроводникового производства, поэтому их тщательно очищают и осушают.

Вода, используемая в производстве, не должна содержать *гидрозолей* (механических частиц), растворенных солей, газов, примесей металлов и органики. Такая вода называется *деионизованной*.

Таблица 3.2

Классы производственных помещений и рабочих объемов для различных операций

Наименование технологических операций	Класс помещения		Класс рабочего объема по запыленности
	по микроклимату	по запыленности	
Фотолитография	1	3	1
Вакуумное напыление	3	2	2
Химобработка, окисление, диффузия	3	3	2
Контроль электрических параметров на пластине	3	3	3
Скрайбирование, монтаж кристалло , разварка выводов	3	5	5
Герметизация	3	5	-

4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

4.1. Термическая диффузия примесей

Диффузия проводится с целью внедрения атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку полупроводника для образования области с противоположным по отношению к исходному материалу типом проводимости. Диффузионная область оказывается ограниченной p-n-переходом. Количество введенной примеси должно быть достаточным для компенсации влияния примеси в исходном материале и для создания избытка примеси, обеспечивающего проводимость противоположного типа. Величина проводимости диффузионной области определяется концентрацией избыточной (нескомпенсированной) примеси.

При высокой температуре (около 1000 °С) примесные атомы поступают через поверхность и распространяются вглубь вследствие теплового движения.

Основной механизм проникновения примесного атома в кристаллическую решетку состоит в последовательном перемещении по *вакансиям* (пустым узлам) решетки. Менее вероятны перемещения по междоузлиям и обмен местами с соседними атомами. Атом примеси электрически активен, т.е. выполняет функции донора или акцептора, в том случае, если занимает место в узле. Поэтому для получения сильнолегированных областей и (или) сокращения времени диффузии необходима высокая концентрация вакансий в поверхностном слое подложки. При невысокой температуре она очень мала – 10^7 см$^{-3}$, а при температурах диффузии порядка 1000 °С достигает 10^{21} см$^{-3}$ за счет поверхностного испарения атомов, диффузии атомов полупроводника из глубины пластины к поверхности (что эквивалентно диффузии вакансий от поверх-

ности вглубь), а также смещения атомов в междоузлия вследствие тепловых колебаний атомов.

Легирование ведется через маску двуокиси кремния SiO_2 или нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 0,5 – 1 мкм (рис. 4.1).

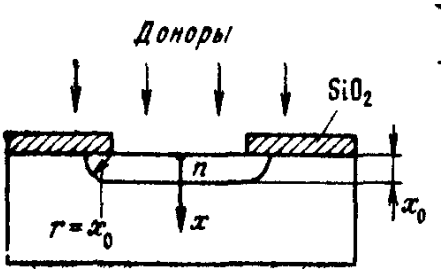


Рис. 4.1. Локальная диффузия примеси через маску из двуокиси кремния

Концентрация введенной примеси – доноров $N_д$ (x) на рис. 4.2 – максимальна у поверхности и спадает по направлению вглубь пластины. Расстояние x_0, на котором она равна концентрации исходной примеси (акцепторов N_A на рис. 2.4), называют *толщиной диффузионного слоя.*

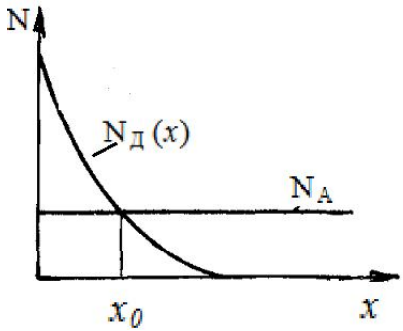


Рис. 4.2. Зависимость концентрации введенной примеси $N_Д$ от расстояния x от поверхности пластины

Если вводится примесь противоположного подложке типа, то x_0 соответствует металлургической границе образующегося p-n перехода.

Так как примесь диффундирует не только вглубь, но и под маску, то есть травление изотропно (скорость его не зависит от направления), p-n переход на краях имеет форму, близкую к цилиндрической или сферической с радиусом кривизны $r = x_0$, а ширина диффузионного слоя в горизонтальном направлении у поверхности больше ширины окна в маске на величину 2r.

Примеси характеризуются *коэффициентом диффузии* D, определяющим плотность потока П диффундирующих атомов (атомов, проходящих в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению диффузии):

$$П = - D \text{ grad } N. \qquad (4.1)$$

Чем больше D, тем быстрее идет диффузия, тем меньшее время требуется для получения слоя заданной толщины x_0.

Теоретические расчеты показывают, что $x_0 \sim \sqrt{Dt}$, где t – время диффузии, тогда $t \sim x_0^2/D$. Для бора или фосфора при $x_0 = (2 – 3)$ мкм и температуре T = 1100 ℃ оно составляет около одного часа, а для мышьяка и сурьмы (доноров) на порядок больше из-за меньшего D. Формирование слоев большой толщины (около 10 мкм) - длительный процесс, который редко используется.

Коэффициент диффузии сильно зависит от температуры – формула (3.2). На каждые 100 ℃ он увеличивается на порядок. Отсюда следует необходимость поддержки температуры диффузии с точностью до $\pm$ (0,1 – 0,2) ℃.

Другой параметр примеси – *предельная растворимость* – максимальная концентрация примеси $N_{пред}$ – незначительно увеличивается с ростом температуры : в два – три раза на ка-

ждые 300 °С при температурах ниже 1300 °С. Предельная растворимость составляет $10^{20} – 10^{21}$ см$^{-3}$ при Т = 1100 °С.

Использовать для легирования чистые вещества затруднительно, так как бор тугоплавок, мышьяк токсичен, фосфор легко воспламеняется. Поэтому в качестве источников примесей применяют их соединения в твердом (B_2O_3, P_2O_5), в жидком (BBr_3, $POCl_3$) или газообразном (B_2H_6, PH_3) состоянии, называемые *диффузантами.*

На рис. 4.3 изображена схема однозонной диффузионной печи.

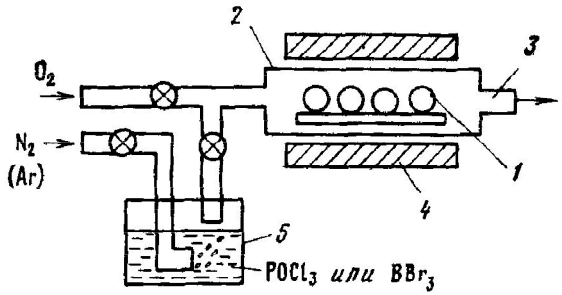


Рис. 4.3. Схема однозонной диффузионной печи

Пластины 1 помещают в кварцевую трубу 2 с открытым выходным концом 3, в которой с помощью нагревателя 4 поддерживается необходимая температура. Нейтральный газ-но – ситель (N_2 или Ar), проходя через сосуд с диффузантом 5, захватывает его пары и переносит их к поверхности пластин. Одновременно в трубу поступает небольшое количество кислорода. В результате реакции кислорода с диффузантом образуется ангидрид легирующего элемента (B_2O_3 или P_2O_5):

$$BBr_3 + O_2 \rightarrow B_2O_3 + Br_2,$$

$$POCl_3 + O_2 \rightarrow P_2O_5 + Cl_2,$$

при взаимодействии которого с кремнием выделяются атомы примеси – B или P:

$$P_2O_5 + Si \rightarrow SiO_2 + P,$$

$$B_2O_3 + Si \rightarrow SiO_2 + B.$$

Если над пластиной присутствует избыток диффузанта, то у поверхности быстро устанавливается максимальная концентрация примеси, близкая к предельной растворимости, которая далее не изменяется. Такой режим диффузии называется *загонкой* примесей. Распределение концентрации примеси по толщине пластины при загонке изображено на рис. 4.4.а при разных температурах и времени процесса.

