

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М. Н. Романовский

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ЧАСТЬ 1. ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Учебное пособие
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2022

УДК 621.382
ББК 32.844
Р69

Рецензент:

Еханин С. Г., профессор кафедры конструирования узлов и деталей РЭА,
доктор физ.-мат. наук

Автор:

М. Н. Романовский

Романовский Михаил Николаевич

Р69 Интегральные устройства радиоэлектроники. Часть 1. Основные структуры полупроводниковых интегральных схем. Учебное пособие для вузов / М. Н. Романовский. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 91 с.

Рассмотрены материалы, технология изготовления, модели основных структур полупроводниковых интегральных схем.

Одобрено на заседании каф. КУДР протокол № 233 от 17 февраля 2022 г.

УДК 621.382
ББК 32.844

© Романовский М.Н., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.1 Миниатюризация радиоэлектронных средств.....	5
1.2 Классификация интегральных схем	6
1.3 Сущность технологии полупроводниковых интегральных схем	8
1.4 Основные направления функциональной электроники.....	10
2 ПОДЛОЖКИ	11
2.1 Разновидности подложек.....	11
2.2 Полупроводниковые материалы	12
2.3 Механическая обработка подложек	14
3 ОЧИСТКА И ТРАВЛЕНИЕ ПОДЛОЖЕК	15
3.1 Виды загрязнений и очистки.....	15
3.2 Жидкостная обработка.....	16
3.3 Сухое травление	18
4 ПРОВОДЯЩИЕ СЛОИ.....	20
4.1 Назначение и материалы	20
4.2 Получение проводящих слоев физическими методами	23
4.3 Получение проводящих слоев химическими методами	29
5 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЛОИ	31
5.1 Диффузия примесей.....	31
5.2 Ионное легирование.....	36
5.3 Эпитаксиальное наращивание	41
6 ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ И КВАНТОВЫЕ РАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ	49
6.1 Полупроводниковые гетеропереходы	49
6.2 Квантовые ямы, нити и точки	51
6.3 Сверхрешетки	54
7 ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ	56
7.1 Назначение и материалы	56
7.2 Методы получения	57
7.3 Параметры качества диэлектрических пленок.....	65
7.4 Защитные покрытия	67
8 ЛИТОГРАФИЯ.....	68
8.1 Фотолитография	68
8.2 Повышение разрешающей способности фотолитографии	74
8.3 Другие виды литографии.....	77
9 МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР	84
9.1 Сущность проектирования интегральных схем	84

9.2 Технологические модели.....	86
9.3 Физико-топологические модели.....	86
9.4 Электрические модели.....	89
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	90

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Миниатюризация радиоэлектронных средств

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) характеризуются значительной функциональной сложностью. Процесс создания РЭС направлен, прежде всего, на предельное уменьшение их габаритных размеров и масс, повышение надежности, снижение потребления энергии и стоимости. Начиная с конца 50-х годов прошлого века, эта тенденция получила название миниатюризации РЭС, а в отношении интегральных схем (ИС) – микроминиатюризации.

Вопреки расхожему восприятию, уменьшение габаритных размеров и масс РЭС не является самоцелью миниатюризации: суть миниатюризации - в повышении функциональных возможностей Φ с течением времени t , что может происходить при относительном постоянстве габаритных размеров G и масс M^1 :

$$\Phi = \Phi_0 \exp(\eta t): \{G, M\}^{-\chi} \approx \text{const}, \quad (1.1)$$

где Φ_0 – отсчетная характеристика;

η – параметр, характеризующий степень «технической эволюции»;

χ – параметр технологичности.

Из формулы следует, что значительное увеличение Φ при одновременном – и тоже значительном – уменьшении G и M наблюдается при технических скачках: переход от ламповой аппаратуры к полупроводниковой, от последней к ИС, далее – использование функциональных устройств (см. рис. 1.1 [1]). При таких переходах скачкообразно возрастает значение параметра технологичности χ . Затем Φ растет со временем по определенным законам, например, по закону Мура для ИС (рис. 1.2).

Изучением, разработкой и изготовлением РЭС в микроминиатюрном исполнении занимается микроэлектроника (интегральная электроника). В основу микроэлектроники положен схемотехнический принцип, заключающийся в использовании обычных методов реализации узлов и блоков РЭС на базе радиоэлементов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и др.) и разработке электрических схем на основе теории цепей. Отличие от традиционных методов состоит в том, что в ИС элементы объединяются (интегрируются) в объеме полупроводника или на поверхности подложки.

Функционирование ИС основано на свойствах статических неоднородностей (потенциальных барьеров) – локальных областей на поверхности или в объёме кристалла, создаваемых в результате определённых технологических процессов. Функциональная электроника, в отличие от интегральной, основывается на использовании в качестве носителей информационного сигнала динамических неоднородностей, обеспечивающих не схемотехнические принципы работы приборов и устройств. Такие неоднородности генерируются в континуальных (непрерывных) средах, как правило, в твёрдом теле в процессе функционирования устройства и могут иметь самую различную физическую природу. Например, в полупроводниковых приборах с зарядовой связью (ПЗС) используются неоднородности в виде зарядовых пакетов электронов или дырок, в акустоэлектронных устройствах – поверхностные волны деформации и т. д. Статические неоднородности и различные схемы обрaмления в устройствах функциональной электроники играют вспомогательную роль.

¹ Афромеёв В. И. Физические основы создания миниатюризованной высокочастотной медико-биологической аппаратуры нетепловой интенсивности и использование биоинформационных аналогий // Вестник новых медицинских технологий. – 1997. – Т. 4. – Вып. 3. – С. 12 – 15.

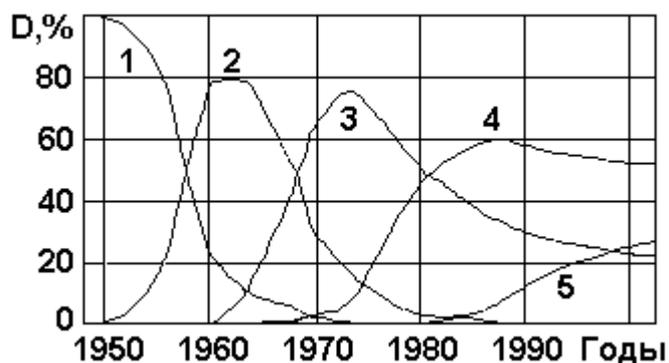


Рисунок 1.1 – Доля электровакuumных приборов (1), дискретных полупроводниковых приборов (2), ИС на биполярных транзисторах (3), ИС на полевых транзисторах (4), устройств функциональной электроники (5)

Отметим, что устройства функциональной электроники (ПЗС и многие др.) изготавливаются с помощью методов и процессов, которые возникли и развиваются в технологии полупроводниковых приборов и ИС. Интегральные устройства радиоэлектроники – это ИС и технологически совместимые с ними функциональные устройства. Для ИС характерна технологическая интеграция, для функциональных устройств – интеграция параметрическая.

1.2 Классификация интегральных схем

ИС классифицируют по конструктивно-технологическому исполнению, степени интеграции, функциональному назначению, частотному диапазону и по др. признакам [2-4].

В зависимости от технологии изготовления ИС подразделяются на полупроводниковые (монокристалльные) и гибридные. Иногда в классификации такого рода особо выделяют пленочные и совмещенные ИС.

Полупроводниковые ИС состоят из активных и пассивных элементов, изготовленных в одном монокристалле полупроводника. Часть соединений в такой схеме может быть осуществлена в объеме, а часть – на защитном слое кристалла. Технологической базой развития данного направления послужила разработка и освоение групповых методов изготовления планарных и планарно-эпитаксиальных транзисторных структур. Использование групповых методов позволяет в едином технологическом цикле обрабатывать несколько десятков полупроводниковых пластин диаметром до 300 мм. В каждой из пластин формируется одновременно несколько десятков – сотен ИС, которые содержат до 10^6 и более элементов, связанных в заданные электрические цепи. Групповая технология изготовления ИС обеспечивает идентичность их характеристик.

Полупроводниковые ИС обладают высокой надежностью, что обусловлено уменьшением числа сварных контактов за счет системы межэлементных соединений на поверхности полупроводникового кристалла. Недостатки полупроводниковых ИС связаны с тем, что в полупроводниковом материале трудно получать пассивные элементы с заданными номинальными значениями. Кроме того, они имеют низкую температурную стабильность, что усложняет конструирование, и сильные паразитные связи между элементами, вызывающие ухудшение качества схем.

Несмотря на отмеченные недостатки, полупроводниковые ИС уже длительное время относятся к числу наиболее перспективных изделий микроэлектроники, т. к. позволяют создавать надежные малогабаритные и сложные в функциональном отношении устройства. При использовании хорошо отработанных технологических методов изготовления полупроводниковые ИС оказываются значительно надежнее и дешевле схем из навесных элементов. Полупроводниковые ИС выпускаются промышленностью на основе биполярных структур и структур металл – диэлектрик – полупроводник (МДП).

Технология изготовления гибридных ИС основана на последовательном нанесении пленочных пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, внутрисхемных соединений) на единую изолирующую подложку с последующим подсоединением компонентов – бескорпусных полупроводниковых приборов или ИС в виде отдельных навесных деталей. Технология гибридных ИС сравнительно проста и требует меньших, чем полупроводниковая технология, начальных затрат на оборудование, помещения, подсобные службы. При мелкосерийном производстве гибридные ИС дешевле полупроводниковых (при одной и той же функциональной сложности). Весьма важными достоинствами гибридных ИС является возможность создания высококачественных и стабильных пассивных элементов.

По технологическому принципу изготовления гибридные ИС подразделяются на толсто- и тонкопленочные². Элементы тонкопленочных ИС (толщина пленок до 1 мкм) изготавливаются преимущественно вакуумными методами, толстопленочных (с толщиной пленок 10-70 мкм) – методами трафаретной печати (сеткографии).

В так называемых совмещенных ИС все активные элементы изготавливают в объеме монокристалла полупроводника, а пассивные элементы и межэлементные соединения – на его поверхности. Технология совмещенных микросхем позволяет создавать высококачественные и активные, и пассивные элементы, т. к. объединяет достоинства методов, применяемых при изготовлении пленочных и полупроводниковых ИС. Вторым признаком классификации – степень интеграции ИС – характеризуется числом содержащихся в ней элементов и компонентов: $K = \lg N$, где K – коэффициент, округляемый до ближайшего (большего) целого числа; N – число элементов и компонентов, входящих в микросхему. По степени интеграции ИС подразделяются на обычные ($K = 1 \div 3$), большие (БИС, $K = 3 \div 4$), сверхбольшие интегральные схемы (СБИС, $K = 4 \div 6$) и интегральные системы, например микропроцессоры (5105 приборов и более на одном кристалле). Наибольшей степенью интеграции обладают полупроводниковые ИС, затем тонкопленочные и, наконец, толстопленочные. Полупроводниковые ИС на биполярных транзисторах по степени интеграции уступают ИС на МДП-транзисторах.

По частотному диапазону ИС делятся на низкочастотные (до 300 кГц), высокочастотные (до 300 МГц), сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц). В последние годы появились сверхскоростные СБИС (С2БИС). Критериями быстродействия таких ИС являются: время задержки распространения сигнала для цифровых микросхем не более 2,5 нс на логический элемент, нижняя граница диапазона рабочих частот для аналоговых микросхем свыше 300 МГц. Отметим, что сверхвысокочастотная микроэлектроника по темпам развития, широте охвата и разнообразию приложения технологических методов резко выделяется среди др. направлений, а по возможностям практического использования сравнима только с разработкой ИС для ЭВМ.

По функциональному назначению ИС подразделяются на аналоговые и цифровые. Кроме того, различают микросхемы общего и специального назначения.

В 80-х годах прошлого века совершенствование методов получения полупроводниковых слоев и формирования «рисунка» ИС позволило перейти от микронных толщин слоев и линейных размеров отдельных элементов к нанометровым. По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области, все больше проявляются квантовые (волновые) свойства электрона. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов и др. активных элементов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой открывает перспективы создания новых уникальных переключающих, запоминающих и

² Иногда особо выделяют еще и приборы вакуумной микроэлектроники, которые выполняются либо в виде пленочных ИС с навесными микроминиатюрными электровакуумными приборами, либо в виде полностью вакуумных узлов.

усиливающих элементов [5, 6]. Последние являются основным объектом исследований и разработок нового этапа развития микроэлектроники – нанoeлектроники.

Приборы и структуры нанoeлектроники, сопоставимые по размерам с электронной длиной волны де Бройля, получили название мезоскопических³. Они могут быть реализованы как на основе полупроводников, так и на основе металлов и сверхпроводников. Исследования в этой области в настоящее время носят, главным образом, фундаментальный характер. Вместе с тем, уже существует большое число перспективных приборов нового поколения, принцип действия которых (в отличие от традиционных приборов микроэлектроники) основан на волновой природе электрона (резонансные туннельные диоды и транзисторы и др.). Обсуждаются проблемы создания квантовых ИС, основными элементами которых могут быть транзисторные структуры на основе квантовых размерных эффектов и управляемой интерференции электронов [5-7].

1.3 Сущность технологии полупроводниковых интегральных схем

Технология ИС представляет собой совокупность физических и химических способов групповой обработки различных материалов - полупроводников, металлов, диэлектриков. В классической планарно-эпитаксиальной технологии кремниевых ИС используются следующие основные операции [2-4]: окисление, травление, литография, диффузия, ионное легирование, эпитаксия, осаждение пленок.

Окисление. Исходную кремниевую пластину нагревают до 800 – 1200 °С и подвергают воздействию кислорода (или паров воды). В окислительной среде атомы кремния на поверхности пластины взаимодействуют с кислородом с образованием тонкого диэлектрического слоя SiO₂. На начальных этапах изготовления ИС слой SiO₂ толщиной до 1 мкм используют как маску для проведения избирательной диффузии на участках пластины, не покрытых SiO₂. Маска предотвращает диффузию примесей в полупроводник, находящийся под SiO₂, т. к. коэффициент диффузии примесей в SiO₂ много меньше, чем в полупроводнике. Слои SiO₂ используют также в качестве диэлектрика для изоляции затворов МДП – структур и для пассивации и защиты кристалла - предохранения ИС от воздействия окружающей среды.

Травление. Для проведения селективной (избирательной) диффузии окна требуемых размеров в слое SiO₂ вытравливаются при помощи травителей на основе плавиковой кислоты.

Литография. «Рисунок» окон в слое SiO₂ формируют методом фотолитографии. При этом поверх SiO₂ на пластину наносят фоторезист, представляющий собой тонкую пленку светочувствительного органического материала. Затем накладывается фотошаблон в виде стеклянной маски, на которой имеется рисунок, состоящий из прозрачных и непрозрачных областей. Через маску фоторезист подвергается облучению ультрафиолетовыми лучами, в результате чего под действием проявителя удаляются либо экспонированные области (позитивный резист), либо неэкспонированные (негативный резист). При травлении в плавиковой кислоте фоторезист не растворяется, поэтому окна в слое SiO₂ вскрываются только на участках, не защищенных фоторезистом.

Диффузия. Пластины нагревают до 800 – 1250 °С и над их поверхностью пропускается газ, содержащий примесь. Другой вариант процесса предполагает предварительное осаждение примеси на поверхность пластины (например, в виде фосфо- или боросиликатного стекла) и собственно диффузию. Области, предварительно защищенные SiO₂, остаются нелегированными. Глубину залегания диффузионного слоя и его сопротивление регулируют путем изменения режима диффузии (температуры и длительности). Применяют для легирования пластин с целью формирования р- и n-слоев, образующих эмиттер, базу, коллектор биполярных транзисторов, сток, исток, канал униполярных транзисторов, резистивные слои, а также изолирующие р-n - переходы.

³ От греческого mesos - промежуточный (уже не макро-, но еще и не микроскопический).

Ионное легирование (имплантация). Ионы примеси с энергией 80 – 300 кэВ направляют на подложку, защищая при помощи маски те участки, которые не должны подвергаться легированию. Главное достоинство этого метода заключается в достижении высокой точности глубины проникновения легирующей примеси благодаря хорошей управляемости процессом.

Эпитаксия. Применяют для выращивания на поверхности пластин полупроводниковых слоев с проводимостью n- или p-типа. Такие слои толщиной несколько микрометров образуются при пропускании над нагретой до 1250 °С подложкой потока газа, содержащего несколько соединений. На поверхности пластины эти соединения вступают в химическую реакцию с образованием эпитаксиального слоя. Структура эпитаксиального слоя повторяет структуру подложки, но характеризуется обычно меньшим количеством дефектов.

Осаждение пленок. После вытравливания в слое SiO₂ с помощью фотолитографии окон под контакты на всю поверхность пластины в вакууме наносят алюминиевую пленку. Затем проводят фотолитографию и формируют рисунок межсоединений. Подобным образом формируют также металлические площадки, к которым присоединяются выводы микросхемы.

Все технологические операции изготовления ИС можно объединить в 4 группы: 1) получение исходных пластин; 2) формирование на пластинах слоев различных материалов; 3) создание рельефа (рисунка) топологии ИС; 4) сборка и монтаж ИС. Операции второй и третьей групп выполняются неоднократно.

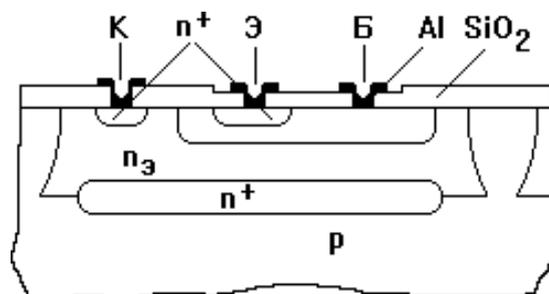


Рисунок 1.3 – Структура интегрального транзистора: К -коллектор; Э - эмиттер; Б – база

На рис. 1.3 показана планарно-эпитаксиальная транзисторная структура с изолирующим p-n-переходом. Технологический процесс изготовления таких структур включает 6 операций нанесения фоторезиста с последующим травлением для локализации: 1) захороненного n⁺-слоя; 2) изолирующих p-областей; 3) базовых p-областей; 4) эмиттеров (n⁺-типа); 5) окон для омических контактов; 6) мест, с которых нужно удалить металл при формировании межэлементных соединений. Рассмотрим последовательность основных операций изготовления таких структур более подробно.

1. Исходную кремниевую пластину p-типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см после надлежащей механической и химической обработки подвергают первой операции окисления.

2. С использованием соответствующего шаблона (маски) проводят фотолитографию и в слое SiO₂ вытравливают окна для диффузии мышьяка или фосфора, формирующей скрытые («захороненные») коллекторные слои. Эти слои представляют собой сильно легированные участки с n⁺-проводимостью и служат для уменьшения сопротивления коллектора.

3. Со всей поверхности пластины удаляют слой SiO₂ и наращивают эпитаксиальный слой высокоомного кремния n-типа. При этом примесь из n⁺-области частично проникает в растущий эпитаксиальный слой, ввиду высокой температуры проведения процесса.

4. Пластины вновь окисляют и после фотолитографии (шаблон 2) проводят диффузию бора для создания изолирующих p-n-переходов. При этом подбирают такой режим диффузии, чтобы изолирующий p⁺-слой проник через эпитаксиальную пленку до поверхности подложки только после проведения всей совокупности термических операций. Изолирующую диффузию обычно проводят в окислительной среде, поэтому одновременно с диффузией бора в кремний происходит образование на поверхности пластины нового слоя SiO₂.

5. В слое SiO_2 с помощью фотолитографии (шаблон 3) вскрывают окна, через которые осуществляют предварительную диффузию бора («загонку») для формирования базовых областей.

6. Проводят диффузию фосфора через окна, сформированные на участках эмиттеров и коллекторных контактов (шаблон 4). Одновременно происходит перераспределение («разгонка») базовой примеси.

7. Проводят окисление поверхности пластины, с помощью фотолитографии в слое SiO_2 вытравливают окна под контакты (шаблон 5) и методом термического испарения в вакууме на всю поверхность пластины наносят пленку алюминия.

8. Алюминий удаляют с участков, на которых он не нужен, с помощью фотолитографии (шаблон 6), затем осуществляют золочение нижней стороны пластины (если требуется).

После формирования всех слоев и рисунков ИС на пластине, каждая ИС проходит контроль на соответствие заданным электрическим параметрам, и пластину разделяют на кристаллы. Затем производят монтаж каждого годного кристалла на основание или выводную рамку корпуса, присоединяют выводы и герметизируют ИС.

С увеличением степени интеграции ИС растет стоимость изготовления кристаллов (особенно с учетом процента выхода годных), но падают затраты на сборку по отношению к одному элементу, поэтому существует минимум затрат на один элемент [1].

1.4 Основные направления функциональной электроники

Функциональная электроника основывается на принципах физического моделирования, реализуемых с помощью физической интеграции динамических неоднородностей в континуальных средах, преимущественно в твердом теле [8, 9]. Динамические неоднородности различного вида и различной физической природы в однородном объеме твердого тела выступают непосредственными носителями информации и создаются под действием внешних факторов в процессе функционирования устройства.

Используются оптические, магнитные явления, сверхпроводимость, фазовые переходы, электрон-фононные взаимодействия, плазменные явления, инжекционные процессы, явления живой природы, различные комбинации физических явлений и процессов в континуальных средах. В силу этого, методами функциональной электроники может быть реализована практически любая функция передачи и отображения информации.

В зависимости от типа динамической неоднородности, континуальной среды, той или иной комбинации физических полей или явлений различают направления в функциональной электронике: функциональная оптоэлектроника, квантовая электроника, акустоэлектроника, биоэлектроника, молекулярная электроника, магнитоэлектроника, диэлектрическая электроника, криоэлектроника, хемотроника. Объединяющим их признаком является динамическая неоднородность как носитель, транслятор или хранитель информации.

В устройствах функциональной электроники для обработки информации в качестве элементарных могут использоваться функции высшего порядка (преобразование Фурье; интегральное преобразование Лапласа; операции свертки, корреляции, автокорреляции, управляемой задержки, фильтрации, когерентного сложения, ответвления, комбинированной обработки сигналов и др.). В то же время, в них могут быть реализованы и обычные элементарные логические функции, а также их различные комбинации.

В активной среде прибора функциональной электроники может храниться и одновременно обрабатываться большой объем информации в аналоговом виде. Так, например, акустооптический процессор обеспечивает эффективную производительность 10^{10} – 10^{12} операций в секунду, в то время как специальные ИС быстрого преобразования Фурье – не более $2,5 \cdot 10^8$. Выигрыш нескольких порядков в производительности весьма существенен.

Элементами наиболее общей модели устройств функциональной электроники являются [9]: 1) собственно динамические неоднородности; 2) канал их распространения; 3) генератор; 4) устройство управления динамическими неоднородностями; 5) детектор.

Генератор предназначен для ввода динамических неоднородностей в канал распространения, расположенный в континуальной среде; генерироваться динамические неоднородности могут как в самом канале, так и за его пределами. Физикохимические свойства континуальной среды должны быть достаточно однородны на всём пути распространения информационного сигнала. Статические неоднородности, имеющиеся на поверхности или внутри среды, служат для управления динамическими неоднородностями и не используются для обработки и хранения информации. Вывод или считывание информации осуществляется с помощью детектора.

Обычно в условиях термодинамического равновесия динамические неоднородности не меняют физико-химических свойств континуальной среды. В противном случае, возможно образование статических неоднородностей, представляющих собой «замороженные» биты информации.

Рассмотренная модель прибора функциональной электроники позволяет развить системный подход к анализу известных конструктивных решений – прототипов приборов, раскрыть физическую сущность явлений, лежащих в основе работы приборов, оптимизировать известные конструкции по техникоэкономическим параметрам, а также разработать прогнотип - новое, ранее неизвестное конструктивное решение с заданными технико-экономическими показателями [9].

Для широкого развития функциональной электроники необходимы [8]: разработка физических основ динамических неоднородностей, методов измерения их основных физических характеристик; поиск и синтез новых материалов, активных сред, перспективных для формирования в них динамических неоднородностей; разработка инженерных методов расчета и конструирования устройств функциональной электроники; совершенные бездефектные материалы.

2 ПОДЛОЖКИ

2.1 Разновидности подложек

Для полупроводниковых ИС используют, как правило, монокристаллические подложки с высоким структурным совершенством и степенью чистоты. В зависимости от удельной электропроводности подложки подразделяют на две большие группы: проводящие (полупроводниковые) и непроводящие (диэлектрические) [2-4].

Использование непроводящих подложек существенно уменьшает паразитные связи между элементами, повышает устойчивость ИС к воздействиям радиации и др. неблагоприятных факторов. Наиболее распространенными материалами для непроводящих подложек являются сапфир - монокристаллическая окись алюминия Al_2O_3 α -модификации и шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$.

В качестве материала для проводящих подложек чаще всего используют монокристаллический кремний (в виде пластин диаметром до 300 мм). Наряду с кремнием широкое применение находят также монокристаллы полупроводниковых соединений A_3B_5 (арсенид галлия GaAs, фосфид галлия GaP, арсенид индия InAs, антимонид индия InP, антимонид галлия GaSb и др.).

Особенно успешно разрабатываются и внедряются в практику ИС на основе GaAs. Этот материал способен обеспечивать работу микросхем при более высоких температурах, чем кремний, и благодаря высокой подвижности электронов позволяет изготавливать ИС с более высоким быстродействием. Кроме того, компенсированный арсенид галлия обладает весьма низкой электропроводностью, благодаря чему подложки, выполненные из этого материала, сочетают в себе достоинства полупроводниковых и диэлектрических подложек.

По технологическому признаку монокристаллические подложки ИС можно также разделить на две группы: постоянные и временные [3, 4].

К первой группе относятся подложки, играющие роль несущих конструкций элементов ИС и выполняющие электронные функции от начала до конца технологического процесса, сохраняя их и при эксплуатации ИС. Примером могут служить кремниевые подложки для биполярных ИС с электрической изоляцией элементов р-п – переходом, рассмотренные в предыдущем разделе.

Ко второй группе относятся те, которые участвуют в технологическом процессе только на начальных стадиях изготовления ИС и играют роль исходных поверхностей для диффузии или, скажем, эпитаксиального наращивания. На конечных стадиях изготовления ИС материал таких подложек целиком или частично удаляется, а полученная на них рабочая часть структуры переносится на др. (обычно не монокристаллические) подложки, которые уже являются не только несущими конструкциями, но и обеспечивают электрическую изоляцию между элементами. Данная функциональная роль сохраняется за ними как в последующих операциях производства, так и при эксплуатации ИС. Типичный представитель подложек второй группы – монокристаллические пластины кремния, используемые для изготовления полупроводниковых биполярных ИС с диэлектрической межэлементной изоляцией.

Технологические процессы изготовления подложек первой и исходных подложек второй групп практически одинаковы: из предварительно очищенного материала выращивают монокристаллические слитки; слитки разрезают на отдельные пластины (толщиной от 0,2 до 1 мм); пластины шлифуют и полируют с целью удаления повреждений и неровностей, отмывают от загрязнений и высушивают.

В большинстве типовых технологических процессов подложки поступают в производство как исходные материалы. При этом процессы очистки и «доводки» их поверхности до нужного качества могут рассматриваться как подготовительные операции перед основным технологическим процессом создания ИС. Отметим, что влияние любых дефектов или загрязнений, не устраненных на этапе подготовки подложек, может проявиться и значительно усилиться в последующих технологических операциях изготовления ИС.

Особое место занимают полупроводниковые подложки сферических («маковых») ИС, изготовление которых предполагает принципиальный переход от групповой технологии обработки пластин к гибкому штучному производству (с предполагаемой производительностью до 2500 ИС в секунду). В таких ИС используется 95% объема кремния против 5% в обычных ИС [9].

2.2 Полупроводниковые материалы

Монокристаллы кремния имеют структуру типа алмаза. Положение атомов в кристаллической решетке можно представить в виде двух частично перекрывающихся гранцентрированных кубов, смещенных друг относительно друга на четверть главной диагонали. Каждый атом кремния окружен четырьмя соседними атомами, симметрично расположенными в пространстве.

Арсенид галлия (как и большинство других соединений A_3B_5) кристаллизуется со структурой цинковой обманки. Решетка цинковой обманки отличается от решетки алмаза тем, что в ее узлах атомы одного компонента соединения чередуются с атомами другого компонента. Структуру арсенида галлия можно представить как взаимно проникающие гранцентрированные кубические подрешетки атомов галлия и мышьяка, сдвинутые на четверть главной диагонали.