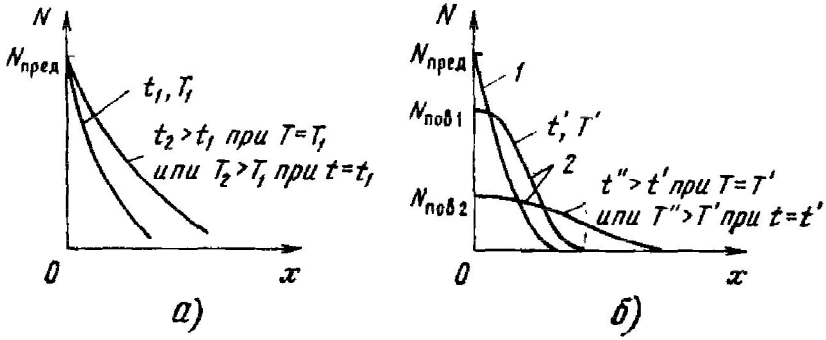


Рис. 4.4. Распределение диффундирующей примеси по глубине пластины:
а – при неограниченном источнике примеси (загонке);
б – при ограниченном источнике (разгонке)

В этом случае атомы примеси сосредоточены в узком поверхностном слое. Назначение загонки – введение определенной *дозы легирования* - числа атомов, поступающих через единицу поверхности, $N_л = \int N(x)\,dx = N_{пр}\sqrt{Dt}$.

Для окончательного формирования диффузионного слоя введенную примесь подвергают перераспределению на втором этапе диффузии – *разгонке примесей*. Подачу диффузанта прекращают, примесь распределяется вглубь при $N_л$ = const, поверхностная концентрация $N_{пов}$ уменьшается, а толщина слоя возрастает. На рис. 4.4.б приведены зависимости N (x) после загонки 1 и разгонки 2.

Для создания нескольких слоев с разными типами проводимости диффузия проводится многократно. Например, при первой диффузии в кремнии n-типа можно сформировать p-слой, а затем при второй диффузии ввести в него доноры на меньшую глубину, получив структуру типа n-p-n. При многократной диффузии концентрация каждой новой вводимой примеси должна превышать концентрацию предыдущей, чтобы тип проводимости изменился и образовался p-n переход. Максимальная концентрация ограничены предельной растворимостью, поэтому число последовательный диффузий обычно не превышает трех. Последующие диффузии из-за высокой температуры вызывают нежелательную разгонку примесей, введенных на предыдущих этапах. Поэтому температуру и (или) время последующих диффузий выбирают меньшими, а коэффициент диффузии и предельную растворимость большими, чем для предыдущих.

4.2. Ионное легирование

Ионное легирование – это технологическая операция введения примесей в поверхностный слой пластины или эпитаксиальной пленки путем бомбардировки ионами примесей.

Получение ионов, их ускорение и фокусировку производят в специальных вакуумных установках.

Пар легирующих элементов поступают в ионизационную камеру, где возбуждается высокочастотный или дуговой электрический разряд. Образовавшиеся ионы (P^+, As^+,B^+ и др.) вытягиваются из камеры с помощью экстрагирующего электрода, на который подается высокий отрицательный потенциал 10 – 20 кВ, и поступают в магнитный масс-сепаратор. Принцип действия масс-сепаратора основан на зависимости траектории движения иона в постоянном поперечном магнитном поле от его массы. Поэтому на выход попадают только нужные ионы. Ионы ускоряются в электрическом поле (с напряжением до 300 кВ) и фокусируются в пучок с плотностью тока до 100 А/м^2 и площадью сечения 1 – 2 мм^2. Пучок сканируют по пластине, облучая всю ее поверхность.

Локальное легирование производится через маску SiO_2 или Si_3N_4 толщиной около 0,5 мкм, превышающей длину пробега ионов в этих материалах.

Ввиду того, что пучок перпендикулярен поверхности и боковое рассеяние ионов мало, горизонтальные размеры легированной области точно соответствуют отверстию в маске – рис. 4.5.

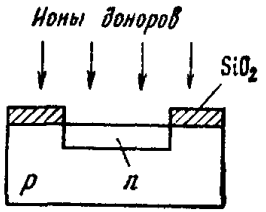


Рис. 4.5. Образование p-n перехода
при ионном легировании

В этом преимущества метода по сравнению с легированием путем термической диффузии, так как позволяет получать окна меньших размеров (для этого нужно сравнить рис. 4.1. и 4.5). Возможно локальное легирование без маски путем сканирования остросфокусированным ионным пучком, который может включаться и выключаться по заданной программе.

На рис. 4.6 изображено распределение концентраций бора N_a (x) для одинаковой дозы легирования $N_{л.а.}$, но разных энергий ионов.

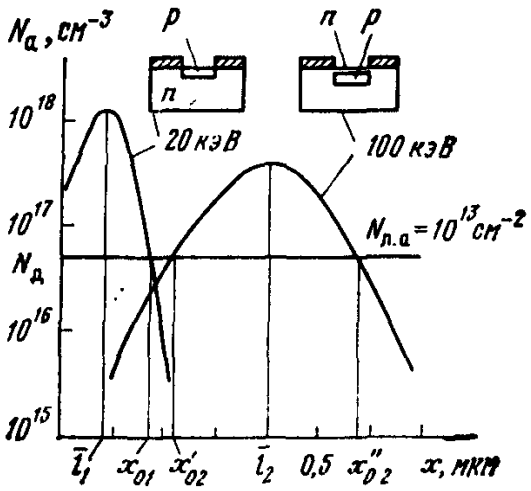


Рис. 4.6. Распределение примеси по глубине пластины при ионном легировании

Длина пробега ионов – случайная величина, распределенная по нормальному закону (закон Гаусса), она характеризуется средним значением и среднеквадратичным отклоне-

нием σ. Обе величины $\bar{l}$ и σ увеличиваются с ростом энергии ионов.

Положение максимума распределения N_a (x) соответствует $\bar{l}$, толщина легированного слоя, то есть «ширина» распределения N_a (x), пропорциональна δ, а максимальная концентрация примеси определяется дозой легирования:

$$N_{max} = N(\bar{l}) = N_{л.а.}/\sqrt{(2\pi\sigma)}.$$

При малой энергии ионов слой p-типа проводимости образуется у поверхности, а его толщина определяется из условия $N_a(x_{01}) = N_д$, где $N_д$ – исходная концентрация доноров в пластине n- типа ($N_д = 5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$). На расстоянии x_{01} от поверхности образуется p-n переход. При большой энергии ионов слой p-типа располагается на расстоянии x'_{02} от поверхности и имеет толщину $\Delta x = (x''_{02} - x'_{02}) \sim \sigma_2$. Точки x''_{02} и с x'_{02} соответствуют металлургическим границам p-n переходов.

С ростом энергии ионов увеличивается число радиационных дефектов в кристалле (смещений атомов), поэтому энергию ограничивают 200 кэВ. Значения $\bar{l}$ не превышают 0,5 – 0,7 мкм.

Доза легирования регулируется током ионного пучка и временем легирования (несколько минут). При большой дозе можно получить более высокую концентрацию, чем при диффузии, но это приведет к повышению дефектности кристалла вплоть до разрушения его поверхности и превращения в аморфный кремний. Поэтому дозу ограничивают значениями $10^{14} – 10^{15}$ см$^{-2}$.

Высокая воспроизводимость параметров легированных слоев достигается постоянством ускоряющего напряжения и тока пучка.

Для снижения числа радиационных дефектов и активации примеси производится отжиг пластин при температурах 600 – 900 ℃. При отжиге смещенные атомы полупроводника

возвращаются к положениям равновесия в узлах кристаллической решетки, а примесные атомы перемещаются в позиции атомов замещения, то есть происходит активация, только в этом случае примесные атомы будут вести себя как доноры или акцепторы.

В связи с тем, что глубина легирования при ионной имплантации небольшая, его можно использовать как загонку примеси (первый этап диффузии), а затем провести второй этап легирования – разгонку при высокой температуре (900 – 1000 ℃), совместив ее с отжигом. Такой способ дает возможность получить легированные слои большой толщины при обеспечении более точного дозирования вводимой примеси по сравнению с диффузией.

Ионное легирование широко используется при создании БИС и СБИС. Оно позволяет создавать слои с субмикронными горизонтальными размерами с толщинами порядка 0,1 мкм при высокой воспроизводимости параметров.