Монокристаллические материалы обладают, как известно, анизотропией физических, электрических и механических свойств, т. е. различием этих свойств в различных кристаллографических плоскостях и направлениях. Узлы, плоскости и направления в кристаллической решетке обозначаются индексами Миллера – коэффициентами при элементарных базисных векторах, не имеющими общего целого делителя. Для кристаллографических направлений индексы Миллера записываются в квадратных скобках (например, $[111]$), совокупностей эквивалентных направлений – в угловых скобках

(например, $\langle 111 \rangle$), для семейств эквивалентных плоскостей – в фигурных скобках (например, $\{100\}$). Одноименные направления и плоскости в кубической системе взаимно перпендикулярны (см. рис. 2.1).

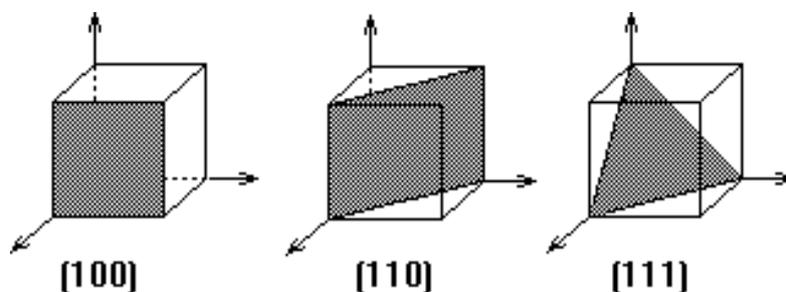


Рисунок 2.1 – Схематическое представление плоскостей с различными индексами Миллера в кубической решетке

Оси роста монокристаллов кремния обычно совпадают с направлением $[111]$. Из такого слитка можно вырезать пластины с любой плоскостью ориентации. Пластины ориентации (111) имеют форму круга, (110) – прямоугольника или эллипса⁴, (100) – эллиптическую форму⁵ [2]. Каждая плоскость или направление ориентации характеризуется определенной плотностью упаковки атомов, оказывающей влияние на электрофизические, физико-химические и механические свойства материала.

В монокристаллах арсенида галлия прилегающие плоскости $\{111\}$ образованы разными атомами, а ближайшие эквивалентные атомы расположены в направлении $\langle 111 \rangle$. Направление от атома галлия к ближайшему атому мышьяка обычно обозначается $[111]$, а обратное направление – $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$. Плоскость (111) называется галлиевой. Она состоит либо из атомов галлия, имеющих по три связи с кристаллом, либо из атомов мышьяка, имеющих только по одной такой связи. Для мышьяковой плоскости $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ – ситуация обратная. Различие между этими двумя плоскостями проявляется при химическом травлении, ионной имплантации, пассивации кристаллов диэлектрическим слоем и др. процессах. Так, например, из-за указанного различия параметры полевых транзисторов, изготовленных на пластине арсенида галлия с ориентацией (100) , существенно зависят от ориентации затвора на поверхности подложки [10].

Основной объем монокристаллического кремния (80 ÷ 90 %), потребляемого электронной промышленностью, выращивается из расплава по методу Чохральского [3, 4]. Исходный технический кремний получают восстановлением диоксида кремния электрической дугой, создаваемой между графитовыми электродами. Технический кремний превращают в легколетучее соединение, которое затем очищают и восстанавливают до чистого поликристаллического кремния. Поликристаллический кремний дополнительно очищают тигельным или бестигельным методами зонной плавки.

Арсенид галлия и др. полупроводниковые соединения A_3B_5 получают сплавлением особо чистых исходных веществ. Монокристаллические слитки выращивают из расплава (под слоем флюса) или получают направленной кристаллизацией, а также бестигельной зонной плавкой [4, 10].

Первой операцией механической обработки слитков является отрезание затравочной, хвостовой и других частей, удельное сопротивление которых выходит за рамки существующих допусков. На следующем этапе производится обдирка боковой поверхности до требуемого стандартного диаметра. После обдирки слитков, вдоль образующей кристалла

⁴ Одна из плоскостей $\{110\}$ перпендикулярна плоскости (111) , а другая расположена к ней под углом около 35°

⁵ Плоскости (100) находятся по отношению к плоскости (111) под углом около 55° .

шлифуют один или несколько базовых срезов (граней), используемых во всех последующих процессах обработки пластин при совмещении рисунков отдельных слоев и проведении электрических измерений.

Специальная маркировка в паспорте слитка характеризует его по типу проводимости, значению и разбросу удельного сопротивления, виду легирующей примеси и некоторым др. параметрам [2].

Перед резкой слитка на пластины необходимо произвести его ориентацию, т. е. установить величину и направление отклонения его торца от заданной кристаллографической плоскости. Проверяется также ориентация поверхности пластин после резки, шлифовки или полировки. Для ориентации слитков и пластин используют, преимущественно, два метода: рентгеновский (дифрактометрический или Лауэ) и оптический (метод световых фигур) [2-4]. Рентгеновский дифрактометрический метод основан на особенности рассеяния рентгеновских лучей атомами кристаллической решетки. Оптический метод ориентации, более простой и приемлемый в производственных условиях, основан на различии скоростей травления полупроводниковых материалов в различных кристаллографических направлениях.

2.3 Механическая обработка подложек

Резка слитков на пластины производится стальными дисками с наружной или внутренней алмазной режущей кромкой. В последние годы стала широко применяться резка абразивной суспензией с помощью стальных полотен или проволоки, совершающих возвратно-поступательные движения [2-4]. Одновременно используется до 100 полотен толщиной 0,15 мм, закрепленных с фиксированными зазорами. Подача суспензии, приготовленной на основе тонкого абразива, осуществляется со скоростью 1,5 – 2 мл/мин. При этом на полотнах образуется слой абразивной суспензии толщиной 0,05 мм, работающий как режущий инструмент.

Полотна и проволока (диаметром около 0,1 мм) позволяют резать слитки практически любого размера. Толщину пластин большого диаметра обычно выбирают не менее 0,5 – 0,6 мм. Слишком тонкие пластины имеют низкую жесткость и подвергаются большому короблению (деформациям) из-за механических напряжений, возникающих в них при последующих обработках.

После резки полупроводникового слитка на пластины производится их механическая шлифовка с целью устранения грубой шероховатости, неравномерности пластин по толщине, повышения параллельности плоскостей, уменьшения толщины приповерхностного слоя полупроводника с нарушенной кристаллической структурой. Шлифовка осуществляется на специальных установках при помощи абразивов, обладающих не меньшей твердостью, чем обрабатываемые пластины. На скорость съема материала пластины и качество обработки поверхности существенное влияние оказывает размер (крупность) зерен абразива.

Шлифовальные диски изготавливают из чугуна, стали, стекла, латуни и др. материалов. В процессе шлифовки скорость вращения дисков относительно невелика и температура пластин существенно не повышается. В качестве абразивного материала широко используется корунд.

Основная цель последующей механической полировки пластин - обеспечить высокую чистоту обрабатываемой поверхности и минимальную толщину нарушенного приповерхностного слоя. Проводят механическую полировку на стеклянных или металлических дисках, рабочие поверхности которых обтягивают мягким, ворсистым материалом. Выбор материала зависит от его совместимости с используемым абразивом: полировочная ткань должна удерживать частицы абразива и быть стойкой к истиранию.

Полирующие составы наносят на подготовленный полировальный диск в дозированных количествах. Предварительную полировку производят алмазными суспензиями и пастами зернистостью от 3 до 1 мкм. Алмазную суспензию готовят из синтетических алмазных порошков и часового или приборного масла. Окончательную полировку выполняют

субмикронными алмазными порошками, пастами или мягкими полирующими составами на основе оксидов алюминия, хрома, циркония, кремния с величиной зерна менее 0,4 мкм.

Основные требования к процессу механической обработки пластин – минимальные повреждения поверхностей и возможность ликвидации этих повреждений в последующих операциях очистки и травления.

Используется также химико-механическая полировка пластин. Она происходит в результате механического воздействия и химических реакций и позволяет получать плоскопараллельные пластины с весьма малой глубиной нарушенного приповерхностного слоя, свободные от «алмазного фона» – микрорисок на поверхности пластины, характерных для механической полировки [3, 4].

3 ОЧИСТКА И ТРАВЛЕНИЕ ПОДЛОЖЕК

3.1 Виды загрязнений и очистки

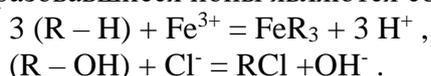
На поверхности пластин могут присутствовать загрязнения (примеси) как физической, так и химической природы [2-4]. Примеси первого вида удерживаются на поверхности за счет слабых адсорбционных сил, второго – за счет сильных химических и хемосорбционных связей. Типичными физическими загрязнениями являются воск, смолы, жиры, остатки органических растворителей, частицы пыли⁶. К химическим загрязнениям поверхности относятся оксидные пленки, ионы металлов (хемосорбируются из травителей и паст, используемых при полировке) и др.

На начальном этапе очистки производится так называемое обезжиривание поверхности - удаления жиров, масел, восков, смол. При этом в качестве растворителей могут использоваться углеводороды, их смеси, спирты, эфиры, амины, кетоны, хлорорганические соединения и др.

Органические примеси с поверхности кремниевых пластин обычно удаляются в перекисно-аммиачном растворе ($H_2O_2 : NH_4OH : H_2O = 1 : 1 : 3$) с последующей гидродинамической отмывкой поверхности. Перекись водорода H_2O_2 обеспечивает окисляющее разложение органических примесей, гидроксид аммония NH_4OH образует комплексные соединения с металлами, что облегчает их удаление с поверхности.

Для отмывки пластин используют особо чистую воду: дистиллированную и деионизованную (ионообменную). Степень очистки воды контролируют по ее удельному электросопротивлению. Удельное сопротивление дистиллированной воды составляет от 100 до 200 кОм·см, бидистиллированной – от 0,5 до 10 МОм·см, деионизованной – до 20 МОм·см.

Деионизованную воду получают методом ионного обмена. Используемые ионообменные смолы разделяются на два класса: катиониты (поглощают ионы металлов) и аниониты (поглощают ионы кислотных остатков). Химическая формула катионита $R - H$, где R – органический радикал, химическая формула анионита – $R - OH$. При очистке воды, например, от $FeCl_3$ ионы железа и хлора связываются с органическими радикалами, а вновь образовавшиеся ионы являются составляющими воды:



Для очистки от органических частиц деионизованная вода фильтруется мембранными фильтрами из тонких пленок нитроцеллюлозы, нейлона и др. материалов, обеспечивающих размеры отверстий от долей до нескольких микрометров.

При серийном производстве ИС широко используются следующие виды очистки поверхности пластин: ультразвуковая, в парах органических растворителей, в объеме

⁶ Относительные размеры загрязняющих поверхности частиц, характерных для технологических помещений, соизмеримы с размерами элементов ИС. Так, человеческий волос имеет толщину около 15 мкм, пылинки – от 1 до 10 мкм, а отдельные линии ИС – менее 0,5 мкм.

реагента, струйная. Все указанные методы применяются не только для физического удаления загрязнений, но и для химического травления поверхности подложек. С каждой новой операцией и каждым новым реагентом на поверхность пластины могут привноситься новые примеси или дефекты. Поэтому в процессах очистки стремятся минимизировать число операций и реагентов.

Очищенная поверхность пластин должна быть предохранена от последующих загрязнений. Для этого используют несколько приемов: моментальную передачу очищенных пластин в условиях чистой окружающей среды на следующую технологическую операцию; хранение очищенных пластин в герметичной таре, заполненной чистым инертным газом; защиту поверхности кремниевых пластин специальными технологическими пленками, например покрытие их специальным лаком.

Степень чистоты поверхности пластин непосредственно перед нанесением фоторезиста, эпитаксией, диффузией и др. технологическими процессами существенно влияет на качество выполнения этих процессов, параметры и выход годных приборов.

3.2 Жидкостная обработка

3.2.1 Химическое травление

Обработку пластин травлением в жидких смесях (травителях) применяют для удаления загрязнений (оставшихся после отмытки в растворителях) и механически нарушенного приповерхностного слоя, уменьшения толщины исходных пластин до заданных значений, выявления границы р-п - переходов, получения на поверхности заданного рельефа (рисунка), а так же при структурных исследованиях [2-4].

Травители для кремния подразделяются на щелочные и кислотные. Кислотные травители представляют собой смесь азотной HNO_3 и плавиковой HF кислот. Они обладают полирующим действием и создают зеркальную поверхность. Максимальная скорость травления достигается при соотношении $\text{HF} : \text{HNO}_3 = 9 : 2$. Для замедления скорости травления (с целью повышения контролируемости процесса) в смесь азотной и плавиковой кислот добавляют уксусную кислоту CH_3COOH . Широко используется травитель состава $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} = 1 : 3 : 2,5$. Возможны и другие соотношения компонентов травителя.

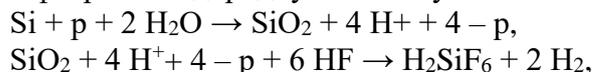
В состав щелочных травителей входят водные растворы гидроокисей калия KOH и натрия NaOH , имеющие концентрацию от 1 до 30 %. Их используют для получения шероховатой (матовой) поверхности и анизотропного (избирательного) травления. В настоящее время процессы анизотропного травления кремния все шире используются в технологии ИС.

В соответствии с электрохимической теорией травления (коррозии), на пространственно разделенных участках поверхности кремния – микроанодах и микрокатодах – одновременно протекают окислительные (анодные) и восстановительные (катодные) сопряженные реакции [3, 4]. В зависимости от того, какая из этих реакций лимитирующая (т. е. более медленная), различают анодное или катодное ограничение процесса.

Из протекающих на аноде реакций наиболее трудной (и, соответственно, медленной) является отрыв атома кремния от поверхности. Отрицательные ионы, например OH^- , легко образуют связь с поверхностными атомами кремния, но для ухода этого гидратированного оксида в раствор необходимо разорвать связь между атомами кремния, т. е. нужен носитель заряда - дырка. По этой причине кремний р-типа проводимости растворяется почти без ограничений, а для n-кремния наблюдается ограничение процесса, вызванное недостатком дырок.

Основные катодные реакции на кремнии – выделение водорода и восстановление молекул окислителей. Отметим, что адсорбированный на кремнии водород создает новые поверхностные уровни, сильно влияющие на свойства поверхности. При катодных реакциях образуются химические соединения – гидриды кремния.

Рассмотрим, как происходит травление кремния в смеси плавиковой HF и азотной HNO₃ кислот. На микроанодах идут реакции образования оксида и перевода его в кремнийфтористоводородную кислоту:



где p - число дырок.

На микроатодах восстанавливается азотная кислота:



Восстанавливающиеся молекулы HNO₃ захватывают электроны, т. е. вызывают инжекцию дырок непосредственно в ближайший микроанод. Регулируя поступление окислителя к микроатодам за счет изменения концентрации его в растворе или диффузии молекул (перемешиванием), можно управлять анодным растворением.

Травление кремния с катодным ограничением давно применяется для получения пластин с плоской высококачественной поверхностью. Определяющую роль в этом процессе играет диффузия окислителя к поверхности кремния, свойства самого кремния практически не влияют на процесс травления.

Скорость растворения материала зависит от рельефа поверхности (см. рис. 3.1), т. к. в соответствии с законом Фика

$$v = D(c_p - c_0)/x,$$

где v – скорость диффузии молекул окислителя к поверхности;

D – коэффициент диффузии;

c_p и c_0 – равновесные концентрации окислителя в растворе и на поверхности;

x – толщина слоя травителя, через который идет диффузия.

На вершинах поверхности скорость растворения выше, чем во впадинах, за счет различия в расстояниях x_v и x_{vp} . Различие это тем больше, чем меньше расстояние от поверхности до некоторой плоскости, характеризуемой постоянной концентрацией окислителя.

В процессе травления значения x_v и x_{vp} сближаются, и различие в скоростях травления вершин и впадин уменьшается до пренебрежимо малого значения. Такое положение соответствует неровности поверхности 0,2 – 0,3 мкм. Скорость травления при этом составляет 6 – 10 мкм/мин.

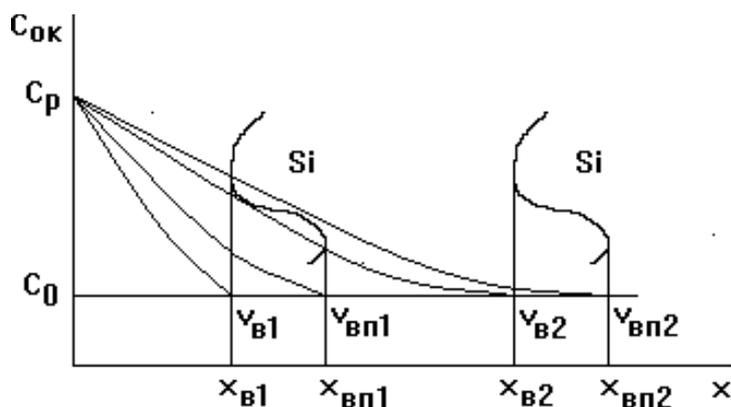


Рисунок 3.1 – Зависимость скорости травления от неровностей поверхности и толщины пограничного слоя

Рассмотренные реакции травления с катодным ограничением обладают низкими энергиями активации ΔE_A , характерными для процессов, лимитируемых диффузией. Например, для смеси плавиковой, азотной и уксусной кислот значение $\Delta E_A = 19,8 \cdot 10^3$ Дж/моль. При травлении в этой смеси произведение скорости травления на вязкость травителя

постоянно в интервале температур 20 – 50 °С, что показательно для процессов, скорость которых ограничена диффузией.

Травители с анодным ограничением, напротив, характеризуются высокими энергиями активации: 10 %-ный раствор едкого натра - $54,5 \cdot 10^3$ Дж/моль; этилендиаминовый травитель – $46 \cdot 10^3$ Дж/моль. Такие большие значения энергии активации указывают на то, что весь процесс определяется химической стадией, а не диффузионной. Из-за высокой энергии активации анизотропные травители требуют нагрева до температур, близких к температурам их кипения.

3.2.2 Электрополировка

В процессе электрополировки на кремний подают положительное напряжение относительно раствора. У поверхности кремния образуется тонкая вязкая пленка продуктов растворения, обладающая электрическим сопротивлением, превышающим сопротивление электролита.

Толщина этой пленки, называемой пленкой электрополировки, над вершинами меньше, чем над впадинами, за счет чего анодный ток перераспределяется так, что вершины травятся быстрее впадин. Толщина и сопротивление пленки электрополировки зависят от ряда факторов и в первую очередь от состава раствора, скорости его перемешивания, температуры [4]. Чем тоньше пленка электрополировки, тем выше качество обработки поверхности пластины. В состав электролита обычно входят плавиковая кислота (или фторид аммония) и глицерин, регулирующий вязкость.

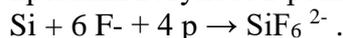
Процессом анодного растворения можно управлять, изменяя ток в электрической цепи. При малых плотностях тока на поверхности кремния образуется толстая аморфная пленка коричневого цвета в результате реакции:



Фтористые соединения двухвалентного кремния, из которых состоит пленка, медленно растворяются в воде с выделением водорода:



Этот водород перемешивает раствор, и пленка электрополировки не образуется. При большей плотности тока процесс анодного растворения ускоряется, но его начинает ограничивать недостаток молекул плавиковой кислоты, диффундирующих из объема электролита. В связи с этим кремний вступает в реакцию в четырехвалентной форме:



Продуктом реакции является кремнийфтористоводородная кислота, обладающая более высоким сопротивлением, чем объем электролита. Высокоомная пленка кремнийфтористоводородной кислоты у поверхности пластины и обуславливает эффект электрополировки. При дальнейшем увеличении плотности тока на поверхности кремния возможно образование пассивной пленки SiO_2 , т. е. процесс электрополировки происходит в довольно узком интервале плотностей тока.

В технологии ИС на кремнии электрополировка постепенно вытесняет обычную химико-динамическую полировку, т. к. обеспечивает более качественную обработку поверхности.

3.3 Сухое травление

«Сухое» травление пластин - газовое, плазмохимическое, ионно-плазменное – не предполагают использования жидкостей ни для собственно травления, ни для последующей обработки [2-4, 11, 12].

3.3.1 Газовое травление

Газовое (термохимическое) травление пластин обычно используется в тех технологических процессах, в которых особо важную роль играет структура поверхностного слоя, например при эпитаксиальном наращивании или при получении тонкого подзатворного слоя SiO_2 в МОП - структурах. В качестве травителей используют смеси водорода или гелия с

газообразными веществами: 1) галогенами (F_2 , Cl_2 , Br_2); 2) галогеноводородами (HF , HBr , HCl , HI); 3) соединениями серы (H_2S , SF_6). Молярное содержание этих веществ в водороде или гелии может изменяться от десятых долей до единиц процентов. Обработка осуществляется при температурах $700 \div 1300$ °С непосредственно в реакторах для термического окисления или эпитаксиального наращивания.

Достоинствами термохимического травления являются максимально достижимая чистота поверхности пластин и совместимость с термическими операциями эпитаксии, окисления, диффузии. К недостаткам можно отнести высокие температуры обработки, довольно сложное оборудование (в сравнении с жидкостными методами) и необходимость весьма тщательной очистки газов от примесей.

3.3.2 Ионно-плазменное травление

Различают два вида ионно-плазменного травления: 1) собственно ионно-плазменное и 2) ионно-лучевое. В первом случае обрабатываемая подложка или ее держатель являются (в той или иной мере) элементами плазменного реактора и участвуют в ионизации рабочего газа; во втором обработка подложек происходит потоком ионов (или нейтральных частиц), образованных в автономном источнике.

В обоих процессах травление подложки происходит за счет бомбардировки ее поверхности положительными ионами инертных газов, доставляемых посредством дрейфа в электрическом или электромагнитном поле из тлеющего разряда. Разряд зажигается между анодом и катодом при давлении инертного газа $0,133 - 6,67$ Па. Наличие специального анода необязательно, поскольку его роль могут играть заземленные части установки. Энергия ионов должна превышать энергию связи атомов обрабатываемого вещества (для SiO_2 , например, 60 эВ). Удаляемые слои, как правило, имеют высокое сопротивление (диэлектрики или полупроводники), поэтому для исключения зарядки поверхности используют высокочастотный (ВЧ) разряд. Управление скоростью обработки обычно достигается изменением подводимой ВЧ-мощности.

Происходит ионно-плазменное травление при невысокой температуре ($100 - 200$ °С) и применимо для обработки практически любых материалов, в частности, для травления многослойных (например, подложка – резист) структур, «несовместимых» с точки зрения жидкостной или термохимической обработки. Если ионы поступают перпендикулярно поверхности катода, то не происходит бокового подтравливания при создании локальных углублений, что весьма важно для получения рисунка слоев в процессах фотолитографии. Один из основных недостатков ионно-плазменного травления – низкая селективность: так, например, в процессе травления слоя SiO_2 вместе с ним может быть удален и приповерхностный слой кремния.

3.3.3 Плазмохимическое травление

Метод плазмохимического травления основан на использовании газов, в состав которых входят реакционноспособные компоненты. В результате расщепления газов в плазме образуются вещества, способные вступать в химические реакции с подвергаемым травлению материалом с образованием летучих соединений.

Примером может служить травление кремния в тетрафтороуглероде CF_4 (см. рис. 3.2). Будучи относительно инертным газом, CF_4 не взаимодействует с Si при любых температурах вплоть до точки плавления последнего (1412 °С). Однако при возбуждении газового разряда в CF_4 одним из продуктов разряда является атомарный фтор, вступающий в реакцию с Si при комнатной температуре с образованием летучего соединения SiF_4 .

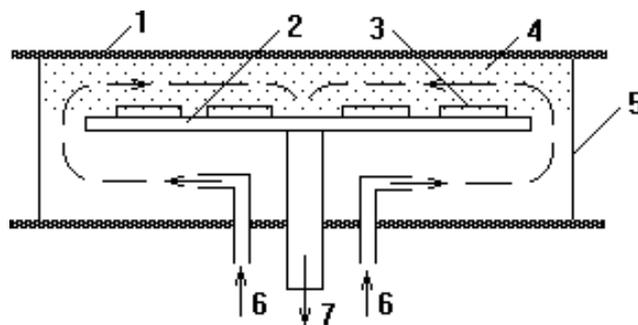


Рисунок 3.2 – Схема установки для плазмохимического травления: 1 – ввод ВЧ-напряжения; 2 – нижний электрод – держатель подложек; 3 – подложки; 4 – плазма; 5 – цилиндр из диэлектрического материала; 6 – рабочий газ; 7 – к насосу

Давление в рабочей камере чаще всего варьируется от 13,3 до 1330 Па, частота подаваемого напряжения составляет несколько мегагерц. Методы ионно-плазменного и плазмохимического травления зачастую объединяют под одним названием: плазмохимические. Промежуточные (совмещенные) модификации ионно-плазменного и плазмохимического методов, основанные и на химических реакциях, и на ионной бомбардировке обрабатываемой поверхности, называют также реакционными ионно-плазменными [7, 11, 12]. В частности, для повышения селективности плазменного травления в инертную плазмообразующую среду добавляют примерно 10 % кислорода или водорода. При этом скорость травления органических веществ (например, фоторезиста) возрастает, а неорганических – падает, поскольку к чисто физическому по своей природе ионному травлению добавится химический процесс.

4 ПРОВОДЯЩИЕ СЛОИ

4.1 Назначение и материалы

В полупроводниковых ИС тонкие слои (пленки) металлов и др. проводящих материалов используют для изготовления самих элементов ИС и межэлементных соединений, а также для технологических целей, например, в качестве масок в процессах локальной ионной имплантации и др. [2-4, 11].

Выбор конкретных материалов проводящих слоев зависит от функциональных и конструктивных особенностей ИС, технологических режимов ее изготовления и условий эксплуатации.

Один из основных параметров слоя – электрическое сопротивление, измеренное в направлении, параллельном его поверхности,

$$R = \rho_v \cdot l / (h \cdot b),$$

где ρ_v – удельное объемное сопротивление материала, Ом·см;

l, b, h – длина, ширина и толщина слоя соответственно, см.

При $l = b$:

$$R = \frac{\rho_v}{h} = R_S.$$

R_S – удельное поверхностное сопротивление пленки, Ом/□ (Ом на квадрат) – не зависит от размера стороны квадрата ($l = b$). При толщинах пленок, превышающих некоторое пороговое значение $h_{\text{пор}}$, зависимость $RS(h)$, рассчитанная по последнему уравнению, совпадает с экспериментальной (для большинства металлов $h_{\text{пор}} = 0,01 \div 0,03$ мкм). При $h < h_{\text{пор}}$ указанные зависимости резко расходятся, т. к. пленки имеют островковую структуру. Проводимость таких пленок обусловлена в основном дрейфом электронов во внешнем поле в пределах островков, туннельным эффектом и термоэлектронной эмиссией между островками. Чем тоньше пленка, тем меньше размеры островков и больше расстояние между ними. С

увеличением расстояния между островками проводимость пленки резко снижается, приближаясь к поверхностной проводимости материала подложки.

Проводящие слои, используемые в качестве затворов МДП - структур, должны иметь малую работу выхода, минимально взаимодействовать с подзатворным диэлектриком, быть хорошим геттером для быстрых поверхностных состояний, обладать высокой адгезией к диэлектрику.

При выборе проводящих материалов для коммутации в кремниевых ИС учитывают: удельное сопротивление, коэффициент термического расширения, теплопроводность, свободную энергию образования оксида металла, адгезию к кремнию и диоксиду кремния, совместимость с фотолитографией, самодиффузию, электромиграцию (перенос материала под действием тока большой величины) и др.

Повышение степени интеграции, уменьшение размеров элементов ИС приводит к необходимости создания многоуровневой коммутации. В многоуровневых системах межсоединений необходимо обеспечить надежный контакт не только металлической пленки с полупроводниковой структурой, но и между отдельными уровнями металлизации.

Основные требования к проводящим слоям для омических контактов к элементам ИС – это малое электрическое сопротивление, линейность вольт-амперной характеристики контакта, отсутствие инжекции неосновных носителей заряда в полупроводник, хорошая адгезия, а также возможность проведения фотолитографии. Свойства контактов должны оставаться стабильными в широком диапазоне условий и в течение всего срока эксплуатации ИС, что возможно, если контактирующие материалы согласованы по температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) и представляют собой стабильную физико-химическую систему. Материал контактов должен не глубоко проникать в полупроводник (особенно в больших ИС, где глубины диффузионных слоев составляют $0,2 \div 0,4$ мкм) и иметь малую теплопроводность.