Процесс ионного легирования имеет высокую производительность, занимает меньше времени, проводится при более низких температурах в сравнении с диффузией, в связи с чем мало изменяет распределение примеси, полученное на предыдущих этапах.

Этим методом можно внедрять примеси любых элементов, при этом обеспечивается высокая степень чистоты, так как процесс производится в вакууме и используется магнитное сепарирование ионов. Ионное легирование хорошо совместимо с другими вакуумными процессами.

Недостатками ионного легирования являются малая глубина залегания слоев, образование дефектов, не полностью устраняемых отжигом, а также сложность технологического оборудования.

В электронной промышленности ионная имплантация производится на установках типа «Везувий».

4.3. Эпитаксия

Термин эпитаксия происходит от греческого epi – на, над и taxis – расположение.

Эпитаксия - процесс наращивания на пластину (подложку) монокристаллического слоя (эпитаксиальной пленки), повторяющего структуру подложки и ее кристаллографическую ориентацию.

Эпитаксиальная пленка создается на всей поверхности подложки, одновременно в нее вводятся примеси, распределяющиеся равномерно по объему пленки. На границе раздела пленки с подложкой можно сформировать p-n, n^+-n, p^+-p переходы. Проведя несколько последовательных эпитаксий, можно создавать многослойные структуры.

Рассмотрим газофазную эпитаксию кремния. Она проводится в эпитаксиальном реакторе – рис. 4.7.

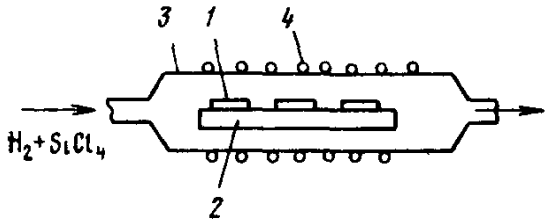


Рис. 4.7. Схема установки для эпитаксиального наращивания кремния

Пластины 1 на графитовом держателе 2 помещаются в кварцевую трубу 3 с высокочастотным нагревателем 4. Через трубу пропускается поток водорода с небольшим (доли процента) содержанием тетрахлорида кремния $SiCl_4$, а также га-

зообразных соединений доноров – PH_3, PCl_3 или акцепторов – BBr_3, B_2H_6.

При высокой температуре (1200 $\pm$ 3 °С) на поверхности пластин происходит реакция

$$SiCl_4 + H_2 \rightarrow Si\downarrow + HCl\uparrow.$$

Образующиеся атомы кремния перемещаются по поверхности, занимая положения в узлах кристаллической решетки, вследствие чего растущая пленка продолжает кристаллическую решетку подложки. Атомы доноров (Р) или акцепторов (В) образуются также в результате химических реакции восстановления водородом или разложения (пиролиза).

Скорость роста пленки 0,1 – 1 мкм/мин зависит от температуры, содержания тетрахлорида кремния, скорости потока газа, кристаллографической ориентации поверхности. Вследствие высокой температуры примеси диффундируют из пленки в подложку и обратно. Это затрудняет создание резких переходов и тонких эпитаксиальных пленок (менее 0,5 мкм). Толщина пленок обычно составляет 1 – 15 мкм.

Более низкую температуру эпитаксии (1000 °С) имеет реакция разложения силана SiH_4:

$$SiH_4 \rightarrow Si\downarrow + H_2\uparrow,$$

но и в этом случае получить эпитаксиальные пленки тоньше 0,1 – 0,2 мкм невозможно.

Для получения очень тонких пленок (в несколько нанометров) и резких переходов используют *молекулярно-лучевую эпитаксию (МЛЭ)*. Она основана на взаимодействии молекулярных пучков с подложкой, имеющей не очень высокую температуру (600 – 800 °С), в условиях сверхвысокого вакуума (10^{-7} – 10^{-5} Па).

На рис. 4.8 показана эпитаксия пленки твердого раствора арсенида галлия-алюминия $Al_xGa_{1-x}As$ на подложке арсенида галлия.

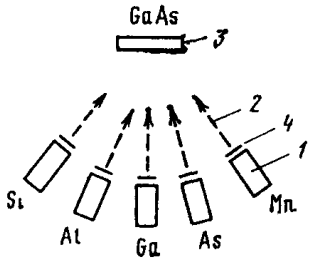


Рис. 4.8. Схема молекулярно-лучевой эпитаксии твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ на подложке GaAs

Несколько тиглей 1 содержат составные элементы пленки (Al, Ga, As) и легирующие примеси (Si – донор, Mn - акцептор). При нагревании эти вещества испаряются, образуя молекулярные пучки 2, и переносятся на подложку 3, конденсируясь на ней.

Подбором температуры источников и подложки получают пленки с нужным химическим составом. Время процесса и толщину пленок регулируют заслонками 4, прерывающими попадание пучков на подложку.

Этим методом выращиваются сверхтонкие (10 – 100 нм) эпитаксиальные пленки полупроводников, диэлектриков и металлов, создаются свехрешетки, осуществляется многослойная застройка решетки, то есть можно управлять составом пленки вплоть до моноатомных слоев. Поэтому это метод наноэлектронной технологии.

4.4. Термическое окисление. Свойства пленки двуокиси кремния

Двуокись кремния широко используется в технологии ИМС: для создания масок, используемых при проведении локальных технологических процессов, формирования подзатворного диэлектрика в МДП-структурах, создания изолирующих слоев и др.

Применение пленки SiO_2 в качестве маски при диффузии примесей основано на том, что коэффициент диффузии ряда примесей (P, B, As, Sb и др.) в ней значительно меньше, чем в кремнии. При ионном легировании маскирующие свойства пленки SiO_2 основано на том, что длина пробега ионов в пленке меньше ее толщины.

Пленка SiO_2 прозрачна, имеет блестящую стеклянную поверхность и при толщине в десятые доли микрометра окрашена вследствие интерференции света, отраженного от ее поверхности и поверхности кремния.

Двуокись кремния и кремний имеют близкие значения *температурного коэффициента расширения* (ТКР), благодаря этому при изменениях температуры не происходит механических повреждений пленки.

Диэлектрическая проницаемость двуокиси кремния SiO_2 составляет 0,3 пФ/см, а электрическая прочность – 600 В/мкм.

Термическое окисление проводится в эпитаксиальных или диффузионных установках: над поверхностью пластин пропускают газ-окислитель: кислород, водяной пар или их смесь (влажный кислород) при температуре 1000 – 1300 °С.

Скорость роста пленки в зависимости от температуры и содержания водяного пара в смеси может изменяться в пределах 0,05 – 1 мкм/час. Окисление в сухом кислороде характеризуется минимальной скоростью роста, однако такая пленка имеет высокое качество. На порядок более высокую скорость

окисления можно получить в водяном паре: при температуре 1000 °С пленка толщиной в 1 мкм вырастает за 10 мин. Недостатком такой пленки является пористость и дефектность. Компромиссное решение дает комбинированный процесс – окисление во влажном кислороде, изменяя соотношение между кислородом и водяным паром, можно в широких пределах регулировать скорость окисления.

Обычно окисление проводится по схеме «сухой - влажный – сухой» кислород.

Во многих схемах пленки SiO_2 выращивают локально. Для этого используется маска из нитрида кремния Si_3N_4 – рис. 4.9. Двуокись кремния растет вверх, вниз и в боковых направлениях (под маску) с одинаковой скоростью – рис. 4.9.б. Прорастание SiO_2 вглубь кристалла дает возможность использовать его для изоляции соседних слоев. Например, если после окисления p-Si удалить маску из нитрида кремния и провести неглубокое легирование донорами, то получатся изолированные друг от друга слои n-типа – рис. 4.9.в. Рост двуокиси в боковом направлении обуславливает характерную заостренную форму на краях , препятствующую получению малых расстояний между соседними изолированными областями, а рост вверх приводит к неровностям поверхности. Для получения ровной поверхности перед окислением вытравливают в кремнии канавки глубиной в половину толщины двуокиси кремния, используя ту же маску Si_3N_4.