Для создания не инжектирующего контакта, обладающего малым электрическим сопротивлением, необходимо выполнить условия: $\varphi_m < \varphi_p$ – для полупроводника n-типа; $\varphi_m > \varphi_p$ – для p-типа, где φ_m и φ_p – соответственно электрохимические потенциалы металла и полупроводника. Линейность вольт - амперной характеристики контакта повышается при дополнительном легировании тонкого приповерхностного слоя полупроводника (создании p + -n или p + -p-перехода под контактом). В этом случае сопротивление контакта (Ом)

$$R = \frac{\rho_s \cdot \text{cth}(1 \cdot \sqrt{\rho_s \rho_k})}{b \sqrt{\rho_s \rho_k}},$$

где ρ_s – поверхностное сопротивление полупроводника (Ом/□);

ρ_k – приведенное контактное сопротивление (Ом·см²);

b, l – соответственно ширина и длина контакта. Значение ρ_k зависит от природы металла, типа и сопротивления полупроводника и в случае кремния описывается эмпирическим соотношением [3]

$$\rho_k = A \rho_{Si}^a,$$

где $A = 3,3$ и $a = 1,3$ для многих металлов. В большой степени сопротивление контакта определяется чисто технологическими факторами: наличием на поверхности полупроводника остатков оксида или др. загрязнений, отрицательно влияющих на контактное сопротивление, кристаллической структурой металлической пленки и др.

Надежность контактной системы зависит от адгезии слоя металла к полупроводнику. Обеспечить хорошую адгезию довольно сложно. Причина затруднений кроется в противоречивости предъявляемых требований: контакт металла с полупроводником должен быть прочным, но металл не должен проникать глубоко в полупроводник; металл контакта должен быть достаточно инертен и, одновременно, восстанавливать оксидные пленки на поверхности полупроводника.

Практически невозможно найти материал, отвечающий всем электрическим, конструктивным и технологическим требованиям идеального омического контакта, впрочем,

как и идеального межэлементного соединения, затвора и др. Поэтому во многих случаях применяются многослойные композиции, каждый из слоев которых несет определенную функцию. Так, металлизация межэлементных соединений может состоять из двух-трех слоев: нижнего, обладающего хорошей адгезией к подложке, малой растворимостью в материале подложки, образующего хороший омический контакт; среднего – с высокой электропроводностью – и верхнего, обеспечивающего хорошую связь с последующими слоями и (или) защиту проводящего слоя. Часто ограничиваются двумя первыми слоями. Тогда свойства второго (верхнего) слоя должны быть более универсальны.

Для использования в качестве одно- и многоуровневой коммутации элементов ИС, электродов затворов МОП - структур и контактов пленки металлов должны иметь мелкозернистую структуру и быть равномерными по толщине на подложках со сложным ступенчатым рельефом. Малый размер зерна способствует получению минимальных размеров неровностей края линий при фотолитографическом процессе формирования заданного рисунка пленки.

В кремниевых ИС невысокой степени интеграции основным материалом для создания контактов, затворов в МОП - структурах и межэлементных соединений является алюминий. Алюминий обладает высокой электропроводностью, дешев, пластичен и в силу своей пластичности сравнительно мало чувствителен к термоциклированию. Пленки алюминия легко формируются вакуумными методами и обладают удовлетворительной адгезией к полупроводникам и диэлектрикам. Кроме того, алюминий хорошо травится и обеспечивает высокое разрешение при фотолитографии, легко восстанавливает оксидные пленки в контактных окнах. С кремнием алюминий образует стабильную физико-химическую систему⁷. К алюминиевым пленкам удовлетворительно присоединяются др. металлы.

Медь, которая обладает более высокой электропроводностью и такими же технологическими свойствами, как алюминий, длительное время не использовалась для коммутации элементов полупроводниковых ИС из-за очень высокого значения коэффициента диффузии в полупроводниках (на четыре порядка больше, чем у алюминия). Проникновение атомов меди в кристаллы ИС приводит к деградации параметров и отказам.

Однако и алюминий обладает рядом недостатков. Основными из них являются [1, 3, 4]:

1) высокая растворимость кремния в алюминии в твердой фазе при повышенных температурах (при 500 °С растворяется до 1 % кремния). Обратное выделение кремния при охлаждении происходит по границам зерен алюминия, вследствие чего ухудшается прочность контакта;

2) возможность возникновения локальных коротких замыканий. Поскольку свободная энергия образования оксида алюминия составляет 1,56106 Дж/моль, а кремния – 0,8106 Дж/моль, алюминий активно восстанавливает SiO₂ уже при температуре 450 °С по реакции $4 Al + 3 SiO_2 = 2 Al_2O_3 + 3 Si$,

протекающей преимущественно на дефектах оксида, где и могут возникнуть замыкания;

3) подверженность электромиграции, которая наблюдается при плотностях тока более 5104 А/см² и температурах выше 150 °С. Электромиграцию можно значительно уменьшить легированием алюминиевой пленки медью или титаном. При этом срок службы приборов возрастает в 70 раз;

4) наличие естественного слоя оксида на поверхности алюминия, затрудняющего процессы пайки и электролитического осаждения металлов.

Несмотря на указанные недостатки, алюминий широко используют для изготовления контактов в кремниевых ИС. В тех случаях, когда алюминий нельзя использовать (в высоконадежных ИС, при повышенных температурах эксплуатации, а также на GaAs, InP и др. полупроводниковых соединениях), применяют двухслойные структуры. В таких

⁷ Для формирования контактов с кремнием иногда в алюминий добавляют небольшое количество кремния и титана.

структурах нижний (контактный) слой создается из металла, основными свойствами которого являются малое проникновение в полупроводник, низкое переходное сопротивление и способность к восстановлению оксидных пленок. Металл верхнего (проводящего) слоя должен иметь высокую электропроводность и быть совместимым с металлами нижнего слоя и вывода.

Одной из основных причин нестабильности таких контактов является взаимная диффузия атомов металлов, приводящая к образованию твердых растворов или интерметаллических соединений. Важен не только сам факт взаимодействия металлов, но и скорость взаимодействия в условиях нанесения и последующих обработок слоев, а также при эксплуатации ИС. Большое значение при этом имеют толщины пленок.

Наилучшим материалом для контактного слоя считается молибден: он образует достаточно хороший контакт с низкоомным кремнием n- и p-типов (контактное сопротивление составляет $10^{-6} \div 10^{-4}$ Ом·см²); имеет наиболее высокую из пригодных для данного применения металлов проводимость; неглубоко внедряется в кремний; обладает ТКЛР, близким к кремнию; не подвержен электромиграции; не взаимодействует с алюминием, золотом, серебром; отличается сравнительно хорошей адгезией к диоксиду кремния; хорошо травится; обеспечивает фотолитографическое разрешение до 1000 лин./мм; легко напыляется в вакууме. Толщина контактного слоя молибдена составляет обычно около 0,1 мкм.

В качестве проводящих слоев чаще всего используют тонкие пленки алюминия, золота или меди. Для получения хорошего омического контакта необходимо проводить вжигание пленок при температурах около 500 °С в течение нескольких минут. Недостатком системы молибден - алюминий является существенное различие значений ТКЛР для данной пары металлов. Другой недостаток пленок молибдена – наличие пор, через которые кремний может взаимодействовать с материалом проводящего слоя. В структуре молибден – золото такое взаимодействие становится возможным уже при 300 °С, а образование эвтектики кремний – золото приводит к снижению надежности (расслаиванию) контактной пары.

Помимо молибдена для контактного слоя на кремнии используется платина, точнее силицид платины Pt₅Si₂. Контактное сопротивление силицида платины мало ($10^{-6} \div 10^{-3}$ Ом·см²). Контакт отличается высокой надежностью. Однако платина дорога, довольно глубоко проникает в кремний, хуже травится при фотолитографии, не восстанавливает остатков оксида в окнах, обладает низкой адгезией к диоксиду кремния. В качестве материала контактного слоя применяется также хром, но пленки хрома пористы и обычно имеют значительные внутренние напряжения.

В ряде случаев в качестве затворов МОП - структур и специальных токоведущих шин используют поликристаллический кремний. Удельное сопротивление поликристаллического кремния довольно велико (для n⁺-типа составляет 500 мкОм·см), поэтому в МОП - ИС высокой степени интеграции предпочтение отдают слоям тугоплавких металлов (вольфрама W, молибдена Mo, тантала Ta, титана Ti), силицидов тугоплавких металлов, меди.

В ИС на арсениде галлия основными активными элементами являются полевые транзисторы Шоттки. Для создания барьеров Шоттки (затворов) в таких ИС используются алюминий, вольфрам, тантал и др. металлы, силициды вольфрама W₅Si₃ или силициды типа TiW_xSi_y, а также металлические композиции из нескольких слоев, в частности, титан-золото или титан–платина-золото. Для омических контактов широко используют эвтектический сплав золото-германий (без подслоя или с подслоем никеля), в качестве межэлементных соединений – двухслойные тонкопленочные системы, например, ванадий–золото и др. [10].

4.2 Получение проводящих слоев физическими методами

Для получения проводящих слоев в технологии ИС широко используют физические методы - термическое вакуумное испарение и ионно-плазменное распыление [2-4, 11-14].

4.2.1 Термическое вакуумное испарение

Сущность метода термического вакуумного испарения заключается в испарении материала пленки и конденсации его на подложке в высоком вакууме. Для испарения вещества используют резистивные, индукционные, лазерные и электронно-лучевые испарители различной конструкции. Выбор способа испарения зависит от свойств вещества, главным образом от температур плавления и испарения. Температура подложек обычно варьируется в пределах $100 \div 400$ °С.

При давлении в рабочей камере $10^{-3} \div 10^{-4}$ Па частицы испаряемого материала на пути от источника к подложке практически не рассеиваются (длина свободного пробега $\lambda = 7 \div 70$ м), т. е. движутся прямолинейно. Направление движения частицы определяется импульсом, сообщенным ей в момент отрыва от поверхности источника. В случае эффузионного источника с малым диаметром отверстия (см. рис. 4.2, а) угловое распределение потока вещества подчиняется закону косинуса:

$$dN_{\text{и}}(\varphi) = M_{\text{и}} \frac{d\bar{\omega}}{\pi} \cos\varphi,$$

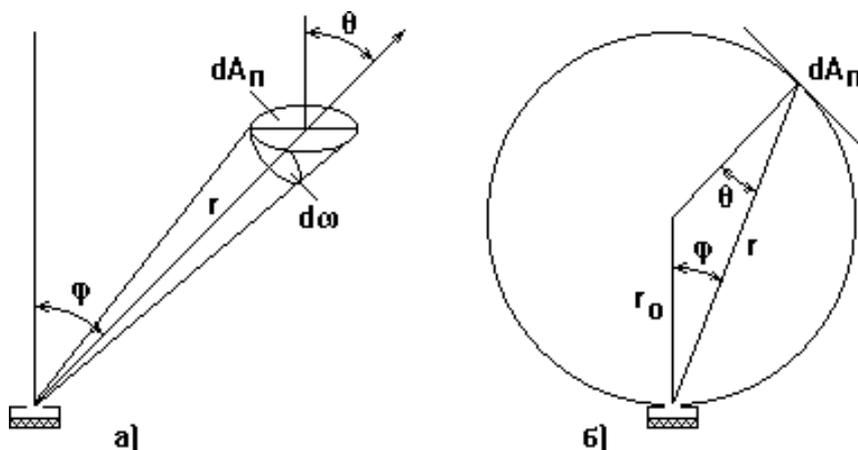


Рисунок 4.1 – Испарение из источника с малой площадью на элемент поверхности подложки (а) и на сферическую поверхность (б)

Площадь элемента подложки $dA_{\text{П}} = r^2 d\bar{\omega} / \cos\theta$ Плотность потока вещества на подложку ($\text{кг м}^{-2} \text{с}^{-1}$)

$$M_{\text{П}} = \frac{M_{\text{и}}}{\pi r^2} \cos\theta \cdot \cos\varphi.$$

Для получения равномерных по толщине пленок необходимо увеличивать расстояние от источника до подложки. Если подложки и источник расположены (см. рис. 4.1, б) на поверхности сферы радиусом r_0 , то $\cos\theta = \cos\varphi = r / (2r_0)$, и

$$M_{\text{П}} = \frac{M_{\text{и}}}{4\pi r_0^2}.$$

С учетом этого устройства для вакуумного термического испарения оснащают куполообразными подложкодержателями, которые в процессе нанесения пленок перемещаются по сложной планетарной траектории, определяемой конструкцией испарителя.

Скорость конденсации вещества на поверхности подложки

$$M_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} M_{\text{П}}.$$

Коэффициент конденсации $\alpha_{\text{к}}$ определяется как отношение числа частиц, адсорбируемых подложкой в единицу времени, к потоку падающих частиц. Различают четыре стадии роста пленки [4, 14]: 1) образование зародышей и островковой структуры; 2) срастание или коалесценция островков; 3) образование каналов; 4) образование непрерывной пленки.

На первом этапе происходит адсорбция испаренных частиц. Необходимым условием адсорбции является превышение парциального давления испаренного вещества над равновесным при температуре подложки. Кинетическая энергия атомов при адсорбции уменьшается на величину энергии связи с подложкой (теплоты адсорбции). Оставшаяся после

этого часть энергии обеспечивает адсорбированным атомам (адатомам) миграционную подвижность.

Для потенциального рельефа атомарно гладких участков поверхности подложки характерно квазипериодическое чередование впадин (ям) и выступов. На подложке атом может оказаться в одной из потенциальных ям. Если энергия такого атома E_{a0} меньше энергии реиспарения $E_{дес}$ (десорбции), но больше высоты потенциальных выступов $E_{пв}$, то атом может с одинаковой вероятностью перемещаться в любом направлении по поверхности подложки. Миграция таких атомов носит изотропный характер, и их совокупность можно рассматривать как двумерный газ. При $E_{a0} < E_{пв}$ адатомы могут фиксироваться в ямах или перемещаться вдоль седловин потенциального рельефа.

В процессе миграции адсорбированная частица в какой-то момент времени может получить приращение энергии ΔE (например, за счет тепловых флуктуаций частиц поверхности подложки). В результате ее полная кинетическая энергия $E_{a0} + \Delta E$ может превысить энергию десорбции и частица покинет подложку, т. е. испарится с ее поверхности. Среднее время жизни адсорбированных частиц определяется выражением

$$\tau_a = \frac{h}{kT} \cdot \frac{\exp\left(\frac{G_{адес}}{kT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)},$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота колебаний адатомов на поверхности подложки;

$G_{адес}$ – свободная энергия активации десорбции адсорбированных частиц.

В результате поверхностной миграции в какой-то момент времени в одной из потенциальных ям может оказаться несколько (группа) адатомов. Такая группа атомов называется начальным зародышем пленки. Зародыш более устойчив, чем отдельный атом, поскольку в нем к энергии связи каждого атома с подложкой добавляется энергия взаимодействия атомов между собой. Время жизни зародыша значительно больше времени жизни одиночного адатома.

Размер устойчивого зародыша должен превышать определенное значение, называемое критическим радиусом. Если к такому зародышу с критическим радиусом добавить еще один атом, то зародыш станет еще устойчивее. Если же из критического зародыша изъять хотя бы один атом, то зародыш распадется.

Между размером зародышей и частотой их образования имеет место обратно пропорциональная зависимость: чем больше размер критического зародыша, тем при прочих равных условиях меньше их образуется на единице площади подложки в единицу времени.

На начальной стадии роста пленки ее островки являются монокристаллическими. В процессе коалесценции происходит рекристаллизация островков, в результате чего размер зерен в пленке становится много больше среднего расстояния между соседними первоначальными зародышами, а число зерен на единицу площади – много меньше числа зародышей. В каждом зерне объединяются до ста или больше зародышей. Рекристаллизация является одним из основных факторов, определяющих конечный размер зерен.

В общем случае размер зерен в пленке меньше, чем в массивном материале, и в пределе, при очень низкой поверхностной подвижности адатомов, сравним с размером критического зародыша. В обычных условиях размер зерна существенно зависит от условий конденсации и роста пленки. В процессе роста в пленке возникают внутренние механические напряжения, а также большое число дефектов как точечных, так и протяженных. Наиболее характерными дефектами являются дислокации и границы зерен. Дислокации могут возникать на начальной стадии роста пленки из-за несоответствия строения решеток пленки и подложки или при срастании двух больших островков с кристаллическими решетками, повернутыми одна относительно другой. Плотность дислокаций обычно составляет $10^8 \div 10^{11}$ см⁻² и сильно зависит от толщины пленки.

Границы зерен, как и дислокации, являются дефектами, на которых рассеиваются носители заряда. Наряду с прочими дефектами они определяют сопротивление и др. электрофизические параметры пленок. В какой-то мере этим типом дефектов можно управлять путем изменения условий осаждения или последующей термообработкой пленок.

При малой скорости осаждения размеры зерен не зависят от нее, а определяются лишь температурой подложки. Для каждой температуры подложки существует своя так называемая пороговая скорость осаждения, с превышением которой размеры зерен уменьшаются. С увеличением температуры подложки возрастают миграционная подвижность адатомов и размеры критических зародышей. В результате коалесценции более крупных первичных зародышей образуются зерна больших размеров.

При больших скоростях осаждения первые порции адатомов, не успевая мигрировать по поверхности подложки на более или менее значительные расстояния от места осаждения, оказываются погребенными под новыми порциями конденсируемого вещества. Условия для поверхностной миграции адатомов затрудняются. Поэтому с дальнейшим ростом скорости осаждения размеры кристаллических зерен пленки уменьшаются.

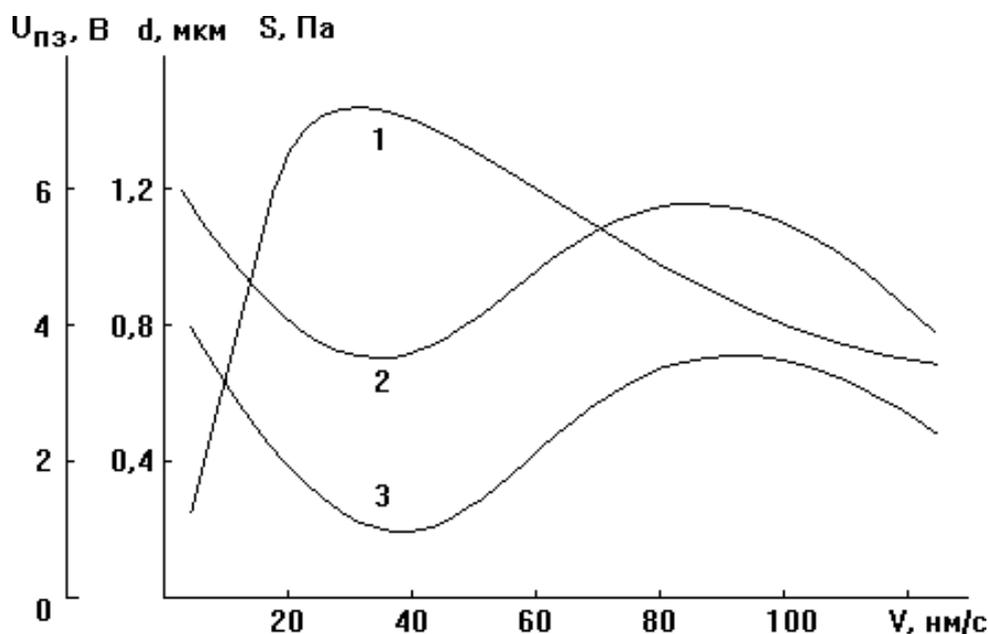


Рисунок 4.2 – Зависимости размера зерен (1), механического напряжения (2) и напряжения плоских зон МОП-структур (3) от скорости осаждения пленки алюминия

На рис. 4.2 показана зависимость размеров зерен, механических напряжений и напряжения плоских зон МОП – структур от скорости конденсации пленок алюминия [3]. Пленки эти обладают неравновесной поликристаллической зернистой структурой с большой неравномерностью размеров зерен и высокой концентрацией дислокаций внутри зерен (из-за значительных внутренних сжимающих напряжений). Из рисунка видна высокая степень корреляции структурных, механических и электрических характеристик пленок. Сложный характер приведенных зависимостей связан с тем, что изменение скорости испарения вызывает изменение температуры подложки, энергии конденсирующихся частиц, примесного фона и др. технологических факторов.

Последующие термообработки пленок при 300 ÷ 400 °С приводят к миграции атомов металла и скоплению их вокруг крупных частиц с образованием высоких бугорков толщиной до 5 ÷ 7 мкм.

Проведение на таких пленках фотолитографии приводит к большим неровностям краев алюминиевых линий вследствие анизотропии травления по границам зерен. Другими словами, неровности линий определяются размерами зерен поликристаллических пленок. Поэтому при

получении из алюминия коммутационных линий очень малой ширины ($0,1 \div 1$ мкм) приходится отказываться от простых термовакуумных процессов и применять ионно-плазменные, позволяющие получать пленки с меньшими размерами зерен. В то же время при формировании электродов затворов в МОП - ИС нужны крупнокристаллические малонапряженные пленки алюминия, которые позволяют снижать напряжения плоских зон до необходимого минимума ($1,5 \div 2$ В). Для мелкокристаллических пленок алюминия значения этих величин составляют $4 \div 4,5$ В.

4.2.2 Ионно-плазменного распыления

Сущность метода заключается в распылении ионами плазмы вещества мишени с последующим осаждением его на подложке. Интенсивность распыления вещества связана с плотностью ионного тока:

$$N_p = \alpha_p j_{и} / q_{и},$$

где N_p – плотность потока распыленных атомов, m^{-2} ;

α_p – коэффициент ионного распыления, атом/ион;

$j_{и}$ – плотность ионного тока на поверхности мишени, A/m^2 ;

$q_{и}$ – заряд иона, Кл.

Бомбардирующий ион передает импульс энергии атомам мишени путем последовательных столкновений. В процессе последовательной передачи импульса на поверхности мишени создается такая ситуация, при которой поверхностный атом может получить энергию, превышающую работу выхода, и покинуть мишень. Коэффициент ионного распыления [13, 4]

$$\alpha_p = f(M_a, M_{и}, \varphi, E, p, \xi),$$

где $M_a, M_{и}$, – массы атома и иона;

φ – угол падения иона (между его траекторией и поверхностью мишени);

E – средняя энергия ионов;

p – давление газа в вакуумной камере;

ξ – коэффициент, характеризующий материал и состояние поверхности мишени.

На зависимости $\alpha_p(E)$ условно выделяют четыре области (см. рис. 4.3). В области 1 энергии ионов недостаточно для распыления. По мере увеличения энергии ионы проникают все глубже внутрь мишени. При этом число смещенных и эмитированных атомов возрастает (область 2). Однако при глубоком проникновении иона в мишень вероятность выхода смещенных атомов за пределы поверхности мишени уменьшается (область 3). В результате наступает момент, когда зависимость $\alpha_p(E)$ обнаруживает спад (область 4). Т. к. легкие ионы обладают большой проникающей способностью, максимум на кривой распыления $\alpha_p(E)$ для них наступает раньше, чем для тяжелых ионов.

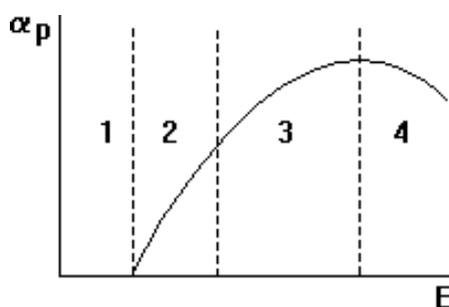


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента распыления от энергии бомбардирующих ионов

Согласно импульсной теории распыления [14], α_p увеличивается с уменьшением угла падения ионов на поверхность φ , т. к. при этом направления импульсов распыленных атомов и падающих ионов будут отличаться на меньший угол. Кроме того, при малых углах падения ионов соударения между частицами происходят в приповерхностной области, что также

увеличивает коэффициент распыления, особенно в случае больших энергий ионов. Максимумы коэффициентов распыления на кривых $\alpha_p(\varphi)$ обычно объясняют шероховатостью поверхности мишени, уменьшающей эффективность распыления при очень малых углах падения. Шероховатость поверхности мишени заметно влияет на коэффициент распыления даже при падении ионов по нормали к поверхности, поскольку часть распыленных атомов в этом случае может задерживаться ближайшими возвышениями на поверхности.

При облучении ионами низких энергий наименьшую зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов обнаруживают материалы (Cu, Ag, Au, Pt, Ni), обладающие наибольшим коэффициентом распыления, в то время как вещества, которые распыляются слабо (Mo, Ta, Fe), обнаруживают очень сильный угловой эффект. Такие сложные зависимости пока не получили удовлетворительного объяснения в теории распыления [14].

В промышленной практике встречаются диодные, триодные и многоэлектродные системы распыления. Диодная система ионного распыления имеет два электрода - катод и анод. Катодом служит распыляемый материал (мишень), к которому подводится высокий отрицательный потенциал 1 – 10 кВ. Анод, на котором размещается подложка, обычно соединяется с корпусом установки. Давление распыляющего газа составляет 1 – 10 Па.

Для получения пленки равномерной толщины размер активной поверхности мишени (т. е. поверхности, бомбардируемой ионами) должен значительно превышать размер подложки. Однако при этом увеличивается расход распыляемого металла и повышается уровень загрязнения им внутрикамерных механизмов. На практике диаметр электродов составляет 5 ÷ 15 см, а расстояние между ними 1 ÷ 12 см.

Недостатком такой системы распыления является осаждение распыляющих и остаточных газов на подложку до и в процессе формирования пленки, что ухудшает качество пленки и воспроизводимость ее параметров.

Этот недостаток в значительной мере устраняется в диодных системах распыления со смещением. Существует два типа таких систем: на постоянном и на переменном токе. В системах первого типа на анод подается небольшое относительно корпуса отрицательное (от –100 до –200 В) напряжение смещения. Во втором случае роль смещения играет положительная полуволна синусоидального напряжения, приложенного между анодом и катодом. В один полупериод, когда анод заряжен положительно по отношению к катоду, напряжение между ними равно напряжению распыления U_p . В другой, когда катод положителен по отношению к аноду, напряжение между ними равно напряжению смещения и составляет примерно 0,1 U_p . В отрицательный полупериод происходит распыление катода, а в положительный – очистка (обезгаживание) анода. Подбирая отношение амплитуд первой и второй полуволны напряжения, можно получить пленки с удельным сопротивлением, близким к сопротивлению массивного металла.

Скорость распыления (осаждения) в рассмотренных процессах составляет 0,2 ÷ 1,5 нм/с, т. е. значительно ниже скорости термического вакуумного испарения. Низкая скорость распыления, а также сравнительно высокое давление в парогазовом пространстве (1 ÷ 10 Па), приводящее к загрязнению пленок, сдерживали применение метода. Чтобы преодолеть указанные недостатки, были разработаны более эффективные ионно-плазменные процессы магнетронного и ионно-дугового типов [3, 12].

Наибольшее распространение получил магнетронный метод (см. рис. 4.4), обеспечивающий эффективное распыление в довольно чистых условиях. Повышение скорости распыления в 50 ÷ 100 раз по сравнению с обычным ионно-плазменным распылением достигается тем, что электроны, эмитируемые с мишени под действием бомбардирующих ионов, захватываются постоянным магнитным полем, которое заставляет их двигаться по сложной циклоидальной траектории вблизи поверхности мишени, резко увеличивая степень ионизации плазмы. При этом электроны, локализуясь вблизи мишени, не воздействуют на подложки, за счет чего снижается температура подложек.

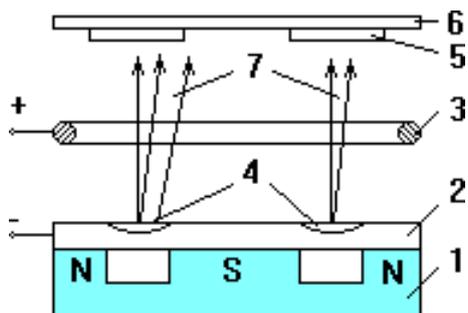


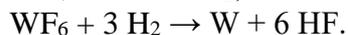
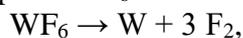
Рисунок 4.4 – Магнетронная распылительная система с плоской мишенью: 1 – магнитная система; 2 - катод-мишень; 3 – анод; 4 – зона распыления; 5 – подложки; 6 - подложкодержатель; 7 – поток распыленных частиц

4.3 Получение проводящих слоев химическими методами

4.3.1 Осаждение из парогазовых смесей

К моменту нанесения проводящих слоев полупроводниковые пластины обычно имеют на поверхности большое количество ступенек. Для физических методов осаждения характерен теневой эффект, проявляющийся в неравномерном воспроизведении ступенчатого рельефа на поверхности подложки. Методы химического осаждения слоев из парогазовых смесей свободны от указанного недостатка и позволяют получать конформные проводящие слои, которые часто обладают даже меньшим удельным объемным электросопротивлением, чем нанесенные физическими методами – термическим вакуумным испарением и ионно-плазменным распылением.

Химическое осаждение проводящих слоев из парогазовых смесей обычно проводится при пониженном давлении ($1 \div 250$ Па) и основано на использовании реакций пиролиза и восстановления [11]. Например, пленки вольфрама можно получить из гексафторида вольфрама WF_6 :



В зависимости от типа реактора осаждение пленок осуществляют при температурах подложек $60 \div 800$ °С. При низких температурах разложение соединения дополнительно активируют энергией плазмы или оптической энергией. Наряду с гексафторидом вольфрама в качестве исходного соединения может использоваться и WCl_6 .

Методом химического осаждения из парогазовых смесей получают пленки и др. тугоплавких металлов. При этом используются следующие реакции:



Осаждение металлов может быть предварительной стадией для формирования пленок соответствующих силицидов.

Поликристаллический кремний осаждают пиролизом силана при температуре $600 \div 650$ °С:

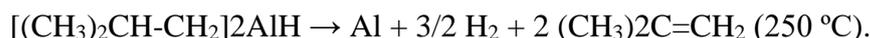


При температуре осаждения ниже 575 °С получаются аморфные слои, при температуре выше 625 °С – поликристаллические со столбчатой структурой. Скорость осаждения поликристаллического кремния составляет обычно $10 \div 20$ нм/мин.

Процесс химического осаждения алюминия из парогазовых смесей возможен с использованием металлоорганических соединений, например, триизобутилата алюминия:



с последующей реакцией



Однако высокие химические активности исходных металлоорганических соединений и самого алюминия не способствуют получению этим методом качественных пленок [11].

4.3.2 Электролитическое осаждение

Электролитическое осаждение металлов основано на разложении их солей (или окислов) в растворах под действием тока. На рис. 4.5 показана схема электролитической ванны (электролизера) и распределение потенциала в электролите. Металл осаждается на катоде. Соотношение между весом осажденного материала и параметрами процесса выражается первым и вторым законами электролиза [14]:

1) количество вещества, прореагировавшего на электроде при пропускании постоянного электрического тока, пропорционально силе тока и длительности электролиза;

2) при постоянном количестве пропущенного через электрод электричества массы прореагировавших веществ пропорциональны их электрохимическим эквивалентам.

Оба закона можно выразить формулой:

$$m = k \cdot Q = M \cdot Q / (F \cdot z),$$

где m – масса вещества, выделившегося на электроде;

k и M – соответственно электрохимический эквивалент и молярная масса этого вещества;

z – число электронов, участвующих в реакции;

Q – электрический заряд, пропущенный через электролит;

F – число Фарадея, равное $(96484,56 \pm 0,27)$ Кл/моль.

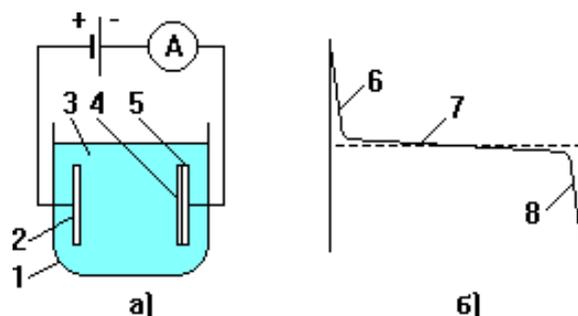


Рисунок 4.5 – Схема (а) и распределение потенциала по сечению (б) электролизера: 1 – ванна; 2 – анод; 3 – электролит; 4 – осадок; 5 – катод; 6 – анодный градиент потенциала; 7 – падение напряжения в ванне; 8 – катодный градиент потенциала

В общем случае электрический ток в системе электрод-электролит обусловлен электродными процессами (фарадеевский ток) и зарядением двойного электрического слоя (ток заряжения). Если свойства границы раздела не изменяются во времени, то стационарная плотность тока i определяется только электродными процессами и может служить мерой скорости электрохимической реакции. При одновременном образовании ряда продуктов, доля электрический тока, идущая на образование одного из них, называется выходом данного продукта по току.

Осаждение металла происходит при условии установления на катоде потенциала, достаточного для электровосстановления ионов до металлического состояния. Минимальное напряжение, которое надо приложить к электродам электролизера, чтобы осуществить электролиз, называется напряжением разложения. Напряжение разложения превышает разность термодинамических потенциалов обоих электродов на величину электродной поляризации и омического падения напряжения в электролизере. Для достижения достаточно высоких скоростей осаждения к электродам прикладывают напряжение более высокое, чем напряжение разложения. При этом энергия, затраченная на компенсацию электродной поляризации и омических потерь в различных участках электрической цепи, превращается в тепло.

Электродная поляризация - разность между значениями электродных потенциалов в отсутствие и при пропускании внешнего электрического тока через электрод - зависит от материала электрода, характера электродных процессов, состава электролита, температуры и др. условий и тем больше, чем больше плотность тока.

На процесс осаждения пленки влияют температура раствора, плотность тока, характер подложки и кислотность раствора pH. Как и в др. методах осаждения, при электролизе желательнее иметь гладкие подложки.

В технологии ИС электролитическое осаждение металлов широко используется для формирования внутренних жестких выводов кристаллов [3, 4, 11].

5 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЛОИ

В технологии ИС полупроводниковые слои создаются, во-первых, легированием приповерхностной области подложки различными примесями и, во-вторых, эпитаксией полупроводникового материала на ее поверхности [2-4, 10, 11].

Легированием полупроводникового материала достигается изменение его электрофизических свойств – типа электропроводности, удельного сопротивления, времени жизни носителей заряда. Применяются два метода легирования – термическая диффузия примесей и ионное внедрение (ионная имплантация).

Эпитаксия⁸ – процесс ориентированного наращивания слоя вещества на монокристаллическую подложку. Наращивание производят из газовой фазы (парогазовой смеси) или жидкого раствора, а также методом конденсации молекулярных пучков в вакууме.

5.1 Диффузия примесей

5.1.1 Диффузия и растворимость

Диффузия атомов примеси в полупроводник обусловлена их хаотическим тепловым движением в направлении градиента концентрации⁹. В кристаллической решетке движение атомов осуществляется отдельными скачками из одного положения равновесия в другое. Определяющее значение имеют температура, длительность процесса и граничные условия, в частности, поверхностная концентрация примеси.

Для кремния основными легирующими примесями являются элементы III (акцепторы) и V (доноры) групп периодической системы, резко изменяющие проводимость полупроводника. Элементы I и VIII групп создают в запрещенной зоне кремния глубоко лежащие уровни захвата или рекомбинации и изменяют время жизни носителей заряда.

Атомы элементов III и V групп периодической системы диффундируют в кристаллах кремния, занимая места вакансий. Для примесей, имеющих малый ионный радиус, например, элементов I, VIII групп периодической системы, характерен междоузельный механизм диффузии. Атомы некоторых элементов в кремнии могут диффундировать одновременно и по междоузлиям, и по вакансиям. Механизм диффузии атомов примесей в соединениях A_3B_5 носит субрешеточный характер.

При диффузии из неограниченного (постоянного) источника поверхностная концентрация легирующей примеси определяется ее предельной растворимостью в полупроводнике.

Существует обратная корреляция между растворимостью и скоростью диффузии примеси. Если примесные атомы устойчивы в вакантных местах, то предельная растворимость примеси велика, а скорость диффузии мала. Быстро диффундирующим примесям свойственна малая растворимость.

⁸ От греческого *epi* - на, над и *taxis* - расположение, порядок.

⁹ Термодинамическое рассмотрение процесса диффузии указывает на определяющую роль градиента химического потенциала, а не градиента только концентрации.

Примесные атомы в вакансиях образуют с полупроводником твердые растворы замещения, а атомы в междоузлиях – твердые растворы внедрения, что не изменяет природы полупроводника. Однако в ряде случаев диффузия атомов примеси может приводить к образованию новых химических соединений (в области диффузии). В частности, диффузией кислорода обусловлен процесс термического окисления кремния.

5.1.2 Коэффициент диффузии

Диффузионный поток атомов примеси, выравнивающий их концентрацию, определяется законом Фика. В одномерном приближении плотность потока

$$J = -D \frac{dN}{dx},$$

где N – концентрация атомов примеси;

D – коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии зависит от энергии связи атомов примеси в решетке, плотности вакансий в кристалле, постоянной кристаллической решетки и др. параметров примеси и кристалла полупроводника. С повышением температуры коэффициент диффузии возрастает по экспоненциальному закону:

$$D = D_0 \exp(-W/kT), \quad (5.1)$$

где D_0 – константа диффузии (частотный множитель);

W – энергия активации диффузионного процесса, т. е. энергия, необходимая для элементарного скачка атома примеси в кристалле.

5.1.3 Решения уравнений диффузии

Накопление примеси со временем в элементе объема полупроводника, ограниченном плоскостями 1 и 2, перпендикулярными диффузионному потоку и отстоящими друг от друга на расстоянии dx , можно выразить:

$$J_1 - J_2 = -D \frac{dN}{dx} + D \frac{d}{dx} \left(N + \frac{dN}{dx} dx \right) = \frac{dN}{dt} dx,$$

откуда

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2}. \quad (5.2)$$

В случае трех измерений

$$\frac{dN}{dt} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} N). \quad (5.3)$$

Уравнения (5.2), (5.3) называются уравнениями диффузии.

Предположим, что диффузия происходит в полуограниченном объеме полупроводника, коэффициент диффузии не зависит от концентрации примеси, вся вводимая примесь в начале процесса (при $t = 0$) равномерно распределена в тонком приповерхностном слое толщиной h :

$$N(x, 0) = \begin{cases} N_S & \text{для } 0 \leq x \leq h, \\ 0 & \text{для } h < x \leq \infty. \end{cases}$$

Для этого случая (диффузия из ограниченного источника) решение одномерного уравнения (5.2) имеет вид¹⁰

$$N(x, t) = \frac{N_S}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{h-x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{h+x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (5.4)$$

Распределение концентрации примеси со временем изменяется, как показано на рис. 5.1, а. Поверхностная концентрация примеси убывает по закону

$$N(0, t) = N_S \operatorname{erf} \left(\frac{h}{2\sqrt{Dt}} \right).$$

¹⁰ $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ – функция ошибок (error function).

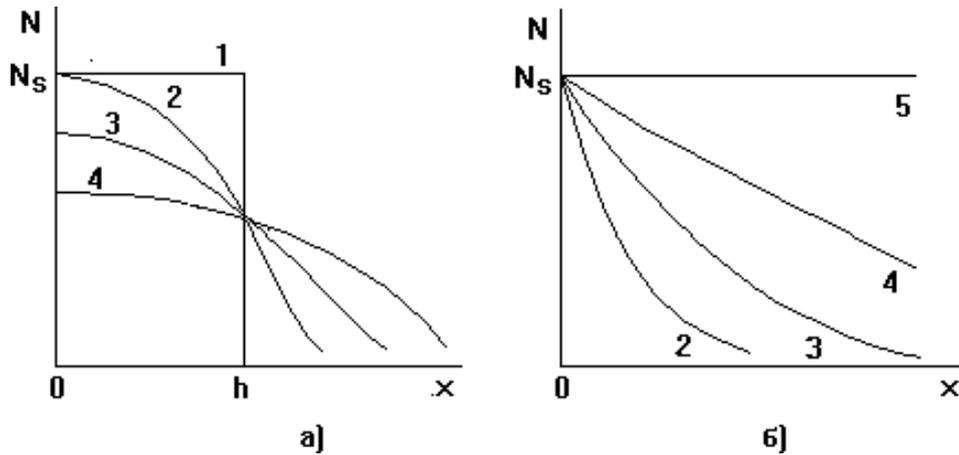


Рисунок 5.1 – Распределение примеси при диффузии из ограниченного (а) и неограниченного (б) источников: $t_1 = 0, t_2 < t_3 < t_4, t_5 = \infty$

Для $x < Dt/h$ и $t > h^2/D$ решение (5.4) приближенно можно представить в виде функции Гаусса

$$N(x, t) = \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \right) \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right), \quad (5.5)$$

где $Q = N_s h$ – количество атомов примеси в слое толщиной h , отнесенное к единице площади.

При диффузии из неограниченного источника, когда на поверхности полупроводника (в плоскости $x = 0$) поддерживается постоянная концентрация примеси в течение всего времени проведения процесса, граничное и начальное условия задаются в виде

$$N(0, t)|_{t \neq 0} = N_s; \quad N(0, 0) = 0$$

В этом случае решение одномерного уравнения (5.2) соответствует дополнительной функции ошибок (см. рис. 5.1, б)

$$N(x, t) = N_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \quad (5.6)$$

При изготовлении структур элементов ИС требуется вполне определенное распределение примеси в диффузионном слое. Не всегда нужное распределение можно получить при неизменных граничных условиях. В таких случаях процесс диффузии проводят в две стадии: в начале осуществляется так называемая загонка примеси, а затем – ее перераспределение (или разгонка). Примером может служить технологический процесс изготовления базовой области транзистора (см. раздел 1.3).

В стадии загонки диффузией из неограниченного источника создается тонкий слой с высокой поверхностной концентрацией примеси и распределением, соответствующим дополнительной функции ошибок. Количество атомов примеси в слое (на единицу поверхности) определяется соотношением

$$Q = \int_0^{t_1} J(t) dt,$$

где t_1 – время загонки. Плотность потока примеси

$$J(t) = -D \frac{dN}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{DN_s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left(-\frac{x^2}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \Big|_{x=0} = \frac{N_s \sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}}.$$

С учетом этого,

$$Q = \frac{2N_s}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt_1}. \quad (5.7)$$

В стадии разгонки происходит снижение поверхностной концентрации и увеличение глубины проникновения примеси. Результирующее распределение соответствует функции Гаусса, что характерно для диффузии из ограниченного источника.

Если диффузия проводится в несколько стадий, но граничные условия на всех стадиях остаются неизменными, то результирующее распределение примеси будет соответствовать этим граничным условиям, а значение произведения Dt будет равно сумме значений, отвечающих отдельным стадиям:

$$Dt = \sum_{i=1}^n Dt_i,$$

где n – число стадий процесса.

5.1.4 Локальная диффузия

В планарной технологии ИС диффузия примесей в полупроводник осуществляется, как правило, не по всей поверхности пластины, а только на локальных ее участках, не защищенных маскирующим покрытием. При локальной диффузии рассмотренные одномерные решения диффузионных задач не могут быть использованы: необходимо решать трехмерное уравнение (5.3).

Предположим, что диффузия примеси в полупроводник проводится через прямоугольное окно в покрытии (см. рис. 5.2, а), причем $h_y \ll h_z$. В этом случае процесс диффузии описывается двумерным уравнением

$$\frac{dN}{dt} = D \left(\frac{d^2N}{dx^2} + \frac{d^2N}{dy^2} \right).$$

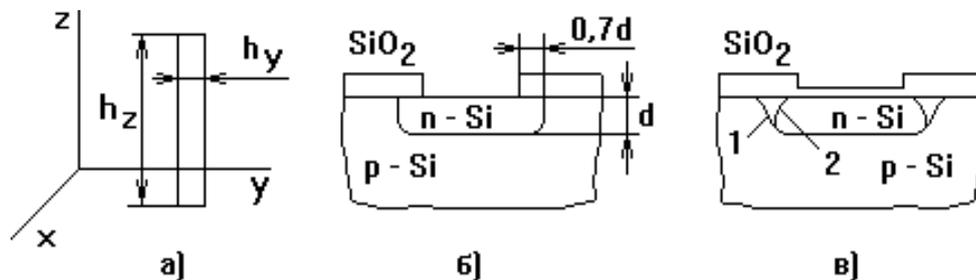


Рисунок 5.2 – Краевые эффекты при диффузии: а - конфигурация окна в маскирующем покрытии; б - боковая диффузия примеси под маску; в – обогащение (1) и обеднение (2) приповерхностного слоя примесью при диффузии в окислительной среде

Решения двумерного уравнения диффузии, полученные численными методами, показывают, что на расстояниях от края маскирующего покрытия, больших $4 Dt$, распределение $N(x)$ практически не отличается от полученного в одномерном случае. Если же $h_y < 4 Dt$, то глубина проникновения примеси существенно меньше, чем при одномерной диффузии.

В результате боковой диффузии примеси выход образующегося р-п-перехода на поверхность оказывается защищен маскирующим покрытием от воздействия окружающей среды (см. рис. 5.2, б).

При проведении процесса диффузии в окислительной среде возможно приповерхностное обогащение или обеднение примесью диффузионного слоя (см. рис. 5.2, в), обусловленное различной растворимостью примеси в полупроводнике и растущем слое диоксида кремния SiO_2 . Так, например, большая растворимость фосфора в кремнии по сравнению с SiO_2 приводит к приповерхностному обогащению диффузионного слоя фосфором. При диффузии бора или алюминия происходит обратное явление [3].

5.1.5 Способы проведения диффузии

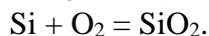
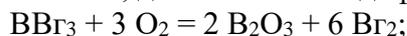
Диффузаны - материалы, используемые для проведения процессов диффузии, - обычно представляют собой химические соединения легирующих примесей с водородом, галогеном, кислородом или др. элементами. В зависимости от исходного фазового состояния диффузаны подразделяют на газообразные, жидкие и твердые.

На начальных этапах развития технологии ИС преимущественно использовали жидкие и газообразные диффузаны, подводившиеся к поверхности подложек в потоке газа-носителя (способ открытой трубы).

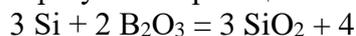
Газообразные источники – это обычно гидриды примесей, например фосфин PH_3 , диборан B_2H_6 , арсин AsH_3 , стибин SbH_3 . В качестве жидких диффузантов применяют галогениды примесей, в частности треххлористый фосфор PCl_3 , хлорокись фосфора POCl_3 и трехбромистый бор BBr_3 .

Недостаток методов диффузии из жидких и газообразных источников состоит в том, что сами источники и продукты реакций являются токсичными веществами.

Наличие кислорода в составе газа-носителя приводит к образованию оксидов примеси и кремния. Так, для BV_3 в зоне диффузии проходят следующие химические реакции:

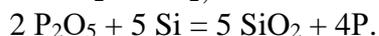
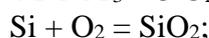
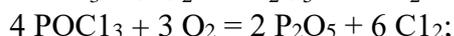
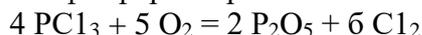


При взаимодействии тонкой пленки SiO_2 с B_2O_3 образуется боросиликатное стекло $mB_2O_3 \cdot nSiO_2$. В результате реакции



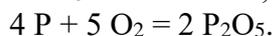
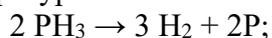
В на поверхности кремния выделяется элементарный бор, который и диффундирует в подложку.

Аналогичные реакции происходят для соединений PCl_3 и $POCl_3$, используемых для диффузии фосфора в кремний:

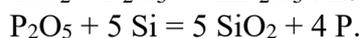
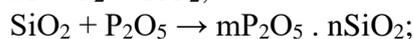
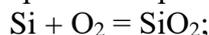


Рассмотренные химические реакции сопровождаются выделением галогенов, способных травить поверхность кремния. При достаточном содержании кислорода в газовом потоке (более 7 – 10 %) травление кремния предотвращается ростом пленки SiO_2 .

Положительной особенностью диффузии из газообразных источников является возможность достаточно просто регулировать поверхностную концентрацию в широких пределах изменением содержания гидридов в инертном газе. При диффузии из фосфина может использоваться его смесь с аргоном и кислородом. В атмосфере реакционной камеры при температурах выше 440 °С происходит разложение фосфина и образование оксида фосфора:



На поверхности кремния проходят реакции



Как показывают приведенные реакции, и при жидком и при газообразном источниках процесс термической диффузии идет фактически из пленок стекол на поверхности полупроводника, образованных оксидами кремния и соответствующей примеси. Естественным развитием технологии диффузии примесей в полупроводник стало разделение процессов нанесения пленки с диффузионным источником и собственно диффузии.

Нанесение легированных оксидных пленок на поверхность подложек может осуществляться на центрифуге из растворов определенного состава, химическим осаждением из газовой фазы и др. способами. Поскольку скорость химического осаждения силикатных стекол на несколько порядков больше скорости диффузионных процессов, то несложно организовать осаждение так, чтобы обеспечить высокую равномерность получаемых пленок по толщине и составу. Это позволяет увеличить производительность процесса и улучшить качество структур.

В последние годы в качестве твердого диффузанта применяется также высоколегированный поликристаллический кремний.

Дальнейшее совершенствование способов проведения термической диффузии направлено на повышение воспроизводимости основных параметров – поверхностной концентрации примеси и толщины диффузионных слоев, на расширение диапазона их регулирования, а также на общее снижение стоимости проводимых процессов [3].

5.2 Ионное легирование

Процесс ионного легирования полупроводника включает две основных операции: собственно внедрение (имплантацию) ионов примеси и отжиг радиационных дефектов. Суть первой операции состоит в том, что на поверхность полупроводниковой подложки подается пучок ускоренных ионов примеси. Начальная энергия ионов определяет глубину их проникновения в полупроводник (мишень). После многократных столкновений с электронами и атомами подложки ионы теряют избыточную энергию и останавливаются. В результате столкновений ионов с атомами в материале подложки образуются точечные дефекты и даже области с аморфной структурой. Вторая операция - отжиг - обеспечивает устранение дефектов кристаллической структуры и создание заданного концентрационного профиля распределения примеси [2-4, 11].

5.2.1 Распределение пробегов ионов в мишени

Внедряемые в полупроводник ионы примеси теряют избыточную энергию в результате упругих столкновений с ядрами атомов и неупругого взаимодействия с электронами мишени¹¹. В предположении, что оба механизма действуют одновременно и независимо, средняя потеря энергии иона на единичной длине пробега описывается выражением

$$\frac{dE}{dx} = N[S_n(E) + S_e(E)], \quad (5.8)$$

где N – среднее число атомов в единице объема мишени;

$S_n(E)$, $S_e(E)$ – соответственно ядерная и электронная тормозные способности мишени;

E – начальная энергия иона.

Средняя полная длина пробега ионов R (см. рис. 5.3) определяется интегрированием (5.8)¹²:

$$R(E) = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{[S_n(E) + S_e(E)]} \quad (5.9)$$

Ядерное торможение преобладает при низких энергиях внедряемых ионов ($S_n \gg S_e$), а при высоких – электронное.

На основе теории торможения ионов рассчитаны R_p и ΔR_p . Для основных примесей, используемых в кремниевых ИС, данные по R_p и ΔR_p представлены в табл. 5.1 [2].

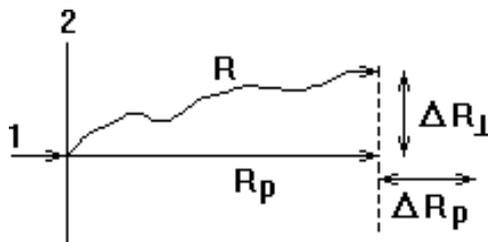


Рисунок 5.3 – Схематическое изображение полной длины пробега иона R , проекции пробега R_p , рассеяния проекции пробега ΔR_p и бокового рассеяния ΔR_{\perp} : 1 – падающий ион, 2 – поверхность мишени

Поскольку отдельные ионы подвергаются различному числу столкновений, они имеют различные и длины пробегов, и средние проекции пробегов. Рассеяние средней проекции пробегов описывается средним квадратичным отклонением ΔR_p . Распределение средних проекций пробегов по глубине определяет концентрационные профили внедренных ионов.

¹¹ Взаимодействие иона с электронами мишени подобно торможению твердого тела в вязкой среде, при котором потеря энергии пропорциональна скорости тела.

¹² Такое определение длины пробега учитывает лишь среднюю величину потери энергии иона на единичной длине (но не на элементе длины dx) и справедливо лишь в первом приближении.

Таблица 5.1 - Параметры внедрения ионов бора и фосфора в кремний

E , кэВ	Бор		Фосфор	
	R_p , нм	ΔR_p , нм	R_p , нм	ΔR_p , нм
10	38	19	15	8
30	106	39	42	19
100	307	69	135	53
300	662	105	406	115

Существует также рассеяние ионов относительно направления их первоначального движения. Его называют боковым рассеянием ΔR_{\perp} (рис. 5.3). Оно играет важную роль при локальном ионном внедрении, поскольку определяет степень проникновения ионов под маскирующее покрытие. Боковым рассеянием определяется, в частности, длина канала МОП - транзисторов с самосовмещенным затвором.

Ускоренные ионы при внедрении соударяются с электронами и атомами полупроводника и тормозятся. Согласно теоретической модели процесса ионный пучок, падающий на поверхность кристалла, распадается на два беспорядочный и каналированный.

Беспорядочный пучок содержит частицы, которые ударяются о поверхность кристалла вблизи регулярных атомов кристаллической решетки на расстоянии, меньшем некоторого критического. Взаимодействуя с этими 50 атомами, они сильно рассеиваются, поэтому для ионов беспорядочного пучка кристалл является как бы аморфным телом атомами, они сильно рассеиваются, поэтому для ионов беспорядочного пучка кристалл является как бы аморфным телом.

Каналированный пучок содержит частицы, которые, не испытав столкновений с поверхностными атомами, могут дальше продвигаться по междоузельному пространству кристаллической решетки вдоль атомных плоскостей, как бы по каналам. Каналированный пучок возникает, если поверхность полупроводникового кристалла ориентирована по одной из главных кристаллографических плоскостей и ионы приближаются к оси канала под углом, меньшим некоторого критического.

Потери энергии ионов беспорядочного пучка обусловлены взаимодействием с электронами и атомами кристаллической решетки. Считается, что преобладающим механизмом потерь каналированными ионами являются взаимодействие с электронами (электронное торможение). Если каналированный и неканалированный пучки тормозятся независимо друг от друга, то распределение внедренных ионов получается суперпозицией распределений для обоих пучков.

При отсутствии эффекта каналирования рассеяние ионов носит случайный характер, и распределение их пробегов описывается функцией Гаусса. Для построения кривой распределения примесей необходимо знать два параметра: среднюю проекцию пробега R_p , и ее среднее квадратическое отклонение ΔR_p . Распределение концентрации примеси в полупроводнике дается выражением

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right],$$

где D – доза облучения, равная количеству ионов, бомбардирующих единицу поверхности подложки за время внедрения.

Если общий заряд этих ионов Q , то $D = Q/q l$, где q – заряд электрона; l - целое число, соответствующее заряду иона. Доза ионов связана с током пучка J , площадью его сечения A и временем внедрения t зависимостью

$$D = Jt/qLA.$$

Максимальная концентрация внедренной примеси

$$N_{max} = D/(\sqrt{2\pi}\Delta R_p)$$

и не соответствует поверхностной концентрации (что характерно для диффузионных процессов), а наблюдается внутри полупроводника. С увеличением энергии ионов максимум концентрации ионов перемещается вглубь полупроводника, а поверхностная концентрация падает (см. рис. 5.4).

Присутствие каналированных пучков изменяет характер распределения примеси: возможно появление второго максимума, обычно нежелательное в технологических процессах изготовления ИМС, либо затягивание ниспадающего участка после максимума. Разориентацией подложки, нанесением на поверхность аморфного слоя или выбором угла падения пучка по отношению к главным кристаллографическим направлениям, можно исключить или ослабить эффект каналирования.