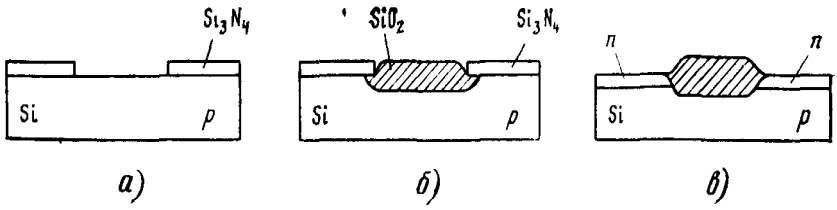


Рис. 4.9. Локальное окисление кремния

4.5. Травление

Травление – это удаление поверхностного слоя не механическим, а чаще всего химическим путем. Травление используют для получения максимально ровной бездефектной поверхности пластин, не достижимой механической обработкой; удаления двуокиси кремния и других слоев с поверхности. Локальное травление применяют для получения необходимого рельефа поверхности, формирования рисунка тонкопленочных слоев, а также масок.

Жидкостное травление. В основе его лежит химическая реакция жидкого травителя и твердого тела, в результате которой образуется растворимое соединение. Подбором химического состава, концентрации и температуры травителя можно обеспечить заданную скорость травления 0,1 – 10 мкм/мин и толщину удаляемого слоя.

Локальное травление осуществляется через маску.

Травление может быть изотропным и анизотропным.

Изотропное травление идет с одинаковой скоростью во всех направлениях – как вглубь, так и под маску. Пример такого травления – травление двуокиси кремния через маску фоторезиста 1 (рис.4.10).

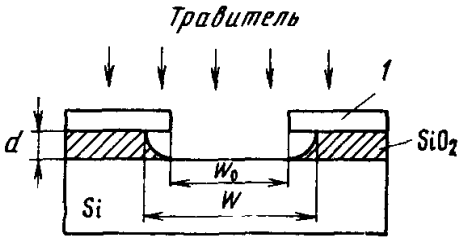


Рис. 4.10. Изотропное травление двуокиси кремния через маску фоторезиста

Основным компонентом травителя является плавиковая кислота HF. Размер W вытравленной области больше размера отверстия W_0 в маске на величину, превышающую удвоенную толщину d слоя двуокиси кремния:

$$W > W_0 + 2d.$$

В связи с этим жидкостное изотропное травление не позволяет получать в двуокиси кремния отверстия малых размеров. Так как этот слой является маской при легировании, то использование такой маски не позволит получить элементы ИМС малых размеров.

Жидкостное травление обладает высокой *избирательностью*, которая оценивается отношением скоростей травления требуемого слоя (например, SiO_2) и других слоев (например, кремния, фоторезиста).

Скорость химической реакции травителей зависит от кристаллографического направления в монокристалле. В приложении рассмотрена система обозначений направлений и плоскостей в кристалле, называемых индексами Миллера.

В кремнии скорость травления минимальна в направлении [111], так как в перпендикулярной ему плоскости (111) максимальна плотность атомов (количество атомов на единице площади поверхности). Плоскость (100) имеет значительно меньшую плотность атомов, поэтому скорость травления в направлении [100] в 10 – 15 раз больше, чем [111]. На этом основано *жидкостное анизотропное травление кремния*.

Анизотропию травления количественно оценивают отношением скоростей травления в различных направлениях.

Если пластина имеет ориентацию (100) и используется маска двуокиси кремния с прямоугольными отверстиями, стороны которых ориентированы по направлениям [110], параллельным плоскостям (111), то после травления образуется канавка, боковые стенки которой имеют ориентацию (111), то

есть перпендикулярны направлению, соответствующему наименьшей скорости травления. При малом времени травления канавка имеет плоское дно – рис. 4.11.а, со временем она углубляется и становится V-образной – рис. 4.11.б. После этого травление резко замедляется (практически останавливается), так как дальше оно идет в направлении [111], соответствующем минимальной скорости травления.

Угол α между стенками составляет около 70°. Глубина канавки d определяется размерами отверстия в маске W_0 :

$$d \approx 0{,}7\ W_0.$$

Если ориентация поверхности (110), то стенки канавок получаются вертикальными, так как они соответствуют ориентации (111) – рис. 4.11.в. Так можно сформировать канавки шириной менее 1 мкм и глубиной около 10 мкм.

Сухое анизотропное травление. Травление производится в вакуумной установке в плазме газового разряда. Различают ионное травление, плазмохимическое травление и реактивное ионное.

Ионное травление основано на физическом распылении материала при бомбардировке его ионами инертных газов.

Плазмохимическое травление основано на химическом взаимодействии активных частиц плазмы (ионов, атомов, молекул) с материалом, подвергающимся травлению.

Реактивное ионное травление представляет комбинацию первых двух методов.

Важнейшее достоинство сухого травления – его анизотропия: травление идет преимущественно в вертикальном направлении, в котором движутся частицы плазмы.

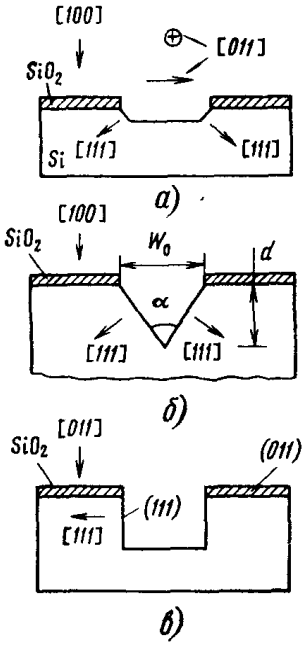


Рис. 4.11. Анизотропное травление кремния

Размер вытравленной области точно соответствует размеру отверстия в маске. На рис. 4.12 показано травление двуокиси кремния через маску фоторезиста 1. Такой процесс позволяет получать отверстия в SiO_2 меньших размеров, чем при жидкостном травлении. Количественно анизотропия оценивается отношением скоростей травления в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Ионное травление не обладает избирательностью. Поэтому несмотря на максимальную анизотропию использовать его для локального травления невозможно. Ионное травление применяют для очистки поверхности от загрязнений.

Плазмохимическое травление производится при давлении около 500 Па в плазме высокочастотного газового разря-

да. На поверхность пластины попадают ионы с малыми энергиями (100 эВ) и нейтральные химически активные атомы и молекулы. Анизотропия в этом случае мала – от 2 до 5, но обеспечивается высокая избирательность – до 50 при скорости травления 2 – 10 нм/с.

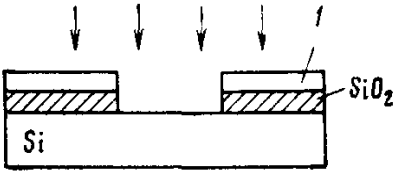


Рис. 4.12. Сухое анизотропное травление двуокиси кремния через маску фоторезиста

Максимальные преимущества сухого травления присущи реактивному ионному травлению. Оно производится при меньших давлениях (около 1 Па) и б льших энергиях ионов (до 500 эВ). Скорость химических реакций нейтральных атомов и молекул с материалом возрастает вследствие бомбардировки его ионами. При низких энергиях длина свободного пробега молекул намного больше глубины травления, а скорость взаимодействия газа с горизонтальной поверхностью пластины больше, чем с боковыми стенками углублений. С другой стороны химические реакции, ослабляя связи атомов на поверхности, способствуют физическому распылению материала ионами. Это обусловливает высокую анизотропию процесса (до 100) при хорошей избирательности (до 30) и достаточно высокой скорости 0,3 – 3 нм/с.

Для травления двуокиси кремния применяют газообразный четырехфтористый углерод CF_4 , который в плазме распадается на CF_2 и F. Последний взаимодействует SiO_2 с образованием SiF_4. Добавление H_2 обеспечивает избиратель-

ность травления SiO_2 по сравнению с кремнием, равную 35, и 10 – по сравнению с фоторезистами. Для травления кремния применяют CF_4 с добавлением O_2.