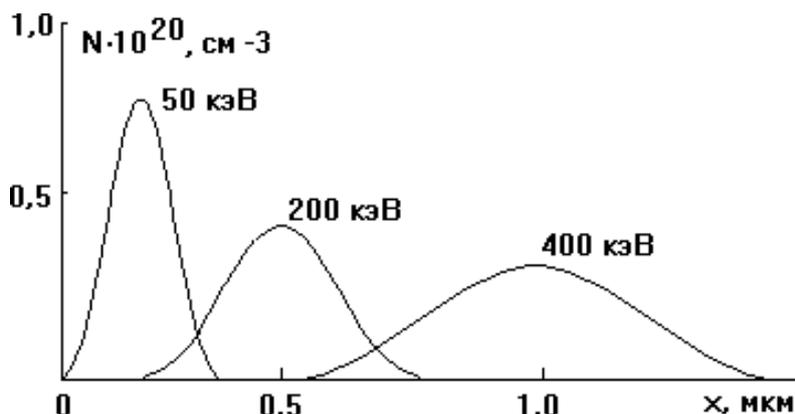


Рисунок 5.4 – Распределение проекций пробегов (концентрации) ионов бора различной энергии в кремнии

В технологии СБИС есть ряд технологических операций, в которых внедрение ионов осуществляется в подложку, покрытую одним или двумя слоями различных материалов. Например, внедрение примеси в область канала МОП - транзисторов с целью регулировки порогового напряжения, внедрение примеси в область истока и стока МДП - транзистора, если оно проводится после формирования затвора и изолирующих областей и при этом с поверхности подложки не снята использующаяся в качестве маскирующего покрытия пленка нитрида кремния. Существование пленок на поверхности подложки изменяет профиль распределения примеси в легированных слоях.

5.2.2 Радиационные эффекты

При ионном легировании полупроводников концентрация свободных носителей заряда в легированном слое оказывается меньше концентрации внедренных ионов примеси, что установлено, например, путем внедрения радиоактивных изотопов [2]. Причина этого в том, что внедренные ионы, теряя энергию, останавливаются как в междоузлиях, так и в узлах кристаллической решетки. В междоузельном положении ионы примеси электрически неактивны. И только останавливаясь в узлах кристаллической решетки они создают свободные носители заряда и определяют тем самым электропроводность легированного слоя полупроводника.

Таким образом, из-за того, что часть атомов примеси оказывается в междоузельном положении, электропроводность инверсионных слоев существенно отличается от той, которую можно было бы ожидать, на основании расчета концентрации введенных атомов. Чтобы судить о степени отличия вводится величина f , называемая коэффициентом использования вводимой примеси. При внедрении акцепторной примеси

$$f_A = (p_p + N_D) / N_A,$$

где p_p – средняя концентрация дырок в инверсионном слое;

N_D – концентрация доноров в исходном кремнии;

N_A – средняя концентрация введенных атомов акцепторной примеси.

Аналогично можно ввести коэффициент использования при внедрении донорной примеси. Если каждый введенный атом примеси становится ионизированным акцептором или донором, то коэффициент f практически равен единице.

Электрические свойства легированных слоев зависят и от так называемых радиационных структурных дефектов, которые возникают при бомбардировке поверхности полупроводника ионами с высокими энергиями. Ионы при внедрении в кристалл и взаимодействии с кристаллической решеткой образуют структурные дефекты типа дефектов по Френкелю. Эти дефекты создают вблизи поверхности полупроводника сильно разупорядоченные области.

Структурные дефекты сильно влияют на электрические свойства легированных слоев полупроводника. Прежде всего, они снижают подвижность носителей заряда. В результате электропроводность легированных слоев будет определяться не только концентрацией введенной примеси, но и концентрацией структурных дефектов. Кроме того, структурные дефекты приводят к появлению энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, увеличивая скорость рекомбинации.

Измерения показывают, что число дефектов решетки нарастает линейно с ростом дозы облучения. При больших дозах наступает насыщение, которое можно объяснить тем, что отдельные дефекты сливаются, образуя сплошной разупорядоченный слой, уже не имеющий кристаллической структуры.

Для снижения концентрации дефектов после ионного внедрения проводят отжиг полупроводниковых пластин. Чем больше структурных нарушений, тем выше должна быть температура отжига и наоборот. Проведение отжигов при $T = 400 - 900$ °C приводит к возрастанию коэффициента использования примеси, поскольку тепловое возбуждение кристаллической решетки способствует расположению ионов в ее узлах. Для любой дозы коэффициент использования после отжига приближается к единице, но чем выше доза, тем более высокая температура для этого требуется.

При отжиге дефектов и активации примеси за счет диффузии происходит размывание концентрационного профиля. Для его установления можно найти решение одномерного уравнения диффузии для ограниченного источника примеси, представляющего собой легированный слой с гауссовым распределением примеси. Если, как и ранее, при рассмотрении диффузионных процессов предположить, что поверхность кремниевой пластины является отражающей границей, т. е. обратная диффузия примеси из подложки отсутствует, а коэффициент диффузии не зависит от концентрации внедренных ионов, то распределение внедренных ионов после отжига дефектов будет описываться функцией Гаусса

$$N(x, t) = \frac{D}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2Dt)}} \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)} \right],$$

Изменение концентрационного профиля при отжиге пластин после ионного внедрения может быть устранено при применении для отжига лазерного излучения с энергией $1 - 100$ Дж/см². Отжиг проводится в течение короткого времени, составляющего единицы секунд, поэтому заметной диффузии внедренной примеси не происходит. При этом быстрый лазерный отжиг обеспечивает такую же электрическую активность внедренной примеси, как и обычная термическая обработка. Принцип быстрого отжига дефектов состоит в том, что в результате воздействия лазерного луча происходят процессы твердофазной или жидкофазной эпитаксии.

5.2.3 Практические способы ионного внедрения

Установка для ионного внедрения (см. рис. 5.5) состоит из нескольких основных блоков: ионного источника, магнитного масс-анализатора и камеры с пластиной-мишенью [2].

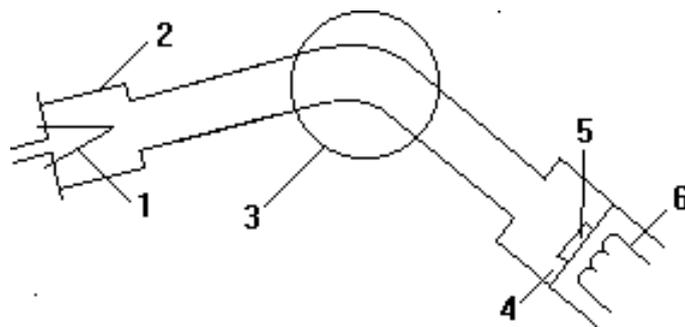


Рисунок 5.5 – Схема установки для ионного внедрения: 1 - камера источника примеси; 2 - термокатод; 3 - магнитный масс-анализатор; 4 – камера мишени; 5 - пластина-мишень; 6 - нагреватель мишени

Ионный источник представляет собой вакуумную камеру, в которой поддерживается давление $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. В камере осуществляется ионизация паров легирующей примеси. В качестве ионизируемых используются вещества, содержащие требуемую примесь. Например, для получения ионов фосфора можно использовать газ PF_5 , для получения ионов бора – газ BF_3 . Ионизация паров легирующей примеси осуществляется бомбардировкой электронами, эмитируемыми термокатодом. Положительные ионы экстрагируются из области их образования с помощью отрицательно заряженного пустотелого зонда, фокусируются в пучок электростатическими линзами и ускоряются напряжением 20 – 300 кВ, подаваемым на ускоряющий электрод.

Пучок ионов формируется диаметром до 1 см. Пучок ускоренных ионов попадает в магнитное поле масс-анализатора, которое заставляет ионы перемещаться по дуге окружности с радиусом, определяемым магнитным полем H , ускоряющим напряжением U и массой иона M ,

$$r = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2MU}{q}}$$

Напряженность магнитного поля составляет (4,0 - 4,8) 10^5 А/м.

Таким образом, ионы с различными массами будут двигаться по различным траекториям. Если в первоначальном пучке кроме ионов основной легирующей примеси присутствовали ионы посторонних примесей, то вследствие сепарирования по массам, происходящего в масс-анализаторе, ионы основной примеси будут собираться в отдельный пучок, в котором присутствие других примесей исключено. Выделенный по массе пучок ионов проходит через апертурную диафрагму и направляется в приемную камеру, где располагаются подложки. Сепарирование ионов по массам обеспечивает одно из основных достоинств легирования полупроводников ионным внедрением, а именно исключительно высокую чистоту внедряемой примеси.

В камере с мишенью обычно предусматривается возможность нагрева мишени. Установка содержит устройство для сканирования ионного пучка по подложке. Подложка имеет хороший электрический контакт с держателем подложки. В электрической цепи держателя подложки может стоять интегратор заряда. Электроны проходят через интегратор заряда и нейтрализуют ионы внедренные в подложку. По интегрированному заряду можно определить дозу внедренных ионов. Типичные диапазоны токов пучка и дозы составляют ($10 - 10^3$) мкА и $10^{11} - 10^{16}$ ион./см² соответственно.

5.2.4 Локальное ионное внедрение

Для проведения локального ионного внедрения используются маскирующие пленки. К материалам для маскирующих пленок относятся диэлектрики SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , металлы Al, Ni, Au, поликремний, фоторезист. Наиболее широко в качестве маскирующей пленки в технологии биполярных ИС используются пленки SiO_2 и фоторезист, а в технологии МДП -

ИС пленки SiO_2 , поликремний и фоторезист. Поскольку пробег иона зависит от его энергии, то, следовательно, от энергии ионов зависит и необходимая толщина маскирующей пленки.

Средние проекции пробега при внедрении бора, мышьяка и других примесей в пленки SiO_2 сопоставимы со средними проекциями пробега, полученными для кремния, иными словами тормозные способности Si и SiO_2 близки [2-4].

При выборе материала маски необходимо учитывать, что после ионного внедрения производится отжиг радиационных дефектов и активация внедренной примеси. Это относится, в основном, к выбору материала затвора в МОП - транзисторах с самосовмещенным затвором, когда области стока и истока создаются ионным внедрением уже после формирования затвора.

Использование в качестве маскирующей пленки алюминия заставляет снижать температуру отжига радиационных дефектов до температуры плавления Al – 660 °С. Применение маскирующих пленок SiO_2 , поликремния позволяет проводить высокотемпературные отжиги (800 - 900 °С) без существенного изменения полученного профиля распределения примеси.

Ионное внедрение примесей, наряду с диффузией, широко используется в технологии изготовления ИС. По сравнению с диффузией оно имеет ряд положительных особенностей. Одна из них – возможность внедрения примеси при сравнительно низких температурах кремниевых подложек. При этом профиль распределения внедренной примеси и ее концентрация могут регулироваться независимо: профиль – энергией ионов, а концентрация – дозой облучения. Кроме того, при ионном внедрении концентрация примеси не ограничивается, как в процессе диффузии предельной растворимостью, соответствующей температуре процесса.

В биполярных ИС применение ионного внедрения упрощает процесс получения эмиттеров малых площадей, поскольку здесь при локальном внедрении значительно снижено боковое продвижение примеси под защитную маску. Для ионного внедрения примеси характерны высокая однородность легирования по поверхности подложки и точный контроль общего количества внедренной примеси. Поэтому замена первого этапа диффузии (загонки) при создании базовой области транзистора на ионное внедрение примеси обеспечивает лучшее воспроизведение структурных и электрических параметров транзисторов биполярных микросхем. В МОП – ИС использование ионного внедрения направлено, в основном, на получение МОП - транзисторов с самосовмещенным затвором.

5.3 Эпитаксиальное наращивание

Эпитаксия¹³ – процесс ориентированного наращивания слоя вещества на монокристаллическую подложку. Наращивание производят из газовой фазы (парогазовой смеси) или жидкого раствора, а также методом конденсации молекулярных пучков в вакууме [2-4, 10, 11]. Монокристаллическая подложка играет роль затравочного кристалла. Если материалы подложки и слоя идентичны (или отличаются только составом примеси), процесс наращивания называют автоэпитаксией (гомоэпитаксией). Наращивание монокристаллического слоя на инородной подложке (например, слоя кремния на сапфире) называют гетероэпитаксией.

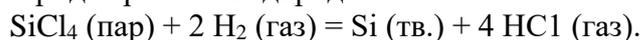
Для гетероэпитаксии характерно несоответствие положений атомов эпитаксиального слоя и подложки. Особенности гетероэпитаксиального наращивания проявляются, в основном, на начальном этапе, когда формируется переходный слой. После образования сплошного слоя дальнейшее наращивание вещества происходит аналогично автоэпитаксии.

5.3.1 Газофазная эпитаксия

Основными разновидностями газофазной эпитаксии (ГФЭ) кремния являются хлоридный и гидридный методы [2].

¹³ От греческого epi - на, над и taxis - расположение, порядок.

Хлоридный метод автоэпитаксии кремния основан на реакции восстановления тетрахлорида кремния водородом:



Эпитаксия осуществляется на установке, которая состоит из реакционной камеры и газовой системы, обеспечивающей подачу в камеру водорода H_2 , азота N_2 , их смеси и хлористого водорода HCl . Подача азота обусловлена необходимостью удаления воздуха из газовой системы и реакционной камеры и обеспечения безопасного функционирования установки. Смесь H_2 и HCl вводится для газового травления поверхностей подложек непосредственно перед эпитаксиальным наращиванием. В газовую систему включены сосуды (барботеры), содержащие жидкие тетрахлорид кремния и галогениды тех примесей, которые должны быть введены в эпитаксиальную пленку в процессе роста.

Реакционная камера и газовая система выполняются из особо чистого переплавленного кварца. Нагрев реакционной камеры происходит от индукционного нагревателя. Подставки под подложки выполняются из графита и служат одновременно для поглощения и передачи тепла. Поскольку графит – пористый материал и очистка его сложна, то при высоких температурах из него возможно большое газоотделение. Чтобы исключить загрязнение атмосферы камеры графитом и выделяющимися из него газами, подставки покрывают кремнием или карбидом кремния. Для предотвращения реакции на стенках камеры их охлаждают, создавая обычно водяную рубашку.

Химические реакции, происходящие при эпитаксиальном наращивании, относятся к гетерогенным и, соответственно, включают ряд этапов (стадий). Этапы переноса реагентов к поверхности и переноса продуктов реакции определяются скоростью газового потока. Адсорбция реагентов, собственно химическая реакция и десорбция сильно зависят от температуры. Процесс присоединения образующихся атомов кремния к подложке также определяется температурой. В целом скорость эпитаксиального наращивания контролируется наиболее медленным из этих этапов.

На рис. 5.6 представлена зависимость скорости наращивания от температуры подложек и скорости газового потока. При низких температурах ($T < 1150$ °C) процесс наращивания определяется химической реакцией (скорость наращивания повышается с ростом температуры, но слабо зависит от скорости потока), а при 1200 – 1300 °C – переносом реагирующих веществ (скорость наращивания практически не зависит от температуры, но сильно зависит от скорости потока газа).

Низкотемпературный диапазон наращивания характеризуется низким качеством эпитаксиального слоя, т. к. процесс поверхностной миграции атомов кремния практически отсутствует. При $T < 1000$ °C это приводит к росту нитевидных кристаллов, а при 1000 – 1150 °C - к росту беспорядочно ориентированных поликристаллов или монокристаллических слоев с большой концентрацией структурных дефектов. При $T > 1150$ °C наращиваются эпитаксиальные слои кремния с достаточно высокой степенью структурного совершенства. Однако, наиболее качественные слои образуются при 1250 – 1270 °C.

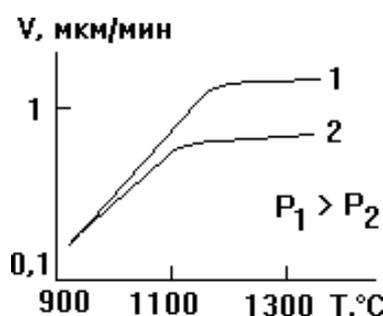
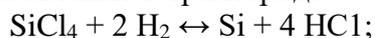
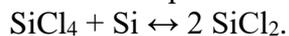


Рисунок 5.6 – Зависимость скорости наращивания эпитаксиального слоя от температуры для различных скоростей газового потока

Концентрация SiCl_4 в области подложек, определяющая скорость роста, зависит как от скорости газового потока, так и от давления паров SiCl_4 . Зависимость скорости наращивания от молярной концентрации SiCl_4 в газовом потоке обнаруживает максимум при молярной концентрации $N_M \approx 0,1$. Повышение содержания SiCl_4 до значений $N_M \approx 0,27$ при температуре процесса 1270°C приводит не к наращиванию слоя кремния, а к травлению поверхности подложки. Такой характер рассматриваемой зависимости обусловлен обратимостью реакции восстановления тетрахлорида

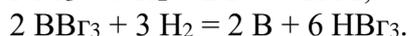
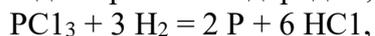


и возможностью протекания реакции диспропорционирования



Вследствие этих реакций при высоком содержании SiCl_4 , а следовательно и HCl , могут происходить одновременно два процесса - наращивание слоя кремния и его подтравливание.

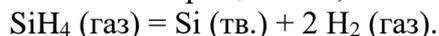
Легирование эпитаксиальных слоев в процессе роста осуществляют введением в газовую фазу галогенидов легирующих примесей. Используемые для легирования галогениды элементов III и V групп – трехбромистый бор BBr_3 , треххлористый фосфор PCl_3 , треххлористый мышьяк AsCl_3 и треххлористая сурьма SbCl_3 – представляют собой жидкие, легко испаряющиеся вещества. Концентрация легирующей примеси варьируется изменением температуры испарителя (сосуда, содержащего галогенид примеси) и скорости водородного потока. Атомы легирующей примеси образуются в результате реакций восстановления галогенидов примеси водородом, например:



Второй способ легирования основан на использовании газовых источников легирующих элементов, например гидридов – бора B_2H_6 , фосфора PH_3 , сурьмы SbH_3 , мышьяка AsH_3 . В этом способе концентрация легирующего элемента варьируется изменением концентрации соответствующего гидрида в смеси гидрида с водородом.

В хлоридном процессе автоэпитаксии кремния возможно интенсивное внедрение примесей, содержащихся в подложке, в растущий эпитаксиальный слой. Обусловлено такое внедрение процессами диффузии и автолегирования, особенно заметными при наращивании высокоомных слоев на сильнолегированных подложках. Диффузия примеси из подложки в растущий слой происходит, если есть градиент концентрации примеси, и процесс наращивания проводится при высоких температурах. Автолегирование обусловлено травлением кремниевой подложки в результате взаимодействия с HCl или реакции диспропорционирования SiCl_4 . В процессе травления образуются не только хлориды кремния, но и хлориды содержащихся в подложке примесей. Примеси переходят в газовую фазу и из газовой фазы внедряются в растущий слой.

Процессы диффузии и автолегирования, свойственные хлоридному методу, ограничивают получение тонких эпитаксиальных слоев кремния с заданными свойствами на сильнолегированных подложках. Для решения этой задачи используется гидридный метод эпитаксиального наращивания, основанный на пиролизе моносилана кремния:



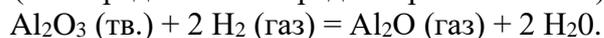
Реакция пиролитического разложения SiH_4 начинается примерно с 600°C . Рост качественных слоев кремния происходит уже при температуре около 1000°C . Снижение температуры наращивания по сравнению с хлоридным методом и отсутствие галогенидов, способных травить подложку, позволяют получать более резкий профиль распределения примесей в слое на границе с подложкой.

Работа с моносиланом кремния требует особых мер безопасности, т. к. он самовоспламеняется при соприкосновении с воздухом. Обычно моносилан сильно разбавляют водородом: если его объемная концентрация в водороде не превышает 4 %, то он утрачивает способность самовоспламеняться. Реакция пиролитического разложения SiH_4 используется и для *гетероэпитаксии кремния на сапфире* (КНС) [2]. Эпитаксиальные слои с совершенной

структурой образуются при температуре 1050 - 1100 °С, скорости газового потока 12 - 15 см³ /с и концентрации SiH₄ 0,08 - 0,15 %. Скорость роста при этом составляет 0,25 - 0,4 мкм/мин.

Необходимо, чтобы плотность упаковки атомов на поверхности сапфировой подложки совпадала с плотностью упаковки атомов кремния в плоскости заданной ориентации, а расположения атомов, в этих плоскостях были по возможности близки.

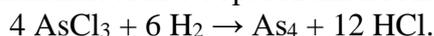
Для удаления нарушенного приповерхностного слоя подложки проводится термический отжиг в вакууме при 1600 °С с последующей обработкой в среде водорода при 400 °С (непосредственно перед гетероэпитаксией). При этом происходит реакция



Указанная реакция происходит и в процессе наращивания слоя кремния, что вызывает его автолегирование алюминием. Автолегирование и диффузия алюминия из сапфировой подложки приводят к высокой концентрации алюминия в гетероэпитаксиальном слое ($10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для различных температур наращивания).

Эпитаксиальное наращивание арсенида галлия хлоридным методом наиболее часто осуществляется в двух модификациях [10, 3]: с использованием жидкого и твердого источников. В первом случае источником мышьяка является AsCl₃, а галлия - жидкий галлий; во втором случае в качестве источника Ga используется GaAs, а мышьяк получается как из GaAs, так и из AsCl₃.

Источник Ga или GaAs нагревают примерно до 850 °С. Температура подложки составляет не более 750°С. При нагревании в присутствии газаносителя (водорода) AsCl₃ восстанавливается с образованием As₄ и HCl:



В случае жидкого источника мышьяк растворяется в галлии до насыщения с образованием на поверхности расплава тонкой пленки арсенида галлия. Этот процесс называется насыщением источника. В результате взаимодействия HCl с Ga (или GaAs) образуется GaCl:



Образовавшиеся GaCl и As₄ обтекают подложку, на которой идет процесс осаждения:



Чистота выращиваемых слоев сильно зависит от концентрации AsCl₃ в реакторе. При низкой концентрации (~0.001 мольной доли) уровень остаточных примесей может достигать 10¹⁶ см⁻³. При высокой концентрации (до 0.01 мольной доли) уровень примесей падает до 10¹³ см⁻³, а в наиболее совершенных системах даже ниже. Это происходит из-за уменьшения взаимодействия HCl со стенками кварцевого реактора [10].

За счет повышения температуры можно обеспечить травление поверхности подложки перед осаждением пленки. Скорость травления при $T = 900 \text{ °С}$ составляет 1 мкм/мин. При $T = 750 \text{ °С}$ наблюдается рост пленки со скоростью 0,5 мкм/мин. Переход от режима травления к эпитаксиальному наращиванию, обеспечивает рост слоев на чистой протравленной поверхности.

Выращиваемые слои могут быть легированы с помощью газов, содержащих такие легирующие добавки, как H₂S, H₂Se, Zn + H₂ и др. Легирующие добавки могут быть введены также в галлиевый источник. Скорость роста может достигать десятков микрометров в час.

Другая модификация ГФЭ – хлоридно-гидридная. В этом методе в качестве источника мышьяка используется не AsCl₃, а AsH₃. Для переноса Ga к подложке к H₂ добавляется газообразный HCl. Этот метод является более гибким, но требует применения очень чистого HCl.

Аналогичным путем можно выращивать и другие соединения типа A₃B₅. Например, фосфид индия получается при замене AsCl₃ на PCl₃ и галлиевого источника на индиевый. Однако с помощью хлоридного и хлоридно-гидридного методов нельзя выращивать соединения, содержащие Al, поскольку AlCl₃ реагирует со стенками кварцевого реактора. Эти соединения выращивают с помощью так называемого алкильного метода, являющегося

одной из разновидностей газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений¹⁴ (МО ГФЭ).

В стандартном процессе МО ГФЭ в качестве источника Ga используются металлоорганические соединения триметилгаллий (TMGa) или триэтилгаллий (ТЭGa), а источником As служит AsH₃.

Если при обычной ГФЭ выращивание проводится в горячем реакторе, то в случае МО ГФЭ достаточно нагревать только подложку. Обычно это делают с помощью либо индукционного нагрева, либо нагрева световым потоком. Степень пересыщения газовой фазы очень велика. МО ГФЭ идеально подходит для гетероэпитаксии, т. к. в ходе этого процесса достигается высокая скорость образования зародышевых центров, а стенки реактора остаются холодными.

На изолирующих подложках из металлоорганических соединений и гидридов выращивают GaAs и др. бинарные соединения A₃B₅, A₂B₆, A₄B₆, а также тройные соединения. Процедура выращивания включает приготовление подложки (очистка и травление), продувку системы водородом, разогрев подложки с помощью СВЧ-индуктора, непосредственно процесс осаждения и последующий отжиг. Обычно скорость роста составляет около 0,1 мкм/мин.

Одной из трудностей МО ГФЭ является загрязнение растущей пленки углеродом из металлоорганических соединений. Тем не менее, качество получаемых пленок сравнимо с качеством, достигаемым при использовании др. видов эпитаксиальной технологии. Основным преимуществом МО ГФЭ является относительная простота и возможность выращивания твердых растворов Al_xGa_{1-x}As [10, 15].

5.3.2 Жидкофазная эпитаксия

При жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) исходные вещества (твердые растворы или соединения) растворяют в специально подобранном легкоплавком и химически инертном к исходным веществам расплаве (галлии, индии и т. п.). Такой расплав приводят в контакт с подложкой. После установления теплового равновесия между компонентами системы начинают охлаждение расплава по определенному закону, обеспечивающему кристаллизацию эпитаксиального слоя на подложке. Легирующие примеси вводят при составлении исходного расплава или из газовой фазы. По окончании осаждения эпитаксиального слоя избыточный расплав механически удаляют с подложки, после чего подложку выводят из реактора и охлаждают до комнатной температуры. Подробнее процесс ЖФЭ рассмотрим на примере арсенида галлия [10]. На рис. 5.7 показана фазовая диаграмма системы Ga – As. Начало охлаждения соответствует точке a на рис. 5.7. Охлаждение идет до точки b, при этом в растворе - расплаве сосуществуют две фазы и происходит осаждение GaAs вплоть до точки c фазовой диаграммы, где оно прекращается.

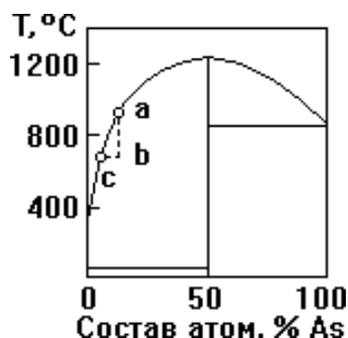


Рисунок 5.7 – Фазовая диаграмма системы Ga – As

¹⁴ Термин «металлоорганика» обозначает широкий класс веществ, содержащих металл-углеродные (органометаллические соединения) или металл-кислород-углеродные (алкоксиды) связи и координационные соединения металлов с органическими молекулами [18].

Для реализации метода ЖФЭ широко используют кассеты слайдерного (сдвигового) типа (см. рис. 5.8). В начале процесса галлий помещают в слайдерную кассету. Затем, чтобы удалить примеси, его отжигают при температуре 1000 °С в течение 4 - 10 ч. Для насыщения галлия мышьяком к его раствору добавляют поликристаллический GaAs. С помощью последующего отжига при температуре около 800 °С в течение 40 ч удаляют летучие примеси, такие, как кислород и сера. После обезгаживания загружается подложка и вводятся необходимые примеси. Следующий этап состоит в нагревании системы в течение 2 - 3 ч до температуры, примерно на 15°С превышающей температуру роста, с последующим охлаждением до температуры роста (700 - 800 °С). Подложка располагается в графитовом держателе и может скользить под расплавом. Это позволяет получать более однородные пленки и наилучшим образом удалять остатки расплава.

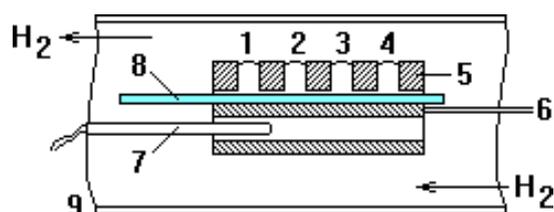


Рисунок 5.8 – ЖФЭ с использованием слайдерной кассеты: 1-4 – растворы-расплавы; 5 – подвижный графитовый держатель растворов-расплавов; 6 – выдвинутой стержень; 7 – термопара; 8 – графитовый держатель подложек; 9 – кварцевая труба

Рассмотренный метод ЖФЭ может быть усовершенствован за счет ограничения объема расплава. Для этого на расплав сверху помещают пластину из GaAs. Эта пластина располагается параллельно подложке и отделяется от нее слоем расплава толщиной несколько миллиметров. В такой ситуации, когда тонкий слой расплава находится между пластинами GaAs, улучшается однородность насыщения, температурная однородность расплава и подавляется конвекция, что приводит к улучшению однородности растущей пленки по составу и толщине. Скорость роста ограничивается диффузией мышьяка сквозь жидкую фазу; коэффициент диффузии равен $D \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. Толщина расплава, которая может находиться в равновесии с подложкой, составляет приблизительно:

$$d_m = \frac{3}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt},$$

где t – время.