4.6. Нанесение тонких пленок

Тонкие пленки широко используются как в полупроводниковых, так и в гибридных ИМС. Они являются материалом проводников соединений, резисторов, конденсаторов, изоляции. Помимо требуемых электрофизических параметров пленки должны иметь хорошую *адгезию* (сцепление) к материалу, на который они наносятся, например, к кремнию и двуокиси кремния в полупроводниковых ИМС, к диэлектрической подложке или ранее нанесенной пленке в ГИС. Не все материалы имеют хорошую адгезию с подложками (например, золото с кремнием). Тогда на подложку сначала наносится тонкий подслой с хорошей адгезией, а на него – основной материал, имеющий хорошую адгезию с подслоем.

Важным требованием является близкое значение коэффициентов термического расширения (ТКР) пленок и подложек, что предотвращает повреждение пленок при колебаниях температуры.

Термическое вакуумное испарение (термическое вакуумное напыление). Наносимое вещество вместе с подложкой помещается в вакуумную камеру. В результате нагревания происходит испарение и осаждение вещества на подложке. скорость испарения и роста пленок сильно зависят от температуры. Осаждение происходит с достаточно высокой скоростью при достижении условной температуры испарения $T_{усл}$, при которой давление паров вещества равно 1,3 Па. В зависимости от температуры плавления вещества $T_{пл}$, могут выполняться разные условия: если $T_{усл} < T_{пл}$ (Cr, Mo,Si, W), то вещества интенсивно испаряются из твердого состояния; если $T_{усл} > T_{пл}$ (Al, Au, Pt), - то из жидкого.

Нагрев испаряемых материалов может быть прямой или косвенный: при прямом нагреве электрический ток пропускается через металлический материал, или используется индукционный нагрев, или нагрев электронной бомбардировкой. Косвенный нагрев происходит за счет теплопередачи от испарителя (тигля, спирали и др.). Осаждение ведется на подогретую подложку, температура которой 200 – 400 ℃. При слишком низкой температуре осаждаемые атомы не могут мигрировать по поверхности, при этом могут образовываться островки разной толщины. Слишком высокая температура вызывает обратное испарение осаждаемых атомов с подложки.

Высокий вакуум (10^{-4} – 10^{-5} Па) обеспечивает чистоту пленки. Время осаждения (от нескольких секунд до нескольких минут) регулируется заслонками, преграждающими доступ испаряемого вещества к подложке.

Недостатком этого метода является невысокая воспроизводимость параметров пленки из-за плохого контроля температуры и кратковременности процесса, а также невозможность воспроизведения химического состава испаряемого вещества (сплава или химического соединения) из-за разной скорости испарения входящих в него компонентов. Поэтому метод используется в основном для чистых металлов.

Распыление ионной бомбардировкой. Процесс производится в вакуумной камере, заполненной инертным газом (например, аргоном), котором возбуждается газовый разряд. Положительные ионы бомбардируют распыляемый материал (мишень), выбивая из него атомы или молекул, которые осаждаются на подложке. На пути к подложке выбитые атомы рассеиваются на атомах инертного газа. Это уменьшает скорость осаждения, но увеличивает равномерность осаждения пленки на подложке, этому способствует и большая площадь мишени. Скорость и время распыления (от нескольких минут до нескольких часов) регулируются напряжением на электродах и могут поддерживаться с высокой точностью.

По сравнению с термическим вакуумным испарением этот метод позволяет получать пленки тугоплавких металлов, наносить диэлектрические пленки, соединения и сплавы, точно выдерживать их состав; обеспечивать равномерность и точное воспроизведение толщины пленок на подложках большой площади. Распыление ионной бомбардировкой имеет несколько видов: катодное распыление, ионно-плазменное распыление и высокочастотное распыление.

а). При *катодном* распылении распыляемый материал (металл) является электродом катода 1 – рис. 4.13. На заземленном аноде 2 располагается подложка 3. Давление газа в камере 4 составляет 1 – 10 Па. На катод подается высокое отрицательное напряжение 2 – 5 кВ. Возникает газовый разряд, при котором образуется электронно-ионная плазма. Положительные ионы образуются из-за ионизации атомов газа электронами. Ионы, ускоряясь в сильном электрическом поле, выбивают из катода электроны, необходимые для поддержания разряда, а также атомы, которые диффундируют через газ, осаждаются на подложке. Если перпендикулярно электрическому полю E между катодом и анодом приложит постоянное магнитное поле B, то оно искривит траекторию электронов, вылетевших из катода.

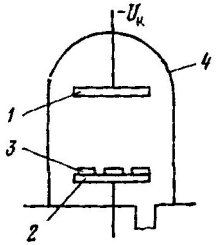


Рис. 4.13. Схема катодного распыления

Электроны, двигаясь к аноду по сложным петлеобразным траекториям, подобным траекториям электронов в магнетронах СВЧ (рис. 4.14) теряют энергию на ионизацию газа.

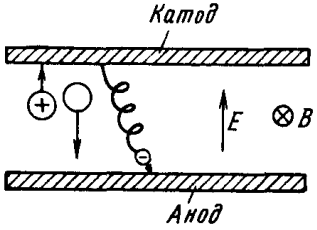


Рис. 4.14. Движение частиц в магнетронной распылительной системе:
⊖ - электрон, ⊕ - ион,
○ - атом, выбитый из катода

Увеличение длины пути электрона приводит к образованию большего числа ионов, чем в отсутствии магнитного поля, что способствует повышению скорости распыления или (при той же скорости) позволяет снизить давление газа и загрязнение пленки. В этом случае электроны достигают анода с малой скоростью, это снижает нагревание анода и предотвращает испарение осаждаемой пленки, устраняя возможность ее рекристаллизации и изменения химического состава. Описанная система называется магнетронной распылительной системой.

При реактивном катодном распылении в камеру вводится некоторое количество газа, образующему химические соединения с распыляемым материалом. Например, добавка кислорода при распылении тантала или кремния дает возможность получить диэлектрические пленки Ta_2O_5, SiO_2.

Недостатком катодного распыления является загрязненность пленок из-за сравнительно низкого вакуума, а также невозможность напыления через металлический трафарет (маску), так как он искажает электрическое поле у анода.

б). При *ионно-плазменном* напылении давление газа в камере $P \approx 10^{-2}$ Па значительно ниже, чем при катодном распылении, это уменьшает загрязнение пленок. Длина свободного пробега выбитых из мишени атомов превышает расстояние мишень – подложка, поэтому отсутствует рассеяние атомов, что повышает скорость осаждения. Получить большую концентрацию ионов в условиях пониженного давления можно, используя накаливаемый катод – источник электронов (рис. 4.15). В нижней части камеры 1 расположен вольфрамовый катод 2, а в верхней – анод 3, на который положительное напряжение составляет около 100 В. На мишень 4 подается высокое отрицательное напряжение 2 – 3 кВ. Напротив расположена подложка 5 с нагревателем 6. Для увеличения концентрации ионов прикладывается магнитное поле, направленное от анода к катоду. Электроны, вылетающие из катода под небольшими углами к вектору магнитного поля, двигаются к аноду по спиральным траекториям вокруг оси разряда, проходя путь, значительно больший расстояния катод – анод , создавая на этом пути гораздо больше ионов.

Степень ионизации газа на 1 – 2 порядка выше, чем при катодном распылении. Начало и конец процесса определяются подачей и отключением напряжения на мишени. Перед началом напыления проводится ионная очистка поверхности подложки (ионное травление). Аналогично можно провести очистку мишени. Очистка мишени и подложки способствует повышению чистоты пленок и хорошей адгезии к подложке.

В отличие от катодного распыления подложка не влияет на напряженность электрического поля и скорость распыления, это обеспечивает равномерность толщины пленки и возможность напыления через металлический трафарет, накла-

дываемый на подложку. В ГИС это дает возможность одновременно с напылением формировать рисунок пленки.

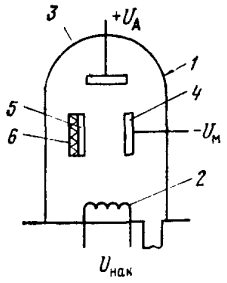


Рис. 4.15. Схема ионно-плазменного напыления

Рассмотренные методы распыления на постоянном токе применяют для напыления металлических и полупроводниковых материалов

На диэлектрической мишени попадающие на нее положительные ионы не могут нейтрализоваться электронами из внешней цепи, в результате потенциал мишени повышается и процесс прекращается.

в). Для распыления диэлектрических мишеней используется *высокочастотное* распыление, при котором на мишени периодически меняется знак потенциала. На установке, изображенной на рис. 4.15 это достигается тем, что мишень 4 представляет собой диэлектрический слой, нанесенный на металлическую пластину, на которую помимо постоянного подают переменное высокочастотное напряжение большой амплитуды. При отрицательном напряжении мишень бомбардируется положительными ионами и распыляется, при положительном – на мишень поступает поток электронов, нейтрализующих заряд ионов (при этом распыления не происходит вследствие малой массы и энергии электронов).

Химическое осаждение из газовой фазы - в технологии полупроводниковых ИМС используется для получения пленок поликристаллического кремния и диэлектриков SiO_2, Si_3N_4. Осаждение происходит в результате химической реакции в газовой фазе при повышенной температуре и осуществляется в эпитаксиальных или диффузионных установках.

Для осаждения поликремния на поверхность SiO_2 используется реакция пиролиза (разложения) силана:

$$SiH_4 \rightarrow Si + H_2,$$

которая протекает при T = 650 ℃.

Для осаждения двуокиси кремния используется окисление силана:

$$SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + H_2O,$$

протекающее при T = 200 – 350 ℃.

Нитрид кремния получают взаимодействием силана с аммиаком :

$$SiH_4 + NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + H_2$$

при T = 800 ℃.

К достоинствам осаждения из газовой фазы относятся простота, технологическая совместимость с другими процессами создания полупроводниковых ИМС (эпитаксией, диффузией), невысокая температура, благодаря чему отсутствует нежелательная разгонка примесей.

Скорость осаждения определяется температурой и концентрацией реагирующих газов в потоке нейтрального газаносителя и составляет несколько сотых долй микрометра в минуту.

4.7. Проводники соединений и контакты в полупроводниковых ИМС

Элементы ИМС соединяются между собой тонкопленочными проводниками. Предварительно в двуокиси кремния, покрывающей поверхность пластины, вытравливаются окна под контакты. Далее на всю поверхность наносится проводящая пленка, а затем ее травят через маску и формируют рисунок межсоединений.

Материал пленки должен обеспечивать омический контакт к кремнию; иметь низкое удельное сопротивление; хорошую адгезию к кремнию и двуокиси кремния; ТКР, близкий к ТКР кремния и двуокиси кремния; выдерживать высокую плотность тока. Контакт должен быть механически прочным, не подвергаться коррозии, не образовывать химических соединений с кремнием.

Металла, удовлетворяющего всем этим требованиям, не существует. Наиболее полно им отвечает алюминий, имеющий удельное сопротивление $2{,}6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Он наносится термическим вакуумным напылением.

После создания рисунка межсоединений производится вжигание контактов при 550 ℃ в течение 5 – 10 мин. На поверхности двуокиси кремния протекает реакция

$$Al + SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + Si,$$

улучшающая адгезию пленки к SiO_2. В местах контактных окон удаляются возможные остатки SiO_2; алюминий внедряется в кремний (его поверхностная концентрация составляет около $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$). Это улучшает контакт и адгезию.

Ввиду того, что алюминий является акцептором, контакт к областям p-типа всегда получается омическим. Для получения омического контакта к n-области концентрация доноров в ней должна быть выше, чем концентрация алюминия. При

низкой концентрации доноров в поверхностном слое может произойти перекомпенсация акцепторами, что приведет к инверсии проводимости (изменению типа проводимости с n- на p-тип) и образованию p-n перехода. Поэтому под контакт к алюминию в n-Si создается сильнолегированная n^+-область с концентрацией доноров около 10^{20} $см^{-3}$ – рис. 4.16.

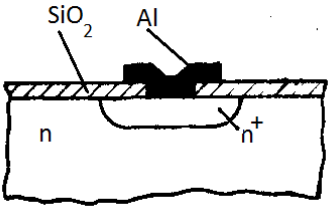


Рис. 4.16. Создание n^+-области под контакт алюминия к n-кремнию

В БИС и СБИС создаются несколько слоев межсоединений, разделенных слоями диэлектрика (обычно SiO_2), получаемых методом осаждения из газовой фазы. В двуокиси кремния вскрывают окна для контактов между проводниками соседних слоев.

Наиболее сложные схемы (СБИС) могут иметь до 9 - 12 слоев межсоединений, например, на рис. 4.17 показаны 8 слоев медных межсоединений.

Как материал первого слоя алюминий имеет ряд недостатков. В неглубоких p-n переходах (0,5 – 1 мкм) диффузия алюминия в кремний при термообработке может привести к замыканию (рис. 4.18).

Кроме того алюминий подвержен электромиграции – при высокой плотности тока и малой толщине пленки перенос атомов алюминия нарушает однородности пленки вплоть до ее разрывов.

Легкая окисляемость пленки Al с образованиемAl_2O_3 ухудшает контакты между слоями.

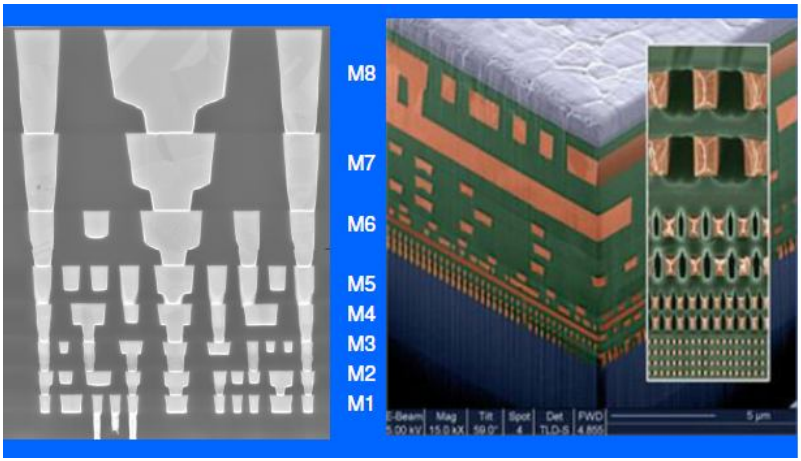


Рис. 4.17. Многослойные медные межсоединения

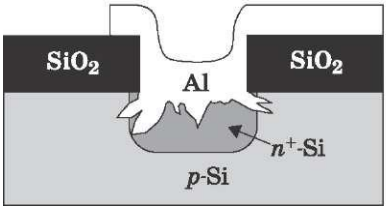


Рис. 4.18. Замыкание p-n перехода после термообработки алюминиевой металлизации

.

Поэтому в качестве проводников первого слоя используют легированный поликремний. Иногда используют два слоя: поликремний - снизу и металл - сверху. Недостатком поликремниевых проводников является их большой сопротивление. Оно снижается на порядок при использовании си-

лицидов тугоплавких металлов (Ta, W, Mo и др.), дающих хорошие омические контакты к кремнию, имеющих высокую адгезию к кремнию и двуокиси кремния. Однако в СБИС при большой длине межсоединений их сопротивление оказывается слишком значительным.

С повышением степени интеграции роль межсоединений возрастает: они занимают все большую площадь кристалла (60 – 85 %) и начинают влиять на основные параметры схем: площадь кристалла, быстродействие, показатель качества, помехоустойчивость, надежность и др. При ширине проводников около 0,1 мкм внутренние соединения «съедают» до 90 % сигнала по уровню и мощности. Если с уменьшением размеров быстродействие логических элементов возрастает, то быстродействие межсоединений системы металлизации снижается из-за уменьшения поперечного сечения проводников межсоединений и соответствующего увеличения погонного сопротивления, а также из-за уменьшения расстояния между соседними проводниками, заполненного диэлектриком, и соответствующего увеличения электрической емкости. В результате, начиная с некоторого уровня интеграции ИМС, задержки сигналов в межсоединениях могут превышать задержки в самих логических элементах.

С уменьшением поперечного сечения проводников межсоединений появляется и ряд других проблем: снижается электромиграционная стойкость проводников, значительно усложняются технологические приемы травления при создании рисунка проводников и др.