Скорость роста W может быть найдена из термодинамических соображений:

$$W = \frac{Rd_m}{MC_S},$$

где R – скорость охлаждения, °С/с;

C_S - количество атомов As в единице объема твердого вещества;

$M = dT/dC_V$ - наклон линии ликвидуса, выраженный в градусах Цельсия, отнесенных к количеству атомов As в единице объема.

Таким образом, толщина слоя пропорциональна $t^{3/2}$, что соответствует экспериментальным данным.

В системах ЖФЭ, в которых конвекция доминирует над массопереносом, могут быть получены более высокие скорости роста. Однако в таких системах однородность пленки по составу и толщине обычно хуже.

Большим преимуществом метода ЖФЭ является то, что выращенный слой содержит меньше примесей, чем исходные компоненты, т. к. большая часть примесей остается в процессе кристаллизации в жидкой фазе. Из-за температурной зависимости коэффициента распределения в принципе может возникнуть неравномерное распределение примесей по толщине растущего слоя. Однако в процессе роста концентрация примесей в жидкой фазе увеличивается. При оптимально выбранном режиме роста эти два эффекта почти

компенсируют друг друга, в результате чего образуются практически однородные слои. Предпочтительнее использовать легирующие добавки с низким коэффициентом распределения и низким давлением паров, т. к. при этом уменьшается нежелательное взаимное влияние различных расплавов. Элементы II и VI групп не используют, поскольку у них давление паров и коэффициенты распределения слишком высоки.

Методом ЖФЭ можно выращивать слои от 0,1 мкм до нескольких сотен микрометров толщиной. Трудность выращивания очень толстых слоев обусловлена необходимостью поддержания постоянства параметров системы в течение длительного времени. Качество слоев сильно зависит от качества подложек. Подложки должны быть чистыми, без окисла, с низкой плотностью дислокации, т. к. дефекты структуры подложки обычно переходят и в выращиваемые эпитаксиальные слои. Одним из способов повышения качества является выращивание специально нелегированных буферных слоев между подложкой и основным эпитаксиальным слоем.

5.3.3 Молекулярно-лучевая эпитаксия

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) основана на конденсации молекулярных пучков в вакууме. По сравнению с методами, рассмотренными ранее, наращивание эпитаксиальных слоев происходит при относительно низких температурах подложки (400 – 800 °С), вследствие чего уменьшается влияние процессов диффузии на распределение примесей в эпитаксиальном слое. Другой характерной особенностью метода МЛЭ является возможность контроля параметров слоев непосредственно в процессе роста.

Типичная установка МЛЭ показана на рис. 5.9 [10]. Рабочий вакуум в ростовой камере близок к 10^{-8} Па. Подложки помещают в камеру через вакуумный шлюз. Испарительные ячейки представляют собой небольшие нагреваемые камеры («стаканы»), открытые в сторону подложки. С целью уменьшения теплового взаимодействия и предотвращения взаимозагрязнения источников испарительные ячейки разделяют экранами, охлаждаемыми жидким азотом. Такой же экран помещают позади держателя образца для уменьшения загрязнения остаточной (фоновой) атмосферы в камере. С этой же целью держатели источника и подложки изготавливают из материалов с низким давлением паров, таких, как алунд, тантал, графит.

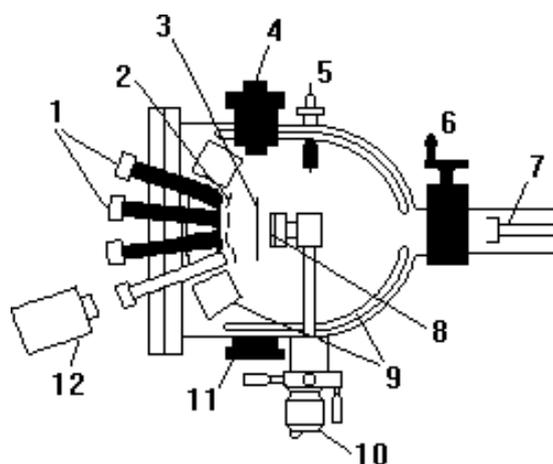


Рисунок 5.9 – Установка для выращивания слоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии: 1 – испарительные ячейки; 2 – заслонки; 3 – основная заслонка; 4 – электронная пушка дифрактометра; 5 – ионный вакуумметр; 6 – вакуумный затвор; 7 – шлюзовая камера для смены образцов; 8 – подложка; 9 – экраны, охлаждаемые жидким азотом; 10 – манипулятор держателя подложки; 11 – флюоресцентный экран; 12 – инфракрасный пирометр

Скоростью наращивания и уровнем легирования растущего слоя можно управлять, изменяя параметры источников, в частности их температуру, а следовательно, и плотности

потоков. Основная заслонка и заслонки испарительных ячеек позволяют очень быстро перекрывать пучки. Это дает возможность изменять состав или уровень легирования выращиваемых структур буквально на межатомном расстоянии.

Для контроля молекулярных или атомных пучков и выращиваемых слоев непосредственно в процессе выращивания используются дифрактометр электронов высоких энергий «на отражение», масс-спектрометр, оже-спектрометр и ионный вакуумметр, контролирующий нейтральные атомные пучки. Масс-спектрометр используют для анализа как атомных, так и молекулярных пучков и фоновой атмосферы. Дифрактометр электронов высоких и средних энергий «на отражение» дает информацию о поверхности пленки в процессе выращивания и после него. Дифрактометр состоит из электронной пушки, испускающей электронный пучок под углом скольжения 2° , и флюоресцентного экрана, на котором наблюдается картина дифракции. Электронная оже-спектроскопия дает полуколичественную информацию о составе сплава, резкости границ и взаимной диффузии. Чувствительным, но разрушающим методом анализа состава слоев и распределения примеси в них является вторичная ионная масс-спектроскопия.

При МЛЭ кремния легировать растущий слой можно тремя способами: испарением легирующего материала из дополнительного источника, переносом примеси из легированного кремниевого источника, одновременной имплантацией медленных ионов (400 – 800 эВ) в процессе роста.

Наращивание слоев GaAs методом МЛЭ осуществляется, как правило, из элементарных веществ (Ga и As). Испарение галлия и мышьяка ведется из самостоятельных источников. Доминирующими технологическими факторами являются чистота и температура подложки, плотность потока атомов Ga и молекул мышьяка (As_2 и As_4), давление остаточных газов.

Температура подложки определяет процессы адсорбции и десорбции атомов Ga и As и их поверхностной диффузии. При $T > 300$ °C атомы As легко десорбируются и скорость десорбции увеличивается с ростом температуры. Поскольку атомы Ga при таких температурах практически не испаряются с подложек, то нарушается стехиометрия соединения. Обеспечить стехиометрию слоя GaAs можно за счет увеличения потока As к подложке. Обычно плотность потока галлия составляет около 10^{15} атом/ (см²·с), а для мышьяка она в 5-10 раз выше.

МЛЭ считается лучшим методом получения многослойных эпитаксиальных структур с атомной гладкостью границ, прецизионно заданными толщинами слоев, их составом и профилем легирования. Применение высокочувствительных средств контроля параметров получаемых структур и управления процессом их синтеза обеспечивает высокую воспроизводимость этих параметров. Основными факторами, ограничивающими качество структур, являются глубина и чистота вакуума, производительность откачной системы установки, а также наличие стенок вакуумной камеры, накапливающих и отдающих компоненты молекулярных пучков и атмосферы остаточных газов, загрязняющих подложку и пленку.

Значительный интерес представляют исследования синтеза полупроводниковых многослойных эпитаксиальных структур в космическом вакууме за так называемым молекулярным экраном - полированным диском из нержавеющей стали, движущимся с первой космической скоростью на высоте $200 \div 400$ км. В кильватерной области молекулярного экрана можно получить такое разрежение, что появление одного атома кислорода¹⁵ на площадке в один квадратный дециметр придется ожидать миллион лет. Все давление за экраном будет определяться атомами гелия и водорода, источником которых является Солнце, а также веществом, испаряющимся с поверхности самого экрана. Отметим, что в наземных сверхвысоковакуумных технологических установках с криогенными насосами достигается

¹⁵ Кислород - основной компонент газовой среды на высоте орбитального полета космических станций.

предельное разрежение в сотни и тысячи раз хуже, чем было практически получено в первых космических экспериментах с молекулярным экраном.

Несомненные преимущества открытого космоса - глубокий вакуум и почти неограниченная скорость откачки компонент рабочего молекулярного пучка - создают уникальную возможность для сверхбыстрой смены химического состава газовой фазы в зоне роста на поверхности подложки. Большое значение имеет полное отсутствие стенок рабочей камеры и возможность существенного пространственного удаления элементов технологической оснастки от зоны эпитаксиального роста. Становится возможным значительное увеличение расстояния от подложки до источника молекулярного пучка. Кроме того, могут использоваться токсичные летучие жидкости и газы (гидриды, металлоорганические соединения) в качестве исходных материалов для синтеза пленок без загрязнения окружающей среды. Эти соединения быстро рассеиваются до безопасных концентраций и легко разлагаются на безопасные компоненты под действием солнечного ионизирующего излучения. В перспективе возможно создание в открытом околоземном космическом пространстве полностью интегрированных вакуумных производств.

6 ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ И КВАНТОВЫЕ РАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ

6.1 Полупроводниковые гетеропереходы

6.1.1 Общие сведения

Развитие методов молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений привело к созданию полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур с атомной гладкостью границ, прецизионно заданными толщинами слоев, их составом и профилем легирования. Такие структуры могут служить основой для изготовления многих перспективных полупроводниковых приборов и интегральных устройств¹⁶ [5-7, 16].

Обычные гомопереходы образуются в полупроводнике за счет изменения концентрации и типа носителей заряда [17]. В гетеропереходах - в области контакта двух различных по химическому составу материалов - происходит, сверх этого, изменение ширины запрещенной зоны, показателя преломления и др. электрофизических характеристик, таких как диэлектрическая проницаемость, электронное сродство, геометрические параметры решетки, эффективная масса носителей заряда, их подвижность. В резком гетеропереходе это изменение происходит на уровне одного или двухтрех молекулярных слоев, в плавном контактная область простирается на десятки, а иногда и сотни периодов кристаллической решетки¹⁷.

В обозначении гетероперехода принято указывать тип проводимости полупроводника с узкой запрещенной зоной строчными буквами (n или p), а с широкой запрещенной зоной - прописными (N или P) [16]. На первом месте обычно указывают тип проводимости более узкозонного материала. Так, изотипные гетеропереходы обозначают как n-N или p-P, а анизотипные как n-P или p-N.

В реальном гетеропереходе на межфазной границе возможно появление различных дефектов и, как следствие, поверхностных состояний. Важно, чтобы их влияние на свойства перехода было мало. Наиболее сильное влияние на отклонение свойств гетероперехода от идеального оказывает различие в параметрах решеток и в температурных коэффициентах линейного расширения контактирующих материалов. Обычно различие параметров решеток не должно превышать 0,1 %. Дополнительным требованием является совпадение кристаллохимической природы материалов гетероперехода.

¹⁶ За эти работы академику Ж.И. Алферову была присуждена Нобелевская премия по физике 2000 г.

¹⁷ Если свойства материала плавно изменяются в макроскопическом масштабе, то такой полупроводник называется варизонным.

Наиболее полно указанным требованиям удовлетворяют трех- или четырехкомпонентные твердые растворы в группе полупроводниковых соединений A_3B_5 : $Al_xGa_{1-x}As$, $Al_xGa_{1-x}Sb$, $Al_xGa_{1-x}P$, $Ga_xIn_{1-x}PyAs_{1-y}$. При изменении состава в трехкомпонентных твердых растворах изменяются одновременно и период идентичности решетки, и ширина запрещенной зоны. В четырехкомпонентных твердых растворах типа $Ga_xIn_{1-x}PyAs_{1-y}$ при определенных соотношениях между x и y возможны изменения ширины запрещенной зоны при неизменном периоде идентичности решетки. Такой ряд твердых растворов называют изопериодным. Гетеропереходы, изготовленные на основе изопериодных твердых растворов, по своим характеристикам наиболее близки к идеальным.

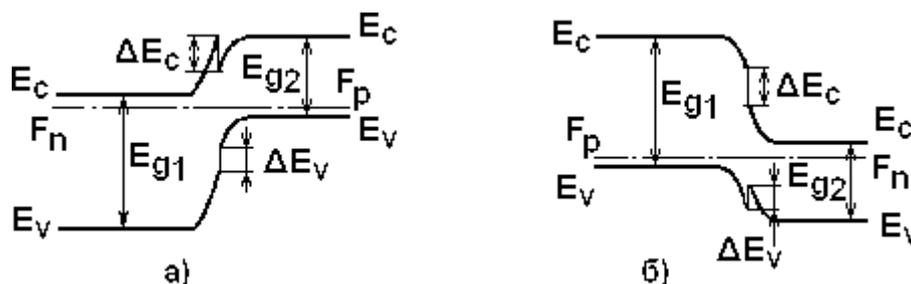


Рисунок 6.1 - Энергетические диаграммы p-N- (а) и n-P - гетеропереходов (б) в условиях теплового равновесия. ΔE_v и ΔE_c - разрывы в валентной зоне и зоне проводимости

В резких гетеропереходах (см. рис. 6.1) вследствие скачка диэлектрической проницаемости и электронного сродства контактирующих материалов появляются разрывы в валентной зоне (ΔE_v) и в зоне проводимости (ΔE_c), причем

$$\Delta E_v + \Delta E_c = E_{g1} - E_{g2}.$$

Соотношение между ΔE_v и ΔE_c различно для разных материалов. Для гетеропереходов $GaAs - Al_xGa_{1-x}As$ при $x < 0,4$ на долю ΔE_v приходится около 40 %, а на долю ΔE_c - около 60 % от разности ($E_{g1} - E_{g2}$) [16].

6.1.2 Эффекты односторонней инжекции и сверинжекции

Для гетеропереходов характерна преимущественная инжекция носителей заряда из широкозонной части в узкозонную (см. рис. 6.2), т. к. инжекции из узкозонной в широкозонную область препятствует дополнительный энергетический барьер.

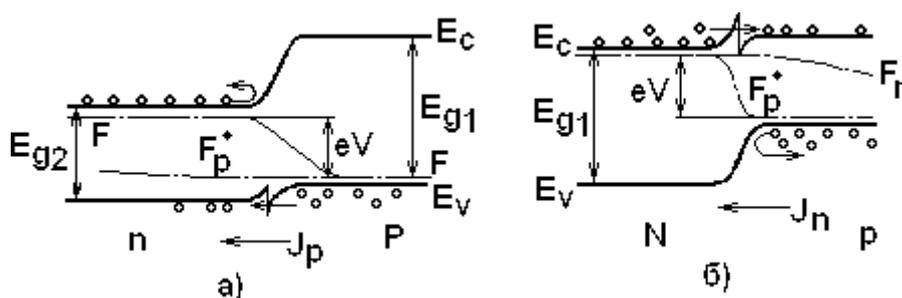


Рисунок 6.2 – Эффект односторонней инжекции в n-P- (а) и p-N - гетеропереходах (б)

Токи инжектированных через гетеропереход электронов и дырок в первом приближении отличаются на фактор

$$\exp\left(\frac{\Delta E_c + \Delta E_v}{kT}\right) \approx \exp\left(\frac{E_{g1} - E_{g2}}{kT}\right).$$

При комнатной температуре $kT = 0,025$ эВ, $\Delta E_v + \Delta E_c$ обычно составляет несколько десятых электронвольта, так что отношение электронного и дырочного токов достигает нескольких тысяч [16].

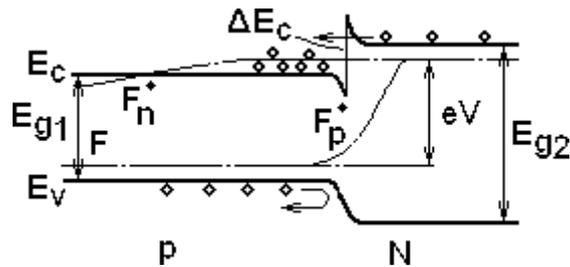


Рисунок 6.3 – Эффект сверхинжекции в p-N – гетеропереходе

В обычном гомопереходе концентрация неосновных носителей заряда, инжектированных из эмиттера, не может превышать их концентрации в самом эмиттере. В p-N – гетеропереходе (см. рис. 6.3) за счет разрывов в зоне проводимости ΔE_c (или в n-P – гетеропереходе за счет разрывов в валентной зоне ΔE_v) при достаточно большом напряжении смещения возможно образование как бы «отрицательного» барьера для электронов (или дырок).

Узкий положительный потенциальный барьер на гетерогранице электроны свободно проходят за счет туннельного эффекта, попадая затем в потенциальную яму. Благодаря этому концентрация инжектированных носителей заряда может превышать их концентрацию в эмиттере (на рис. 6.3 уровень Ферми в n-области расположен ниже дна зоны проводимости, а квазиуровень Ферми F_n^* для электронов в p-области - внутри зоны проводимости). Предельно достижимое отношение концентрации инжектированных электронов n_p в p-N – гетеропереходе к их равновесной концентрации в эмиттере n_N (в N-области) [16]

$$\frac{n_p}{n_N} \rightarrow \exp\left(\frac{\Delta E_c}{kT}\right).$$

Аналогично в n-P – гетеропереходе

$$\frac{p_n}{p_P} \rightarrow \exp\left(\frac{\Delta E_v}{kT}\right).$$

Эта особенность инжекции в гетеропереходе делает его уникальным по эффективности инжектором, что очень важно для многих полупроводниковых приборов, в частности, для биполярных транзисторов и полупроводниковых лазеров [16, 17].

6.2 Квантовые ямы, нити и точки

6.2.1 Размерные эффекты

Под размерными эффектами понимают зависимость фундаментальных свойств объектов (материалов) от их геометрических размеров. Проявляются размерные эффекты в объектах, характерный размер которых не превышает некоторого критического значения. Для электронов в твердом теле в роли такого критического значения, с которым сравниваются размеры образца, обычно выступает электронная длина волны де Бройля

$$\lambda_e = h/p_e,$$

где $p_e = \hbar k$ - квазиимпульс электрона, $k = 2\pi/\lambda_e$ - его волновой импульс.

Если характерный геометрический размер образца не превышает λ_e , то электронные спектры квантуются и положения каждого из уровней зависят уже не только от природы материала, но и от геометрических размеров образца. Иными словами, эффекты размерного квантования позволяют управлять положением уровней энергии и волновыми функциями электрона путем изменения геометрических размеров объекта, в котором движется этот электрон [5, 16].

Достаточно крупные объекты, свойства которых не зависят от их размеров в трех измерениях, называются трехмерными или 3D.¹⁸ Структуры, в которых движение электрона ограничено по одной, двум, трем координатам, имеют размерности 2, 1, 0 (2D, 1D, 0D) и

¹⁸ От английского Dimension - измерение, размерность.

называются, соответственно, квантовыми ямами (квантовыми колодцами), квантовыми нитями (квантовыми проволоками), квантовыми точками.

Впервые квантовые размерные эффекты наблюдались на тонких пленках полуметалла висмута и полупроводника антимонида индия - InSb. В настоящее время квантоворазмерные структуры изготавливаются преимущественно на основе полупроводниковых гетеропереходов.¹⁹ Наилучшие результаты достигнуты с помощью методов молекулярно-лучевой эпитаксии, газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и их комбинаций, позволяющих выращивать совершенные монокристаллические слои толщиной всего несколько периодов решетки.

6.2.2 Квантование энергии

Квантование энергии в потенциальных ямах определяется процессами интерференции и образованием устойчивых состояний - стоячих электронных волн [5, 16]. В случае прямоугольной потенциальной ямы со стенками бесконечной высоты энергетический спектр электрона и одноэлектронные волновые функции имеют вид

$$E_n = \frac{(\pi \eta n)^2}{2md^2},$$

$$\Psi_n = \sqrt{2/d} \sin(\pi n z).$$

где m – масса электрона;

d – ширина ямы;

z – текущая координата;

$n = 1, 2, 3...$ - квантовое число, определяющее собственные значения $E_1, E_2, E_3...$ (уровни размерного квантования).

Для ямы с конечной высотой барьера V_0 собственные значения находятся из решения трансцендентного уравнения

$$E_n = \frac{(\pi \eta n)^2}{2md^2} (n - \text{arctg} \sqrt{\frac{V_0}{E_n} - 1})^2.$$

При этом амплитуды собственных волновых функций на границах ямы отличны от нуля и экспоненциально затухают по мере удаления от барьера; амплитуда на границе и постоянная затухания зависят от параметров ямы и от номера уровня, определяя вероятность туннелирования через барьер.

Квантовая яма может представлять собой тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной, расположенный между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной (см. рис. 6.5, а); в такой двойной гетероструктуре (ДГС)²⁰ при атомарно-гладких межфазных границах форма ямы близка к прямоугольной. Квантовая яма почти треугольной формы может быть получена вблизи границы изотипного N-p - гетероперехода (рис. 6.5, б) или в инверсионном слое МДП - структуры [5, 16]. Пологий барьер треугольной потенциальной ямы образован электростатическим потенциалом, и его крутизна зависит от концентрации носителей заряда.

Полная энергия электрона в 2D – структуре представляет собой сумму дискретных энергий, связанных с движением в направлении квантования, и непрерывной компоненты, описывающей движение в плоскости слоя - как свободного носителя заряда с эффективной массой m^* :

$$E = E_n + \frac{p_x^2}{2m^*} + \frac{p_y^2}{2m^*} = E_n + \frac{\eta^2(k_x^2 + k_y^2)}{2m^*},$$

где p_x, p_y и k_x, k_y - соответствующие компоненты квазиимпульса и волнового вектора электрона. За счет непрерывной компоненты электроны, принадлежащие одному и тому же

¹⁹ В металлах длина волны свободных электронов мала (порядка межатомных расстояний), энергетические уровни размыты и эффекты размерного квантования не проявляются [16].

²⁰ Например, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - GaAs - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ или InP - $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ - InP.

уровню E_n , могут иметь любую энергию от E_n до бесконечности. Такую совокупность состояний для данного квантового числа n называют подзоной размерного квантования.

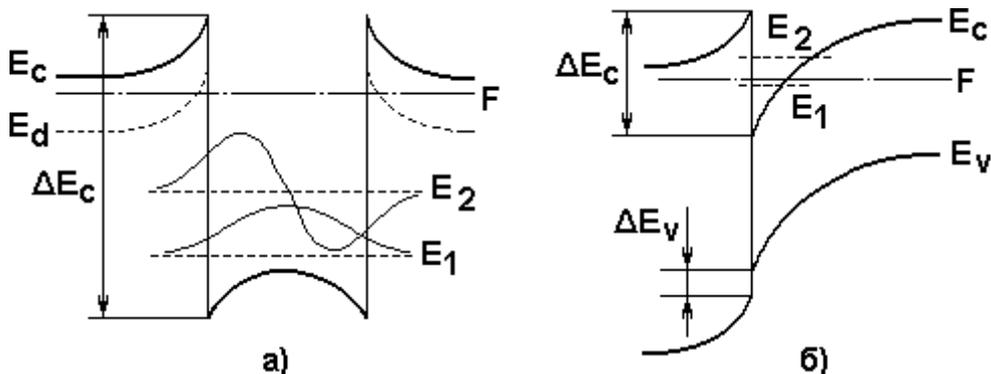


Рисунок 6.5 – Квантовая яма в двойной гетероструктуре (а) и N-p – гетеропереходе (б)

Ограничив движение электронов 2D - структуры еще в одном или двух направлениях дополнительными барьерами, можно получить квантовые нити (1D) или квантовые точки (0D). Собственные значения энергии в квантовой нити характеризуются двумя, а в квантовой точке – тремя квантовыми числами. Полная энергия электрона в квантовые нити

$$E = E_{n_1 n_2} + \frac{\eta^2 k_x^2}{2m^*},$$

а в квантовой точке

$$E = E_{n_1 n_2 n_3}.$$

Квантовые нити можно просто «вырезать» из 2D - структуры средствами микролитографии. Поверхностные состояния обычно индуцируют обеднение боковых граней носителями заряда, что приводит к дополнительному уменьшению реальной ширины квантовой нити, в результате квантовые эффекты могут проявляться при ширине полосок порядка десятых долей микрометра. Можно также ограничить двумерный электронный слой электростатическим потенциалом двух барьеров Шоттки, разделенных узким зазором. В этом случае эффективной шириной нити можно управлять, изменяя потенциалы металлических электродов.

Квантовые точки формируются, как правило, за счет эффектов самоорганизации при гетероэпитаксии материалов с др. чем у подложки параметрами решетки. Например, при эпитаксиальном наращивании InAs (или твердого раствора $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$) на подложке GaAs при определенных технологических условиях возможно образование как отдельных нанокристаллов, разбросанных по поверхности подложки, так и их определенное упорядочивание, наслаивание друг на друга (так называемое «складирование» квантовых точек). Такие нанокристаллы с поперечными размерами порядка единиц или десятков нанометров оказываются внедренными в полупроводниковый материал др. состава, как правило, с большей шириной запрещенной зоны [5, 16].

Квантовые точки как нульмерные системы по существу представляют собой как бы искусственные атомы. Но если в атоме собственный энергетический спектр в конечном итоге задается Природой, то в квантовой точке мы можем в определенной степени по своему усмотрению формировать ее энергетический спектр, изменяя параметры трехмерной потенциальной ямы [16].

6.2.3 Плотность состояний

Важной характеристикой любой электронной системы, наряду с ее энергетическим спектром, является плотность состояний $\rho(E)$ [16]. Для простейшего параболического закона дисперсии в изотропном 3D - кристалле (см. рис. 6.7, а)

$$\rho^{3D} = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*)^{3/2} E^{1/2},$$

где m^* – эффективная масса электрона.

Плотность состояний двумерной электронной системы – число состояний в единичном интервале энергий, приходящихся на единицу площади, – претерпевает скачки, равные $m^*/(\pi\hbar^2)$, при энергиях E , соответствующих уровням размерного квантования E_m (рис. 6.7, б). При этом в идеальных двумерных структурах

$$\rho^{2D}(E_m) = d\rho^{3D}(E_m),$$

где d – толщина слоя, т. е. ширина квантовой ямы. В реальных структурах каждая ступенька плотности состояний сглаживается (появляются «хвосты плотности состояний») за счет различных механизмов уширения (высокий уровень легирования, микроскопические флуктуации состава и др.) [16].

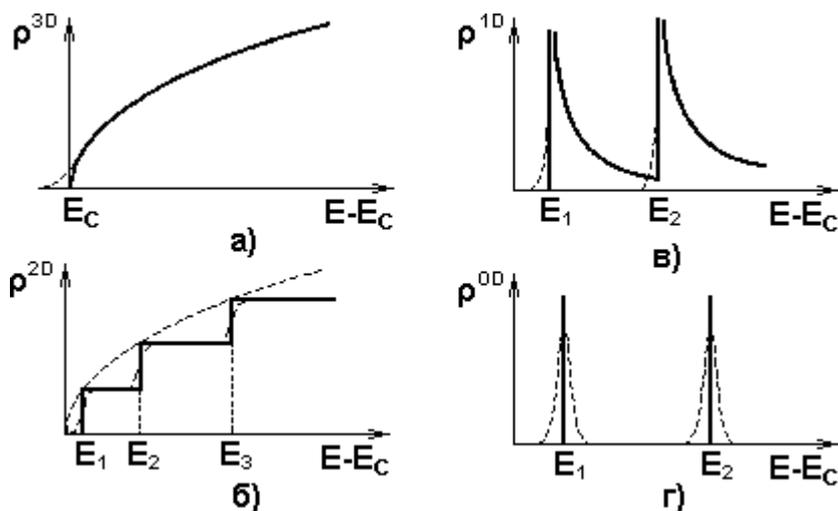


Рисунок 6.7 – Плотность состояний в объемном 3D (а), двумерном 2D (б), одномерном 1D (в) и нульмерном 0D (г) электронном газе. Пунктиром показано влияние эффектов уширения на функции плотности состояний

В квантовой нити плотность электронных состояний определяется как число разрешенных состояний, приходящихся на единичный интервал энергий и на единицу длины. В пределах каждой подзоны с фиксированной энергией размерного квантования $E_{n_1n_2}$ плотность состояний уменьшается с ростом энергии пропорционально $1/\sqrt{E_{n_1n_2}}$ (рис. 6.7, в). При $E_{n_1n_2}$ плотность состояний в идеальной квантовой нити расходится, но в реальных ситуациях благодаря эффектам уширения это значение оказывается конечным.