Это обусловило переход на медную металлизацию, так как из всех металлов медь обладает самой лучшей электропроводностью $\rho = 1{,}68 \cdot 10^{-6}$ Ом·см (за исключением серебра). Медная металлизация выдерживает в 5 раз большую плотность тока, чем алюминиевая (за счет лучшей электро- и теплопроводности и более высокой температуры плавления).

Главные преимущества меди как материала межсоединений перед алюминием — более низкое удельное сопротивление, что по оценкам дает 40% выигрыш в быстродействии, более высокая термическая стабильность и существенно меньшая склонность к электромиграции.

4.8. Литография

Литография – это процесс формирования отверстий (окон) в масках, создаваемых на поверхности пластины и предназначенных для проведения локальных технологических процессов (легирования, травления, окисления, напыления и др.).

Фотолитография. В технологии ИМС основную роль играет фотолитография, использующая светочувствительные полимерные материалы – *фоторезисты*, которые бывают позитивными и негативными.

Негативные фоторезисты под действием света полимеризуются и становятся нерастворимыми в специальных веществах – проявителях. После локальной засветки (*экспонирования*) растворяются и удаляются незасвеченные участки. Наибольшая чувствительность негативных фоторезистов соответствует длине волны света 0,28 мкм (ультрафиолет), поэтому экспонирование производится с помощью кварцевой лампы.

В позитивных фоторезистах свет разрушает полимерные цепочки: растворяются засеченные участки. Максимальная чувствительность лежит в видимом диапазоне спектра (до 0,45 мкм). Позитивные фоторезисты обеспечивают более резкие границы проявленных участков, чем негативные, то есть обладают повышенной разрешающей способностью, но имеют меньшую чувствительность и поэтому требуют большего времени экспонирования.

Рисунок будущей маски задается *фотошаблоном*. Это прозрачная (обычно стеклянная) пластина, на одной из сторон которой нанесена непрозрачная пленка (Cr, CrO_3, Fe_2O_3 и др.) требуемой конфигурации. В связи с групповыми методами создания микросхем на шаблоне создается матрица одинаковых рисунков, соответствующих отдельным микросхемам в масштабе 1 : 1 (рис. 4.19).

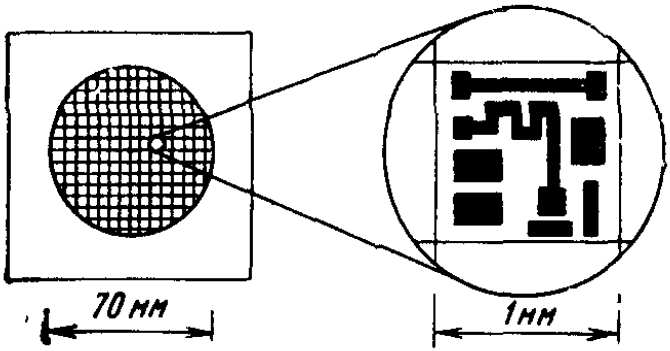


Рис. 4.19. Фотошаблон с матрицей одинаковых рисунков

Схема процесса фотолитографии показана на рис. 4.20.

Рассмотрим процесс фотолитографии на примере получения маски двуокиси кремния.

На окисленную поверхность кремниевой пластины наносят несколько капель раствора фоторезиста. С помощью центрифуги его распределяют тонким (около 1 мкм) слоем по поверхности пластины, а затем высушивают.

На пластину накладывают фотошаблон (ФШ) рисунком к фоторезисту (ФР) и экспонируют – рис. 4.21.а, затем его снимают. После проявления негативный фоторезист удаляется с незасвеченных участков – рис. 4.21.б, а позитивный – с засвеченных. Получается фоторезистивная маска, через кото-

рую далее травят слой двуокиси кремния, после чего фоторезист удаляют – рис. 4.21.в

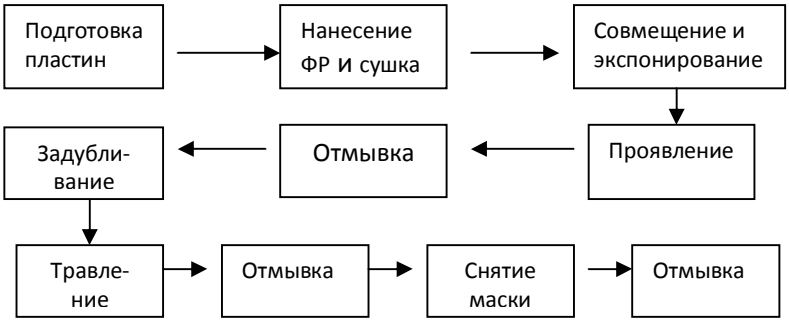


Рис. 4.20. Схема процесса фотолитографии

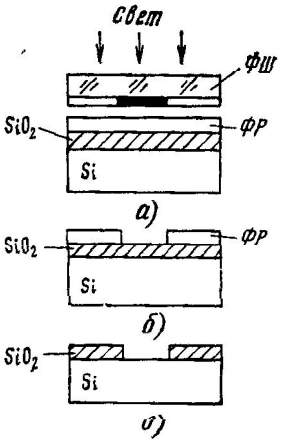


Рис. 4.21. Формирование рельефа с помощью негативного фоторезиста

Совмещение рисунков фотошаблона и пластины выполняют в два этапа. Грубое совмещение производят с помощью контрольных модулей – пустых кристаллов. Фотошаблон 1 (рис. 4.22) ориентируют относительно пластины 2 так, чтобы границы ячеек модулей 4 были перпендикулярны (или параллельны) базовому срезу 3 пластины. Точное совмещение производят с помощью специальных знаков совмещения – рис. 4.23, предусмотренных в рисунке каждого топологического слоя.

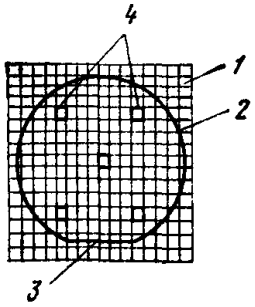


Рис. 4.22. Совмещение фотошаблона с пластиной

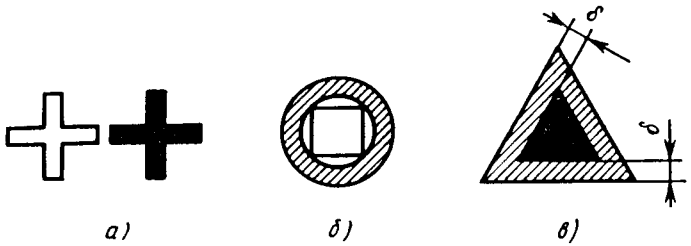


Рис. 4.23. Фигуры совмещения «линия – линия» (а), «точка – линия» (б) и с контролируемым зазором δ (в)

Важнейшим параметром фотолитографии является разрешающая способность. Ее оценивают максимальным числом линий, раздельно воспроизводимых в пределах 1 мм:

$$R = \frac{1000}{2\Delta},$$

где Δ - минимальная ширина линии, мкм. На практике разрешающую способность характеризуют величиной Δ. Она определяет минимальные размеры областей в кристалле или слоев на его поверхности и расстояния между ними, которые называются *топологическими размерами*. Физическим фактором, ограничивающим Δ, является дифракция света, не позволяющая получать Δ меньше длины волны света λ (для видимого света $\lambda \approx 0{,}5$ мкм). Обычно $\Delta > \lambda$ из-за изменений геометрических размеров фоторезиста, рассеяния света при экспонировании, несоответствия размеров в маске фоторезиста и основной маске и др.

Перспективные методы литографии. Литография с разрешающей способностью $\Delta \ll 1$ мкм (субмикронная), необходимая для СБИС, основывается на излучении с меньшей длиной волны.