Плотность состояний нульмерной системы 0D, т. е. квантовой точки, состоит из набора δ -функций, положение которых совпадает с энергией уровней размерного квантования (рис. 6.7, г). Это дискретный спектр разрешенных значений энергий, подобный спектру атомов и молекул. Даже в идеальной ситуации, когда имеется набор квантовых точек с абсолютно одинаковыми параметрами, их уровни будут иметь конечную ширину, определяемому конечностью времени жизни в возбужденном состоянии [16].

6.3 Сверхрешетки

Сверхрешетками (СР) называют структуры с периодическим изменением уровня легирования полупроводника, образующего последовательность гомопереходов (легированные СР), а также многослойные структуры из гетеропереходов (композиционные СР) с типичной толщиной слоев 8–10 нм [17, 15, 5]. Потенциальный профиль легированных СР обусловлен электростатическим потенциалом ионизированных примесей, а композиционных – периодическим изменением ширины энергетической запрещенной зоны в направлении роста кристалла.

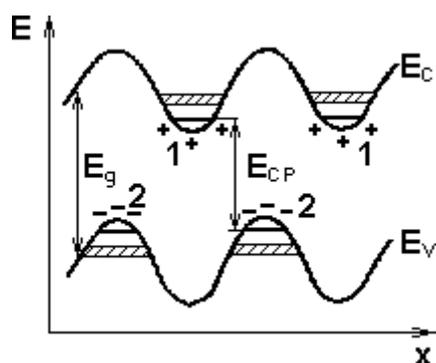


Рисунок 6.8 – Координатная зависимость зонной диаграммы легированной СР nipi-GaAs: 1 - ионизированные доноры; 2 - ионизированные акцепторы

В легированных СР результирующее распределение заряда ионизированных доноров и акцепторов создает совокупность параболических потенциальных ям (см. рис. 6.8). Пространственное разнесение минимума зоны проводимости и максимума валентной зоны кардинально сказывается на параметрах системы. Так, из-за малого перекрытия электронных и дырочных состояний времена электронно-дырочной рекомбинации могут на много порядков превосходить соответствующие значения в однородном полупроводнике. Путем подбора уровней легирования и толщин слоев эффективной ширине запрещенной зоны E_{CP} можно придавать практически любое значение от нуля до ширины запрещенной зоны исходного материала E_g [5].

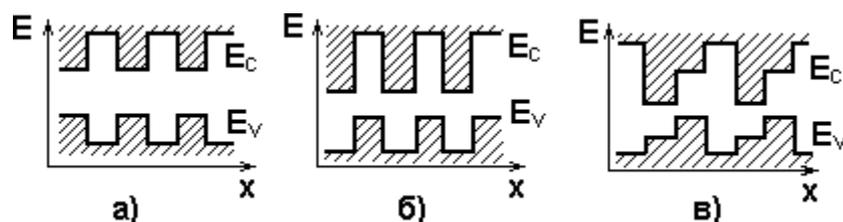


Рисунок 6.9 – Координатные зависимости зонной диаграммы для композиционной СР типа I (а), типа II (б) и политипной (в)

Композиционные СР бывают трех типов: контравариантные (тип I), ковариантные (тип II) и политипные. В контравариантных СР (см. рис. 6.9, а) разрывы зоны проводимости ΔE_C и валентной зоны ΔE_V имеют противоположные знаки, и запрещенные зоны E_{gi} слоев полностью перекрываются. В ковариантных СР ΔE_C и ΔE_V имеют одинаковые знаки, и, соответственно, E_{gi} перекрываются частично (рис. 6.9, б), либо не перекрываются вообще. В политипных СР (рис. 6.9, в) слои, образующие СР типа II, дополняются широкозонным материалом, создающим потенциальные барьеры как для электронов, так и для дырок (по типу I).

Композиционные контравариантные СР изготавливаются, например, на структурах GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$, ковариантные - на InAs - GaSb или $In_{1-x}Ga_xAs$ - $GaSb_{1-y}As_y$. Политипные СР конструируются из базовых многокомпонентных систем типа ВАС, АВСА, АСВСА и т. п., где А означает AlSb, В - GaSb, С - InAs.

Возможности легирования отдельных слоев используются и для изменения свойств композиционных СР. Донорной примесью обычно легируют слои с большей шириной запрещенной зоны. Если дно зоны проводимости узкозонного материала (дно квантовой ямы) окажется ниже по энергии, чем донорные уровни в барьерах, то электроны с этих уровней могут перейти в нелегированные слои, пространственно разделившись с породившими их ионизированными донорами, что приведет к увеличению подвижности электронов. Эффект будет более выражен при низких температурах, когда ослаблены процессы фононного рассеяния [5, 17].

Представляют интерес латеральные СР, чередование слоев в которых происходит не в направлении роста кристалла, а в направлении, параллельном поверхности подложки. Такие СР могут быть созданы путем вариации зарядового состояния изолирующего слоя у его контакта с поверхностью полупроводника.²¹

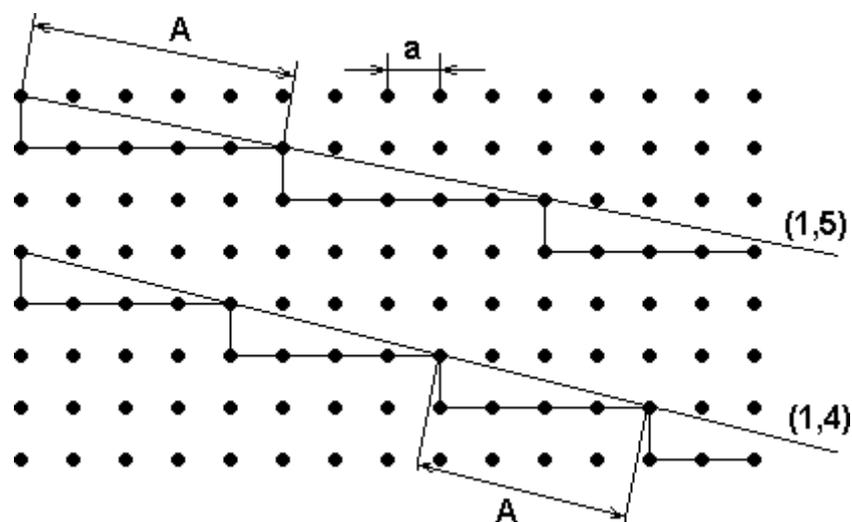


Рисунок 6.10 – Схема возникновения дополнительного периода трансляции A на поверхностях с высокими кристаллографическими индексами; темные кружки - атомы в квадратной решетке

Принципиально иной способ создания СР в двумерных системах основывается на ориентации плоскости квантовой ямы вдоль кристаллографических плоскостей с высокими индексами Миллера (ориентационные вицинальные СР).²² Возникающий при этом в плоскости квантовой ямы новый минимальный период трансляции $A \gg a$ (см. рис. 6.10) приводит к появлению в таких системах новых границ зон Бриллюэна и минищелей в энергетическом спектре носителей заряда [5].

7 ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ

7.1 Назначение и материалы

Диэлектрические слои (пленки) в полупроводниковых ИС применяют в качестве масок в процессах диффузии, фотолитографии, имплантации и др., для пассивации поверхности кристалла и защиты элементов ИС от внешних воздействий, электрической изоляции отдельных приборов и коммутационных (как правило, многослойных) проводников, в качестве подзатворного диэлектрика МДП - структур, для изготовления конденсаторов [2 - 4, 14].

В зависимости от функций, выполняемых диэлектрическими слоями, к ним предъявляются различные требования. Для пленок, применяемых в качестве масок, основными требованиями являются: селективность по отношению к тем или иным технологическим факторам (к растворам, облучению, газам, плазме и т. п.); отсутствие пор и трещин; равномерность толщины; однородность структуры и физико-химических свойств (как по площади, так по и глубине маски); хорошая адгезия к пластине. Уникальной

²¹ Гольдман Е.И., Ждан А.Г. Новый подход к созданию нанoeлектронных систем в размерно квантующем потенциальном рельефе встроенных зарядов в изолирующих слоях у поверхности полупроводника // Письма в ЖТФ. - 2000. - Т. 26, вып. 1. - С. 38 - 41.

²² Волков В.А., Петров В.А., Сандомирский В.Б. Поверхность с высокими кристаллографическими индексами - сверхрешетка для двумерных электронов // УФН. - 1980. - Т. 131, вып. 3. - С. 423 - 440.

маскирующей способностью обладают термически выращенные слои SiO₂ на кремнии; широко используются также пленки нитрида кремния Si₃N₄.

Важнейшими характеристиками диэлектрических пленок, применяемых в качестве изоляции, являются: удельное электрическое сопротивление ρ , электрическая прочность $E_{пр}$, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$, диэлектрическая проницаемость ϵ , равномерность и стабильность этих свойств. Наряду с SiO₂ в качестве изоляции используются Si₃N₄, оксид алюминия Al₂O₃, диоксид титана TiO₂, пятиокись тантала Ta₂O₅ и др.

Наиболее жесткие требования к диэлектрической пленке предъявляет технология МДП-ИС. Подзатворный диэлектрик должен обладать: особо высокой чистотой и совершенством (или равномерностью) структуры; полным отсутствием каких-либо пор, трещин, выколов и др. нарушений. Все это необходимо для удовлетворительной работы приборов данного типа. В качестве подзатворного диэлектрика МДП-ИС традиционно используются термически выращенные слои SiO₂. В последние годы находят применение материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью, в частности, диоксид циркония ZrO₂.

7.2 Методы получения

В технологии ИС применяют следующие методы получения диэлектрических слоев [2 - 4, 14]: термическое окисление кремния; осаждение из парогазовых смесей; вакуумное термическое испарение; ионно-плазменное распыление; анодирование в электролите или плазме газового разряда. Формирование диэлектрических слоев методами термического окисления и анодирования, в отличие от др. методов, происходит при непосредственном участии материала подложки. Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки, - в зависимости от материала слоя и его назначения.

7.2.1 Термическое окисление

Наиболее широко применяемый метод получения слоев SiO₂ на кремнии – окисление поверхности кремния при температурах 700 – 1250 °С в среде кислорода или паров воды.

Пленки SiO₂ толщиной 0,5 ÷ 1 нм образуются на кремнии уже при комнатной температуре как при хранении на воздухе, так и при обработке в различных растворителях, используемых для очистки или травления поверхности [2]. Для описания механизма роста тонких (до 15 нм) пленок SiO₂ на кремнии привлекают теорию Мотта – Кабреры. Согласно этой теории, при контакте кислорода с поверхностью кремния происходит адсорбция кислорода и образование монослоя SiO₂. Молекулы кислорода получают электроны и заряжаются отрицательно, а поверхностные атомы кремния теряют электроны и заряжаются положительно, в результате чего на поверхности возникает двойной электрический слой. Т. к. толщина двойного слоя весьма мала, в нем образуется сильное электрическое поле ($10^6 - 10^7$ В/см). Под действием этого поля отрицательные ионы кислорода проходят через слой SiO₂ и вступают в реакцию с кремнием. С увеличением толщины SiO₂ напряженность электрического поля понижается, что вызывает уменьшение скорости роста слоя. Если процесс происходит при достаточно высокой температуре, то существенное значение приобретает процесс диффузии ионов кислорода.

Таким образом, в начале процесса реакция окисления кремния происходит на его поверхности, а после образования тонкой пленки SiO₂ – на границе раздела Si - SiO₂, куда за счет диффузии доставляется окислитель. В последнем случае процесс термического окисления Si включает (см. рис. 7.1): 1) диффузию кислорода (или др. окислителя) из газового потока к поверхности пластины; 2) диффузию окислителя через уже выросший слой SiO₂; 3) химическую реакцию на границе раздела SiO₂ – Si. Самой медленной из указанных стадий является диффузия кислорода через слой диоксида, поэтому она и лимитирует скорость процесса в целом. Диффузионный поток окислителя, согласно уравнению Фика, описывается соотношением

$$j_2 = D(C_n - C_{гр})/X,$$

где D – коэффициент диффузии окислителя в слое SiO_2 ; C_n , $C_{\text{гр}}$ – концентрации кислорода на поверхности SiO_2 и на границе $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ соответственно; X – толщина слоя SiO_2 , т. е. глубина диффузии. Химическую реакцию на границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ можно охарактеризовать потоком

$$j_3 = KC_{\text{гр}},$$

где K – константа скорости реакции окисления кремния. Поскольку для стационарного процесса $j_2 = j_3 = j$, то

$$\frac{D(C_n - C_{\text{гр}})}{X} = KC_{\text{гр}},$$

отсюда

$$C_{\text{гр}} = \frac{C_n}{1 + \frac{KX}{D}}$$

Для потока окислителя, достигающего поверхности раздела между диоксидом и кремнием,

$$j = \frac{NdX}{dt} = KC_n / \left(1 + \frac{KX}{D}\right),$$

где N – число молекул окислителя в единице объема SiO_2 ; dX/dt – скорость роста диоксида.



Рисунок 7.1 – Окисления кремния из газовой фазы: 1,2 – диффузия окислителя к поверхности пластины и границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}$, соответственно; 3 – зона реакции окислителя с кремнием

Будем считать, что при $t = 0$ $X = X_1$. Величина X_1 представляет собой толщину SiO_2 на поверхности кремния перед началом процесса. Из последнего (дифференциального) уравнения можно получить следующее соотношение между временем окисления и толщиной выросшего SiO_2 :

$$X^2 + AX = B(t + \tau),$$

где $A = \frac{2D}{K}$; $B = \frac{2DC_n}{N}$; $\tau = (X_1^2 + AX_1)/B$. Решая уравнение, получаем

$$\frac{X}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t+\tau}{A^2/4B}} - 1.$$

Последнее соотношение имеет два предельных случая. Для малых времен, т. е. при $(t + \tau) \ll A^2 / (4B)$, закон окисления имеет линейный характер:

$$X = \frac{B(t + \tau)}{A},$$

где B/A – постоянная линейного закона окисления. Если время велико, т. е.

$$t + \tau \gg A^2/4B,$$

то окисление описывается параболическим законом:

$$X^2 = B(t + \tau),$$

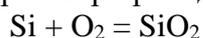
где B – постоянная параболического закона окисления. Если $t \gg \tau$, то

$$X^2 = Bt.$$

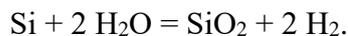
Численные значения констант B и B/A зависят от типа окислителя.

Обычно в качестве окислителя используют сухой кислород или смесь кислорода и паров воды (влажный кислород). Окисляемые пластины кремния помещаются в

горизонтальный реактор, в котором поддерживается высокая температура (1000 – 1250 °С). Через реактор проходит поток окислителя. При окислении происходят реакции:



или



Предельная концентрация в SiO_2 паров воды ($3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) много больше, чем предельная концентрация кислорода ($5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Соответственно, скорости роста пленок SiO_2 при термическом окислении кремния во влажном кислороде и в парах воды выше, чем в сухом кислороде. Однако, пленки SiO_2 , выращенные в парах воды и во влажном кислороде, обладают худшими электрическими и защитными свойствами, чем пленки, выращенные в сухом кислороде. В связи с этим в технологии ИС термический диоксид формируется в комбинированных режимах: после окисления во влажном кислороде проводится окисление в атмосфере сухого кислорода. При этом скорость роста и толщина слоя определяются первым этапом. Во время второго этапа удаляется вода из слоя SiO_2 , происходит дополнительный (незначительный) рост слоя диоксида, а главное, уплотняется выращенный на первом этапе слой, зарождаются пустоты и различные дефекты [2 - 4].

Увеличить скорость роста пленки SiO_2 можно за счет повышения давления водяных паров. Переход от атмосферного давления 10^5 Па к повышенному до $2 \cdot 10^6 \text{ Па}$ увеличивает параболическую константу роста примерно в 20 раз, что позволяет получать толстые слои SiO_2 за сравнительно короткие промежутки времени. Кроме того, при повышенном давлении можно выращивать слои SiO_2 при более низких температурах (начиная с 800 °C). Снижение температуры уменьшает боковую диффузию кислорода при локальном окислении кремния, что позволяет повышать плотность компоновки элементов ИС.

Наличие примесей в кремнии также влияет на скорость окисления. Так, p-кремний, сильно легированный бором, окисляется быстрее высокоомного (чистого) кремния как при высоких температурах, где справедлив параболический закон роста диоксида, так и при более низких температурах, где выполняется линейный закон. Причина в том, что при окислении бор стремится перейти из кремния в оксид и растущий слой SiO_2 обогащается бором. Коэффициент диффузии окислителя в таком слое оказывается больше, чем в слое, нелегированном бором.

Фосфор, которым может быть легирован кремний n-типа, не переходит в растущий слой SiO_2 в больших количествах. Поэтому диффузия окислителя в таком слое не отличается от диффузии в слое на чистом кремнии. Однако присутствие фосфора увеличивает скорость химической реакции на границе $\text{SiO}_2 - \text{Si}$. По этой причине кремний, сильно легированный фосфором, окисляется быстрее, чем чистый кремний, в условиях низких температур (ниже 1100 °C), при которых лимитирующей стадией является стадия химической реакции. Различия в скоростях окисления особенно резко проявляется при $700 - 800 \text{ °C}$. При температурах выше 1100 °C увеличение скорости роста SiO_2 на кремнии, легированном фосфором, практически незаметно.

На скорость термического окисления влияют не только примеси, содержащиеся в кремниевой подложке, но и примеси в растущем слое SiO_2 , в первую очередь примеси ионов гидроксила и натрия, увеличивающие скорость окисления. Ионы гидроксила образуются в результате многоступенчатой реакции кремния с парами воды. Источником ионов натрия является кварц, из которого изготавливается реакционная камера.

Присутствие в слое SiO_2 подвижного положительного заряда ионов натрия крайне нежелательно, особенно при использовании этого слоя в качестве подзатворного диэлектрика МОП – структур. Предварительная термообработка стенок реактора в тех же средах, что и процесс окисления, приводит к снижению подвижного заряда в окисле. Существенное уменьшение подвижного заряда происходит при окислении кремния в галогеносодержащих средах, например $\text{O}_2 - \text{HCl}$ (концентрация HCl до 10 %) и $\text{O}_2 - \text{Cl}_2$ (концентрация Cl_2 до 2,5 %), а также смеси кислорода и паров трихлорэтилена ($\text{O}_2 - \text{C}_2\text{HCl}_3$). Если при окислении в чистом

(без галогеносодержащих добавок) кислороде число подвижных ионов составляет около 10^{11} см^{-2} , то при добавлении 6 % HCl происходит его снижение практически до нуля (до предела точности измерений концентрации подвижного заряда существующими методами). Влияние хлорсодержащих добавок на концентрацию подвижного заряда обусловлено образованием Si – O – Cl-комплексов, способных захватить и нейтрализовать ионы натрия [2 - 4].

На отполированных монокристаллических пластинах кремния в результате термического окисления формируется слой диоксида аморфной структуры. При высоких температурах (до 1200 °C), применяемых в процессах окисления, аморфный диоксид кремния термодинамически неустойчив и переходит в устойчивую кристаллическую фазу. Однако скорость этого перехода при температурах ниже 1000 °C чрезвычайно мала. Возможный механизм перехода подобен тому, который действует в переохлажденной жидкости, быстро превращающейся в твердое вещество при введении маленькой твердой частицы (затравки), например частицы пыли, образующей центр кристаллизации. Подобный процесс кристаллизации в SiO₂ может приводить к возникновению множества локальных кристаллических областей и др. несовершенств структуры, которые нежелательны во всех случаях применения SiO₂ в технологии ИС. Поскольку такому переходу способствуют центры кристаллизации, создаваемые примесями или дефектами структуры, кремниевые пластины перед окислением подвергаются тщательной теххимической обработке.

Метод термического окисления кремния позволяет получать высококачественный диэлектрик. Однако высокая температура процесса вызывает большие затруднения при окислении пластин с уже сформированными структурами элементов ИС. В результате длительной высокотемпературной обработки эти структуры могут значительно изменять свои характеристики. Поэтому приходится вводить существенные поправки в расчеты концентрационных профилей, учитывающие влияние диффузионных процессов в полупроводнике при температурах окисления. Кроме того, термическим окислением можно получать только SiO₂ на кремнии, а в технологии ИС используются и др. диэлектрики, особенно в ИС на полупроводниковых соединениях GaAs, GaP и т. п.

Подобный термическому окислению процесс - формирование пленок нитрида кремния прямым азотированием пластин кремния по реакции



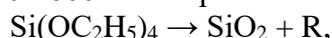
практически не применяется из-за весьма высоких температур (1300 °C) и чрезвычайно малых скоростей процесса.

7.2.2 Осаждение из газовой фазы

Химическое осаждение из газовой фазы позволяет осаждать пленки различных диэлектриков на различных подложках, осуществляется с использованием простого оборудования и вполне доступных исходных материалов, характеризуется более высокими скоростями роста слоев по сравнению с методом термического окисления [2 - 4].

Для осаждения пленок SiO₂ используются реакции пиролиза, окисления или гидролиза легколетучих соединений кремния: этоксисиланов, силана SiH₄, тетрахлорида кремния SiCl₄ и др.

Этоксисиланы – кремнийорганические соединения, представляющие собой продукты замещения в молекуле SiH₄ (или SiCl₄) атомов водорода (или хлора) на группу OC₂H₅. Степень замещения может изменяться от 0 до 4. Наиболее стабильным этоксисиланом является тетраэтоксисилан Si(OC₂H₅)₄ с температурой кипения 167 °C. Пары Si(OC₂H₅)₄ разлагаются при 600 - 800 °C с образованием SiO₂, SiO и различных органических радикалов:



где R – органические радикалы C₂H₅, CH₃ и др.

Схема простейшей установки для осаждения диэлектрических слоев из кремнийорганических соединений показана на рис. 7.2 [3]. В этой установке над кремниевыми подложками пропускается поток газа-носителя (аргона, азота или водорода), содержащего

пары этоксисилана. Регуляция давления паров осуществляется изменением температуры барботера с исходным материалом. Резистивный электронагреватель может располагаться как снаружи, так и внутри реакционной камеры. В последнем случае трубчатые нагревательные элементы монтируются в графитовый блок. На графитовом блоке помещается кварцевая плита, на которой и размещаются подложки. Скорость роста пленки SiO₂ при температуре выше 700 °С достаточно велика, что позволяет получать слои толщиной в несколько микрон за 10 - 15 мин.

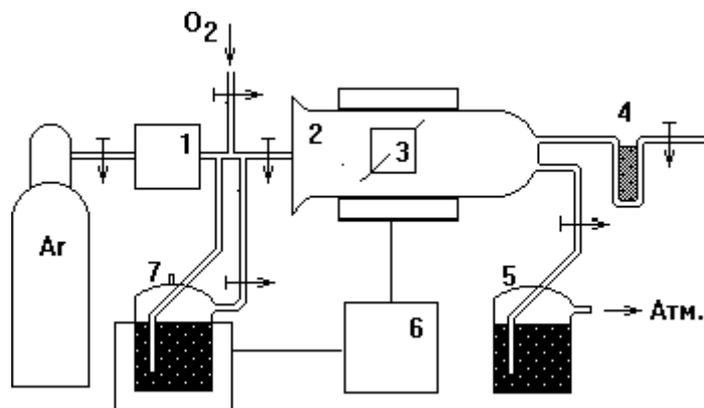


Рисунок 7.2 – Схема установки для проведения пиролиза в потоке инертного газа: 1 – очистка газа; 2 – камера из кварцевого стекла; 3 - вращающиеся подложки; 4 – система откачки с ловушкой; 5 - гидрозатвор; 6 – система управления и контроля процессами; 7 – термостат и барботер с исходным материалом

При температурах ниже 700 °С пиролиз тетраэтоксисилана происходит не полностью, и растущий слой SiO₂ загрязняется промежуточными продуктами разложения Si(OC₂H₅)₄. Выше 750 °С слой загрязняется углеродом, карбидом кремния и смолянистыми продуктами пиролиза. Чтобы избежать попадания углерода в пленки SiO₂, иногда для пиролиза используют кремнийорганические вещества, полностью разлагающиеся при более низких температурах и поэтому не загрязняющие растущую пленку SiO₂ углеродом. Так, применение тетраацетоксисилана Si(OCOCH₃)₄ и олигоацетоксисилоксана SinOn-m(OCOCH₃)₂(n-m) дает возможность получать качественные слои SiO₂ при температурах осаждения 500 °С и ниже.

Кремнийорганические соединения могут содержать неконтролируемые донорные и акцепторные примеси, способные диффундировать в расположенные под растущим слоем SiO₂ области кремния, загрязняя их до уровня 10¹⁸ ат/см³. Поэтому этоксисиланы, используемые для осаждения слоев SiO₂, получают из особо чистого силана, причем осаждение чаще проводят не в открытой трубе в потоке газа-носителя, а в вакуумной системе, которая после откачки наполняется парами этоксисилана. В результате уровень загрязнения поверхности кремния под слоем SiO₂ снижается до 10¹⁵ - 10¹⁶ ат/см³.

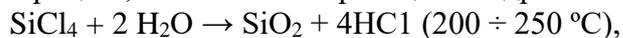
Реакция окисления



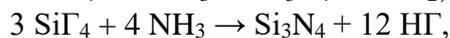
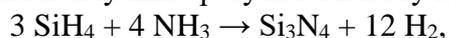
в отличие от пиролиза кремнийорганических соединений, протекает без образования органических остатков, т. е. в более чистых условиях, что способствует формированию очень чистых пленок SiO₂. Однако низкие температуры процесса приводят к образованию неплотных пленок. Чтобы избежать этого, необходимо строго регулировать концентрацию силана в газовой фазе и подавать его непосредственно на поверхности пластин, предотвращая тем самым зарождение и рост SiO₂ в газовой фазе. Окисление SiH₄ может происходить и без

внешнего нагрева²³, но для получения качественных плотных слоев SiO₂ на поверхности пластин необходимо поддерживать гетерогенную реакцию при температурах 300 – 350 °С, обеспечивающих десорбцию молекул воды из образующегося слоя. Скорость осаждения SiO₂ линейно растет с увеличением скорости потока силана, но очень резко - с повышением температуры. Резкий рост скорости осаждения с температурой можно скомпенсировать соответствующим разбавлением газа или снижением отношения O₂ к SiH₄.

Процесс, описываемый реакцией гидролиза



протекает уже при комнатной температуре, и образующийся в парах диоксид кремния осаждается на поверхность в виде рыхлых осадков. Для улучшения качества осаждаемого слоя, как и в предыдущем случае, необходимо поддерживать температуру на уровне 500 – 550 °С и подавать пары SiCl₄ (или SiF₄) непосредственно на поверхность пластины. Достоинства процессов осаждения слоев из газовой фазы по реакциям окисления и гидролиза – возможность их сочетания с эпитаксиальным наращиванием кремния в одном аппарате и высокая чистота формируемых пленок SiO₂. Осаждение из газовой фазы используется в технологии ИС и для получения др. пленочных диэлектриков. При осаждении слоев нитрида кремния наилучшие результаты получаются при использовании газофазных реакций:



где Γ – галоген (Cl, Br, I). Процессы осаждения Si₃N₄ протекают с удовлетворительной скоростью (от 1 до 20 нм/мин) при температурах 600 - 1100 °С. Слои, выращенные при высоких температурах (1000 - 1300 °С), обладают аморфной структурой, прозрачны, характеризуются высокой плотностью и хорошей маскирующей способностью. При недостаточно тщательной очистке поверхности пластин примеси могут стать зародышами кристаллитов в пленке, что приведет к резкому ухудшению ее однородности, а следовательно, и качества.

Слои оксида алюминия обычно получают анодным окислением алюминия, однако применяют и осаждение Al₂O₃ из металлоорганических соединений. Используя в качестве исходных продуктов смеси кремнийорганических соединений и металлоорганических соединений алюминия, нетрудно получать пленки алюмосиликатов (nAl₂O₃·mSiO₂), обладающие промежуточными свойствами по сравнению с Al₂O₃ и SiO₂.