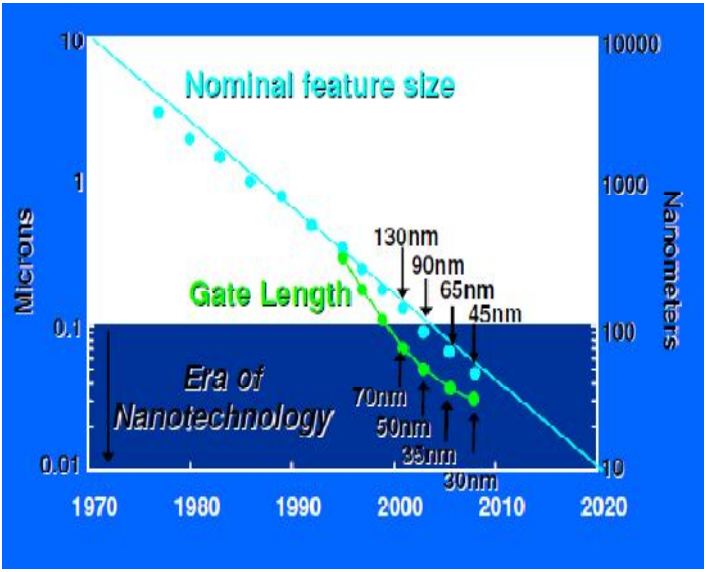
Рентгеновская литография использует мягкое рентгеновское излучение с $\lambda \approx 1$ нм. Ввиду того, что для рентгеновских лучей нет фокусировки, используется контактная литография. Шаблоном является тонкая мембрана, прозрачная для рентгеновских лучей, на нее нанесен тонкопленочный непрозрачный рисунок, выполненный в масштабе 1 : 1.

Электронно-лучевая литография использует облучение электронорезиста потоком электронов, длина волны которых $\lambda < 0{,}1$ нм. Она может быть проекционной и сканирующей. Поток электронов хорошо фокусируется, им можно управлять с помощью ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1965 г. и по настоящее время полупроводниковая электроника бурно развивается. Ее базовым материалом является кремний. Он прекрасно обрабатывается, обеспечивает получение субмикронных схемных элементов, является химически стабильным, как и формируемые на нем приборные структуры.

Кремниевая технология является основной в современной полупроводниковой технологии. Она уже используется в наноэлектронике: минимальный топологический размер Δ, достигнутый в 2010 г. – 32 нм, в 2012 г. – 22 нм, в 2014 г. прогнозируют получить Δ = 14 нм, а в 2018г. – 10 нм. Динамика уменьшения топологических размеров отражена на рисунке.



Динамика уменьшения топологических размеров по годам

Таким образом кремниевая технология перспективна до $\Delta = 10$ нм.

Переход к диапазону 1 – 10 нм требует применения новых принципов, методов и материалов для создания наноэлектронных устройств.

В журнале «В мире науки» приведено такое сравнение. Если темпы развития микроэлектроники (стоимость, быстродействие, экономичность) перенести на авиапромышленность, то самолет бы стоил 500 долларов, совершить облет земного шара можно было за 20 минут, затрачивая на это менее 20 л топлива.

Одной из специфических особенностей микро- и наноэлектроники является высокая наукоемкость, использующая новейшие достижения физики, химии, биологии и других наук. Проектирование, технология изготовления и функционирование микро- и наноэлектронных систем основаны на фундаментальных законах природы, управляющих электронными и атомными процессами в материальных объектах.

Специалисту в области микро- и нанотехнологии глубокое изучение законов фундаментальных наук позволит легко осмысливать и осознанно использовать в профессиональной деятельности любые новации современной техники.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Индексы Миллера

Пусть плоскость отсекает на осях координат отрезки OA, OB и OC (в единицах периода решетки). Рассчитаем обратные им величины H = 1/OA, K = 1/OB, L = 1/OC и определим наименьшие целые числа с таким же соотношением, как H : K : L = h : k : l. Целочисленные (hkl) называются индексами Миллера плоскости.

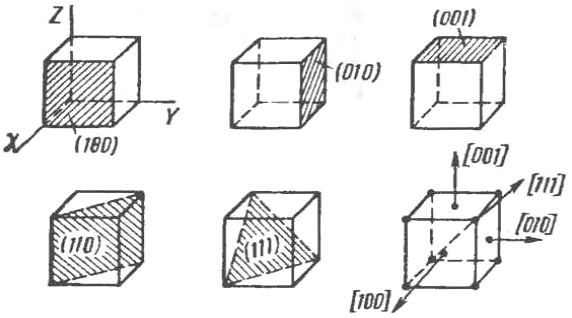
В кубических кристаллах индексы (100) относятся к плоскости, параллельной осям *Y* и *Z;* индексы (010) — к плоскости, параллельной осям *X* и Z, а (001) — к плоскости, параллельной осям *X* и *Y.* В кристаллах с ортогональными осями эти плоскости вместе с тем перпендикулярны соответственно осям *X*, *Y и Z.*

Для обозначения направлений в кристалле применяют индексы в виде наименьших целых чисел, относящихся между собой как компоненты вектора, параллельного данному направлению. В отличие от обозначения плоскостей их пишут в квадратных скобках. В кубических кристаллах эти направления перпендикулярны плоскости с теми же индексами. Положительное направление оси X обозначают [100], положительное направление оси *Y* — [010], отрицательное направление оси *Z* — [001], диагональ куба — [111] и т.д. Обозначения кристаллографических плоскостей и направлений приведены на рисунке.

Плоскости, отсекающие равные отрезки, но расположенные в других октантах, эквивалентны в кристаллографическом и физико-химическом отношениях. Они образуют совокупность эквивалентных плоскостей – {hkl} или систему плоскостей, у которых h, k, l могут быть записаны в любом порядке и с любым числом минусов перед индексами. Минус записывается над индексом.

Положение направления в пространственной решетке может быть легко определено координатами атома, ближайшего к началу координат и лежащего на данном направлении. Координаты этого узла [[hkl]] и будут индексами Миллера этого направления [hkl].

Совокупность эквивалентных направлений или система направлений обозначается <hkl>, где h, k, l могут быть записаны в любом порядке и с любым числом минусов: <100> - совокупность направлений, параллельных всем ребрам куба; {100} - совокупность плоскостей, параллельных всем граням куба.



Примеры обозначения кристаллографических плоскостей и направлений в кубических кристаллах с помощью индексов Миллера

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щука А.А. Электроника: учеб. пособие / А.А. Щука. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

2. Аваев Н.А. Основы микроэлектроники / Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, В.Т. Фролкин. М.: Радио и связь, 1991.

3. Парфенов О.Д. Технология микросхем / О.Д. Парфенов. М.: Высш. шк., 1986.

4. Лозовский В.Н. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность / В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. СПб.: Лань, 2008.

5. Пасынков В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. СПб.: Лань, 2003

6. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. Кн.1. Общая технология / И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов, Ю.С. Чернозубов, А.С. Пономарев. М.: Высш.. шк., 1989.

7. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ 4
1.1. Исторический обзор 4
1.2. Полупроводниковые ИМС 9
1.3. Основные принципы интегральной технологии 13
1.4. Гибридные и совмещенные интегральные схемы 17
1.5. Степень интеграции 20
2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ 22
2.1. Собственные и примесные полупроводники 22
2.2. Контакт электронного и дырочного полупроводников (p-n переход) 29
3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС. ТИПЫ СТРУКТУР ИМС 32
3.1. Основные этапы технологии ИМС 32
3.2. Выбор полупроводникового материала 32
3.3. Получение полупроводникового материала 33
3.4. Получение полупроводниковых пластин 36
3.5. Получение эпитаксиальных структур 38
3.6. Методы формирования элементов ИМС 39
3.7. Общая характеристика технологического процесса производства ИМС 41
3.8. Типы структур ИМС 43
3.9. Требования к кремниевым пластинам 56
3.10. Схема технологического процесса 57
3.11. Микроклимат и производственная гигиена 60
4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ 64
4.1. Термическая диффузия примесей 64

4.2. Ионное легирование 69
4.3. Эпитаксия 74
4.4. Термическое окисление. Свойства пленки двуокиси кремния 77
4.5. Травление 79
4.6. Нанесение тонких пленок 84
4.7. Проводники соединений и контакты в полупроводниковых ИМС 91
4.8. Литография 95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 100
ПРИЛОЖЕНИЕ 102
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 104

Учебное издание

Новокрещенова Елена Павловна

ВВЕДЕНИЕ
В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ

В авторской редакции

Подписано к изданию 20.11.2012

Объем данных 3,03 Мб

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14