В последние годы для осаждения пленок диэлектриков стали широко использоваться реакции типа пиролиза, окисления или гидролиза, осуществляемые при низких давлениях. Данный способ осаждения имеет ряд преимуществ. При низком давлении (1 - 65 Па), достигаемом обычной форвакуумной откачкой, газодинамическая обстановка на поверхностях пластин значительно упрощается (отсутствует турбулентность). Увеличивается длина свободного пробега частиц газов. Это позволяет установить пластины вертикально и близко друг к другу, за счет чего повысить загрузку (производительность) установок до 150 пластин за цикл при толщине пленок SiO₂ – 0,5 мкм или Si₃N₄ – 0,1 мкм. Эти установки не требуют применения газа-носителя.

Диэлектрические пленки, полученные химическим осаждением при низком давлении, отличаются высокой однородностью и минимальной дефектностью (менее двух пор на пластине). Однако вертикальное расположение пластин затрудняет подход газа-реагента к их поверхностям, что ведет к снижению скорости осаждения пленок, а следовательно, и уменьшению производительности. Оптимальные расстояния между пластинами (число пластин, обрабатываемых за цикл) и скорости роста пленки обеспечивают оптимальную производительность процесса.

²³ Взаимодействие SiH₄ с кислородом воздуха происходит со взрывом, поэтому необходимы либо тщательная герметизация металлических баллонов, содержащих SiH₄, либо значительное разбавление его др. газами, причем напуск газа в аппарат для осаждения следует осуществлять очень малыми количествами.

При получении пленок диоксида и нитрида кремния в последнее десятилетие стали широко применяться установки для плазмохимического осаждения диэлектрических пленок. Преимущество этих установок – высокая производительность и низкая температура процессов осаждения благодаря высокой химической активности газов-реагентов, которая стимулируется газовым разрядом, поэтому сам метод и назван плазмохимическим. Этим методом получают пленки нитрида кремния по реакции силана с аммиаком при температуре 300 – 500 °С вместо 900 °С при чисто химическом осаждении.

В качестве источников возбуждения плазмы применяются высокочастотные излучатели. Конструкции реакторов, используемых для плазмохимического осаждения пленок Si_3N_4 , вполне аналогичны установкам, используемым для плазмохимического травления пластин.

7.2.3 Ионно-плазменное распыление

Распыление постоянным током или током промышленной частоты эффективно лишь для металлических мишеней. Распыление диэлектриков нельзя проводить таким способом, т. к. ионный ток, поступающий на непроводящую поверхность мишени, заряжает ее положительно, и процесс ионной бомбардировки прекращается. Одним из способов нейтрализации положительного заряда на поверхности мишени является использование высокочастотного (ВЧ) потенциала, подаваемого к металлическому электроду, на котором закреплен распыляемый диэлектрик. Подводимая к электроду мощность передается плазме через ток смещения в материале диэлектрика.

ВЧ распыление может быть осуществлено с использованием диодной или триодной системы распыления. Наиболее часто используется триодная система, позволяющая избежать нежелательной бомбардировки ионами и чрезмерного нагрева подложки в процессе напыления пленок, т. к. в этом случае подложка не связана с электродами, которые создают и поддерживают газоразрядную плазму. ВЧ мощность передается плазме с помощью волновода или др. способом.

При ВЧ распылении энергия ионов, бомбардирующих мишень, определяется амплитудой и частотой напряжения, приложенного между мишенью и подложкой, и емкостью мишени. В принципе распыление диэлектрических материалов можно проводить на любой частоте. Однако на низких частотах распыление малоэффективно, так как за небольшую часть отрицательного полупериода переменного напряжения в поверхностном слое диэлектрика накапливается положительный заряд, и распыление прекращается. В положительный полупериод положительный заряд в поверхностном слое мишени нейтрализуется потоком электронов из плазмы. На низкой частоте эти потоки уравнивают друг друга. С увеличением частоты постепенно начинает сказываться инерционность ионов: все меньшее их число попадает на мишень за полупериод отрицательного напряжения. Нескомпенсированный электронный заряд в поверхностном слое мишени образует отрицательное смещение, которое увеличивается с ростом частоты.

Появление остаточного отрицательного заряда в поверхностном слое мишени вызывает перераспределение объемного заряда плазмы. Электроны отталкиваются от мишени и уходят в глубь плазмы. Вблизи мишени образуется оболочка из положительных ионов, толщина которой возрастает по мере увеличения отрицательного потенциала на поверхности мишени. Образование ионной оболочки увеличивает поток ионов, бомбардирующих мишень и производящих ее распыление. Уменьшение количества ионов в оболочке компенсируется поступлением положительных ионов из глубинных слоев плазмы.

Наименьшая частота, при которой начинается процесс перераспределения объемного заряда плазмы, составляет примерно 50 кГц. С повышением частоты отрицательное смещение увеличивается, постепенно приближаясь к некоторому постоянному значению, при котором ионный и электронный потоки на мишень выравниваются. При значительно более высоких частотах существенное влияние на процесс оказывают паразитные параметры высокочастотного контура, в результате чего амплитуда высокочастотного напряжения и

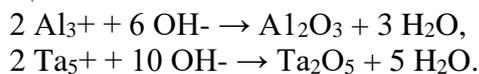
эффективность распыления диэлектрической мишени будут уменьшаться. Следовательно, существует некоторый оптимальный диапазон рабочих частот переменного напряжения, в котором распыление диэлектрических материалов наиболее эффективно. Практически приемлемым для работы является диапазон 10 - 20 МГц, в котором существует единственная частота 13,56 МГц, разрешенная для промышленного применения

Высокочастотное ионно-плазменное распыление позволяет получать пленки практически любых диэлектриков. Качество пленок, полученных ионно-плазменным распылением, обычно мало отличается от качества пленок, выращенных др. методами. Повышение скорости осаждения за счет увеличения подводимой ВЧ мощности обычно отрицательно сказывается на свойствах пленки [2 - 4].

Наряду с высокочастотным ионно-плазменным распылением диэлектрических мишеней, для получения пленок оксидов и нитридов металлов широко используется метод ионно-плазменного распыления металлических мишеней в средах, содержащих соответственно кислород или азот, при пониженном давлении.

7.2.4 Анодное окисление

Анодное окисление в электролите широко используется для получения таких оксидов, как Ta_2O_5 и Al_2O_3 . К металлам, которые легко образуют однородную пленку оксида на аноде при подаче потенциала между двумя электродами в электролитической ванне, относятся также ниобий, вольфрам, титан, сурьма, цирконий [2 - 4]. Тантал образует однородные пленки практически в любом водном растворе электролита, кроме плавиковой кислоты HF, в которой растворяется сам оксид. Однако для большинства металлов состав электролитов и диапазон pH (кислотности)²⁴ растворов подбирается экспериментально или по справочным данным. Так, алюминий растворяется в электролитах со значением $pH > 8$, т. е. в сильно щелочных растворителях. Плотные беспористые пленки Al_2O_3 получают анодированием алюминия в растворах солей фосфорной, лимонной и винно-каменной кислот. Пленки оксидов образуются по реакциям типа:



Процессом, лимитирующим скорость анодирования, как и в случае термического окисления, является диффузия ионов окислителя через уже образовавшуюся пленку оксида. Эмпирическое соотношение между плотностью тока анодирования и напряженностью электрического поля описывается уравнением

$$J = J_0 \exp(BE),$$

где J – текущая плотность тока анодирования, А/см² ;

J_0 – плотность тока в начале процесса анодирования, А/см²;

B – эмпирическая константа, называемая постоянной роста, нм/В;

E – напряженность электрического поля, В/м.

Скорость роста оксида пропорциональна плотности тока, и, следовательно, массу выращенного оксида можно определить по формуле Фарадея.

Несмотря на то, что для таких металлов, как Al, Ta, Zr анодный оксид имеет объем значительно больший, чем слой металла, из которого он образован, эти пленки не испытывают напряжений сжатия, как этого можно было ожидать. Анодные пленки указанных металлов обладают высокой пластичностью. Так, для пленок оксида тантала удавалось достигнуть 50 %- ного удлинения, прежде чем происходило их разрушение.

Получение диэлектрических пленок оксида тантала для тонкопленочных конденсаторов методом анодного окисления осуществляется при постоянной плотности тока до достижения заданного напряжения (см. рис. 6.4). В течение этого периода оксид растет с постоянной скоростью, пропорциональной росту напряжения, необходимому для поддержания тока. Процесс продолжается до тех пор, пока ионный ток не упадет до 1 % от

²⁴ Нейтральные растворы имеют pH = 7, кислые – меньше 7, а щелочные более 7.

первоначальной величины. Во второй стадии анодирования, протекающей при постоянном напряжении, скорость роста становится очень малой. Например, в течение первой стадии при постоянной плотности тока 10^{-3} А/см² скорость роста составляет 34 нм/мин, а в течение второй она уменьшается до 0,2 нм/с. Малая скорость роста позволяет контролировать толщину диэлектрика с большой точностью. Качество диэлектрика во второй стадии анодирования улучшается. Эту стадию осаждения называют формовкой оксида.

Ионно-плазменное окисление металлов осуществляется в кислородной плазме при низком давлении. На образец подается положительный потенциал. При давлении кислорода 6650 Па и разности потенциалов от 0,5 до 1 кВ обеспечивается ток в плазме порядка 20 мА. Рост пленки оксида можно условно разделить на две стадии. На первой стадии быстро образуется пленка толщиной в несколько десятков нанометров. На второй стадии окисление идет медленнее и скорость процесса становится пропорциональной напряжению, а ток через образец уменьшается со временем.

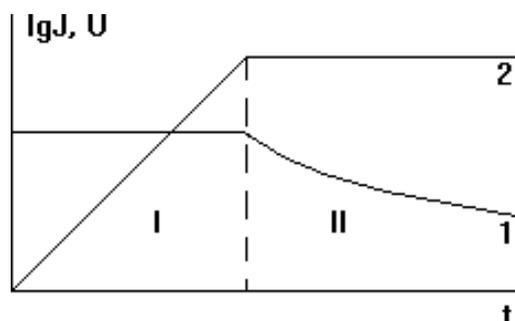


Рисунок 7.3 – Изменение тока (1) и напряжения (2) на двух стадиях получения анодного оксида тантала: I - первая стадия ($J = \text{const}$); II – вторая стадия ($U = \text{const}$)

Скорость роста пленок в плазме значительно ниже, чем в электролите, но получаются они более чистыми и однородными. Применять ионно-плазменное анодирование можно и при окислении металлов, оксиды которых растворимы в электролитах.

7.2.5 Термовакuumное испарение

Термовакuumное реактивное испарение применяется для получения оксидов кремния, алюминия, тантала, титана, ванадия и осуществляется следующим образом. В атмосфере кислорода при очень низком давлении ($133 \div 665$) 10^{-4} Па испаряется металл, который, реагируя на поверхности подложки с кислородом, образует пленку оксида. Эта пленка обладает сравнительно невысоким качеством из-за высокой дефектности или неоднородности ее структуры, а также из-за нарушения стехиометрии оксидов. Например, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность, тангенс угла диэлектрических потерь и др. характеристики у пленок Al_2O_3 на 10 – 20 % хуже, чем у массивных образцов Al_2O_3 [3].

7.3 Параметры качества диэлектрических пленок

В диэлектрических пленках могут возникать разного рода дефекты, способные приводить к ухудшению или нестабильности параметров элементов ИС. Эти дефекты могут иметь как атомные, так и более крупные размеры.

В пленках SiO_2 дефекты атомных размеров обусловлены: 1) недостатком или избытком ионов кислорода, 2) наличием в диоксиде атомов или ионов посторонних примесей и 3) образованием ненасыщенных связей на границе между кремниевой подложкой и слоем диоксида. Более крупные дефекты – это: 1) поры или каналы в оксидном слое, 2) микротрещины или границы между кристаллическими и аморфными участками слоя.

По происхождению макродефекты покрытий условно можно разделить на четыре группы: 1) кристаллизационные; 2) связанные с подложкой; 3) обусловленные механическими напряжениями; 4) "приобретенные".

Кристаллизационные дефекты возникают чаще всего при осаждении слоев из неконденсированных фаз в условиях значительного пресыщения. Появляющиеся при этом неравновесные, избыточные вакансии могут коалесцировать с образованием каверн или микропор. Двух- и трехмерные дефекты этого типа образуются также при срастании автономно растущих кристаллитов в результате их неплотной стыковки и сшивки. Большая плотность макродефектов такого рода наблюдается, если есть условия для гомогенного зародышеобразования. При наклонном падении молекулярного пучка может иметь место эффект "самозатенения", связанный с наличием микровыступов усиленно растущих кристаллитов.

Дефекты второй группы связаны с особенностями энергетического состояния и микрорельефа поверхности подложки, а также наличием загрязнений. Различные нерегулярности поверхности могут приводить к локальным изменениям пресыщений, создавая тем самым условия для образования пор, а микровыступы и инородные частицы - к эффекту "затенения". Загрязнения образуют в процессе осаждения несплошные или летучие химические соединения, выделяют твердые продукты, инициирующие растрескивание пленки, разлагаются термически с образованием газообразных продуктов, прорывающих растущий слой.

Одна из причин образования дефектов в слоях SiO_2 и на их границе с кремнием – механические напряжения. Многочисленные качественные и полуквантитативные модели возникновения механических напряжений учитывают целый ряд разнородных факторов и процессов. Можно считать, что уровень механических напряжений в пленках определяется балансом следующих компонент: 1) ростовой, связанной с особенностями формирования слоя на поверхности подложки; 2) термической, возникающей из-за различия теплового расширения пленки и подложки; 3) физико-химической, обусловленной изменениями объема пленки под влиянием окружающей среды.

Напряжения в слое SiO_2 , выращенном на кремниевой подложке при высокой температуре, являются сжимающими, так как термический коэффициент расширения кремния в несколько раз выше, чем у SiO_2 . Напряжения имеют значения порядка 10^8 Па. Очевидно, что значения напряжений и их роль тем больше, чем больше толщина слоя. Дело в том, что при неизменном среднем напряжении растягивающее усилие в пленке вблизи границы с подложкой линейно увеличивается по мере повышения толщины. По достижении некоторого критического значения усилие преодолевает силы адгезии, пленка проскальзывает относительно подложки и разрывается в наиболее дефектных местах.

Таким образом, механические микро- и макронапряжения в пленке, превышающие ее прочность, приводят к появлению в ней микротрещин и микросколов и отслаиванию от подложки. Известно²⁵, например, что микротрещины являются основным дефектом пленок SiO_2 , полученных термическим окислением кремния, при толщинах свыше 0.3 мкм. Малые напряжения могут не вызывать таких дефектов, но способствовать концентрации вакансий у границы раздела с подложкой, что приводит к изменению плотности энергетических состояний на границе между оксидом и кремнием. Влияние напряжений в слое SiO_2 сказывается и при его литографической обработке. Неоднородное распределение напряжений приводит к неоднородному травлению слоя, которое наблюдается как в местах концентрации напряжений, так и в местах скопления загрязнений.

«Приобретенные» дефекты возникают уже после осаждения пленки, в ходе последующих технологических операций (например, фотолитографии или диффузионного отжига).

С точки зрения дефектности наилучшими являются слои, выращенные термическим окислением на свободных от дефектов подложках, наихудшими – полученные анодным

²⁵ Ажажа Э.Г., Коркин В.И. О сплошности окисных пленок SiO_2 // Электронная техника. Сер. 2. - 1968. - Вып. 3. - С. 44 - 53.

окислением в растворах электролитов без последующей термической обработки. Значения плотностей пленок SiO_2 , выращенных различными способами, практически мало отличаются и составляют $2,2 \text{ г/см}^3$.

Для пленок, используемых в качестве электрической изоляции, на первый план выступают их диэлектрические свойства. Удельное электросопротивление очень сильно зависит от технологии получения пленок, особенно от концентрации примесей и дефектов в них. Лучшие пленки имеют удельное сопротивление $10^1 - 10^{16} \text{ Ом см}$, худшие – 10^{12} Ом см . Диэлектрическая проницаемость составляет от 3 до 3,8 в зависимости от метода выращивания пленок. Электрическая прочность меняется от 10^6 до 10^7 В/см , но может резко уменьшаться при появлении в пленках дефектов. Для пленок, используемых в качестве подзатворных диэлектриков в МДП-ИС, все параметры должны быть наилучшими.

Для пленок, используемых в качестве технологических масок, важными показателями качества являются скорость и равномерность травления в соответствующих растворителях. Так, травление пленок SiO_2 обычно проводят в водных растворах плавиковой кислоты HF с различными добавками. Скорость травления зависит от метода получения пленок: пленки, выращенные термическим окислением кремния, обычно имеют наименьшую скорость растворения (как более плотные), а пленки, осажденные термовакуумным испарением, – наибольшую (как менее плотные). Если полученные пиролизом пленки отжечь при высоких температурах, то можно достичь такого же качества, что и при термическом окислении [3].

7.4 Защитные покрытия

Не защищенная должным образом поверхность полупроводниковых кристаллов обладает, как известно, нестабильными свойствами. Планарная технология изготовления ИС значительно уменьшает, но не исключает полностью влияния поверхности кристаллов на их параметры. Кроме того, межэлементные соединения, выполненные на поверхности без специальной защиты, интенсивно разрушаются под воздействием влаги и др. загрязнений из окружающей среды при эксплуатации ИС и легко повреждаются в процессе сборки.

Защитные покрытия ИС должны:

- 1) иметь хорошую адгезию к поверхности полупроводниковой пластины и пленкам межэлементных соединений;
- 2) не вызывать больших механических напряжений в приповерхностном слое кристалла;
- 3) быть влаго- и газонепроницаемыми;
- 4) иметь высокие удельные поверхностное и объемное электрические сопротивления и электрическую прочность;
- 5) выдерживать резкие смены температур;
- 6) иметь низкую химическую активность и не взаимодействовать с кристаллом;
- 7) сохранять защитные свойства в широком интервале температур ($-60 \div +125 \text{ }^\circ\text{C}$).

В качестве материалов защитных покрытий ИС используются оксиды кремния SiO_2 , алюминия Al_2O_3 , титана TiO_2 , бериллия BeO , циркония ZrO_2 , нитрид кремния Si_3N_4 , многокомпонентные стекла различного состава, а также специальные лаки, эмали и компаунды.

Защитные пленки Si_3N_4 , SiO_2 , оксидов металлов, стекол типа $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, $\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3$ и др. наносят на поверхность полупроводниковых пластин химическим осаждением из газовой фазы, плазмохимическими или ионно-плазменными методами. Пленки многокомпонентных стекол с достаточно низкими температурами плавления получают также спеканием мелкодисперсного стеклянного порошка – фритты. Для получения однородных свободных от дефектов пленок размер частиц стекла должен быть не более $1 \div 1,5 \text{ мкм}$. Стеклянные суспензии нужного состава, приготовленные на основе органических растворителей, наносят на поверхность пластин пульверизацией и подвергают термической обработке.

Многокомпонентные стекла характеризуются высоким электрическим сопротивлением, малыми диэлектрическими потерями, высокой влагостойкостью, низкой проницаемостью для различных агрессивных сред и малыми коэффициентами диффузии щелочных ионов, в частности ионов натрия. Для предотвращения химического взаимодействия стекла с металлом межэлементных соединений перед нанесением пленки стекла на межсоединения осаждают буферный слой. Таким слоем может, например, служить пленка диоксида кремния, полученная методом пиролиза. Эффективно связывают ионы натрия покрытия из фосфорно-силикатного стекла (ФСС), содержащего $3 \div 6 \%$ P_2O_5 . По защитным свойствам такие стекла превосходят и оксид, и нитрид кремния. Меньшие в сравнении с оксидом кремния механические напряжения на границе с подложкой позволяет наносить бездефектные слои ФСС толщиной до 2 мкм. Твердость покрытий из ФСС в 1,5 раза выше, чем из чистого оксида кремния.

8 ЛИТОГРАФИЯ

Топологический рисунок (рельеф) слоев ИС формируют обычно методом литографии [2 - 4, 6, 7, 11]. Основана литография на использовании резистов - полимерных органических соединений, способных изменять свои свойства под действием излучений: ультрафиолетового – фотолитография²⁶, рентгеновского – рентгенолучевая литография, потока электронов – электронно-лучевая литография, потока ионов – ионная литография.

Уменьшение размеров элементов ИС повышает плотность упаковки, надежность, снижает стоимость, улучшает такие важные параметры, как быстродействие и потребляемая мощность, поэтому получение субмикронных размеров элементов является одной из основных задач технологии больших и сверхбольших ИС.

8.1 Фотолитография

8.1.1 Фоторезисты

Существуют позитивные и негативные фоторезисты. В позитивных резистах под действием излучения происходит деструкция, а в негативных - полимеризация - сшивание органических молекул. При проявлении удаляются экспонированные участки позитивных резистов, но неэкспонированные участки негативных.

Основными параметрами фоторезистов являются светочувствительность, разрешающая способность, кислотостойкость [2].

Светочувствительностью называют величину, обратную экспозиции H (энергии излучения на единицу площади), которая приводит к необходимому рабочему эффекту²⁷. Критерий чувствительности негативных фоторезистов – высокие защитные свойства экспонированных участков. Зависимость толщины h_s слоя, в котором произошла полимеризация при экспонировании, от экспозиции H называется характеристической кривой (см. рис. 8.1, а); наилучшее качество рисунка, в частности четкость края, достигается, если h_s близка к полной толщине слоя резиста. Критерий чувствительности позитивного фоторезиста – полное удаление экспонированных участков при проявлении. Полное удаление происходит, если достигнута максимальная скорость проявления. Зависимость скорости проявления от экспозиции (рис. 8.1, б) - характеристическая кривая позитивного резиста.

Другой параметр фоторезиста – разрешающая способность – зависит от толщины слоя и определяется как число задубленных линий на расстоянии 1 мм со свободными от резиста промежутками. Разрешающая способность, характеризующая для данного резиста литографический процесс в целом, обычно определяется как число линий, вытравленных в пленке SiO_2 (толщиной 0,5-1 мкм) на 1 мм и чередующихся с линиями SiO_2 такой же ширины.

²⁶ Photos lithos grapho (греч.) - пишу лучом по камню.

²⁷ Для характеристики светочувствительности используется также и само значение H .

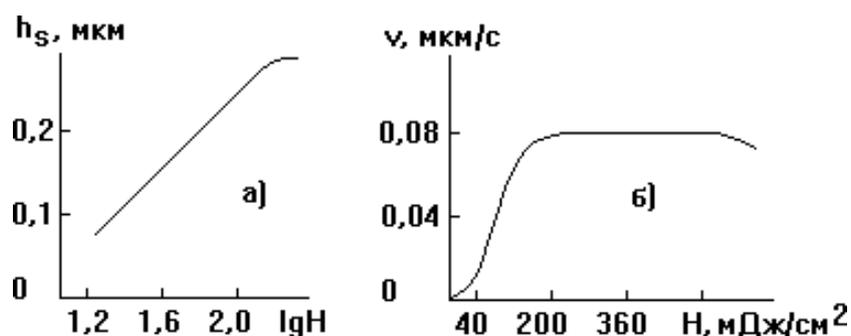


Рисунок 8.1 – Характеристические кривые негативного (а) и позитивного (б) фоторезистов

Кислотостойкость определяет устойчивость резистов к воздействию агрессивных сред. Этот параметр принято характеризовать отношением толщины пленки двуокиси кремния h к ширине растравленной области x , которое называют клином травления (см. рис.8.2).

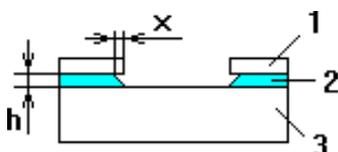


Рисунок 8.2 – Клин травления на границе рельефа:
1 – пленка фоторезиста; 2 – пленка SiO₂; 3 – кремний

Помимо высокой светочувствительности, разрешающей способности и кислотостойкости, фоторезисты должны удовлетворять ряду др. требований, выполнение которых существенно влияет на качество литографического процесса. В частности, они должны достаточно легко наноситься и удаляться с поверхности подложки, обеспечивать получение тонких (от 0,2 до 3 мкм) и сплошных пленок с высокой адгезией, не должны содержать механических включений (например, частиц пыли).

Минимальный размер элемента a_{min} и толщина слоя резиста h связаны - в определенном приближении - соотношением $h < (0,2 - 0,3) a_{min}$. Это соотношение накладывает ограничение на максимальную толщину слоя. Минимальная толщина определяется допустимой плотностью проколов, поскольку с уменьшением толщины плотность проколов увеличивается.

Органические резисты легко разрушаются в процессе плазменного травления. Кроме того, плазменная обработка сопровождается нагревом поверхности, что приводит к дополнительной деградации резистивного слоя. При создании структур с высоким аспектным отношением (отношением высоты линии к ширине) толщина резиста не может превышать ширины линии. Все это приводит к необходимости использования сложных многослойных резистов, в которых обычные полимерные композиции обеспечивают высокую экспозиционную чувствительность, тогда как др. слои - необходимую плазмо- и термостойкость. Поскольку неорганические материалы по своей природе обладают более высокой стойкостью к плазменным и термическим обработкам, представляют интерес неорганические резисты [6, 7].

8.1.2 Базовый литографический процесс

Базовый технологический процесс фотолитографии включает следующие основные операции [2 - 4]: 1) подготовка поверхности; 2) нанесение резиста; 3) сушка; 4) совмещение и экспонирование; 5) проявление; 6) задубливание; 7) травление; 8) удаление резиста.

Подготовка поверхности направлена на повышение адгезии, а значит и кислотостойкости фоторезиста. Адгезия фоторезиста снижается, а боковое растравливание

возрастает по мере повышения гидрофильности²⁸ поверхности. Непосредственно после окисления кремния комбинированным способом или в сухом кислороде фоторезист наносят без каких-либо дополнительных обработок. Если окисление проведено во влажной среде или окисленные подложки хранятся более часа, дополнительная термообработка в сухом кислороде или азоте при 1000 °С в течение нескольких минут позволит устранить возросшую гидрофильность поверхности.

Пленки боросиликатных и фосфоросиликатных стекол более гидрофильны, чем пленки SiO₂. Для повышения угла смачивания пленок стекол используются инфракрасная сушка, а также ряд более сложных способов, например обработка в органосиланах.

Адгезия фоторезиста к поверхности проводящих пленок зависит от метода и условий их получения. Например, качество рисунка на пленках алюминия повышается при увеличении скорости травления алюминия, что возможно при более высоких скоростях напыления, характерных для электронно-лучевого испарения.

Для нанесения фоторезиста на подложку используют следующие способы: 1) центрифугирование; 2) пульверизация; 3) погружение в раствор; 4) полив. Равномерность нанесения резиста центрифугированием обеспечивается центробежными силами при вращении центрифуги с подложкой. Скорость вращения центрифуги зависит от требуемой толщины слоя и вязкости резиста. Особенностью др. методов нанесения фоторезиста является возможность получения толстых слоев (~ 2,5 ÷ 20 мкм).

Первая сушка нанесенного на подложку фоторезиста обеспечивает удаление растворителя. Температуру сушки (обычно не выше 110 °С) выбирают с таким расчетом, чтобы исключить разрушение молекул в результате термохимических процессов. Длительность сушки зависит от типа резиста.

Операции *совмещения и экспонирования* выполняются на специальных установках, конструкция которых определяется способом передачи изображения. Существуют два основных способа передачи изображения: контактный (теневого) и проекционный.

При теновом экспонировании (см. рис. 8.3, а) фотошаблон, выполненный в масштабе 1:1, находится в контакте с подложкой (точнее - с фоторезистом) или отстоит от нее на несколько микрометров – в случае печати с зазором. Главными недостатками контактной печати являются ограничения по совмещению и возможность повреждения фотошаблонов.

Проекционные системы (см. рис. 8.3, б) используют линзы (или зеркала), позволяющие проецировать рисунок фотошаблона на квадратное поле ограниченной площади (например 20×20 мм) или полосу шириной несколько миллиметров. Масштаб печати: 1:1, 5:1 или 10:1; область печати сканируется по пластине. Высокоточный механизм перемещения – координатный столик – обеспечивает точное совмещение рисунков при каждой операции экспонирования.

Явление дифракции приводит к тому, что лучи от точечного объекта не сходятся в точку изображения, а создают дифракционную картину в виде центрального светового пятна (кружок Эри²⁹), окруженного концентрическими кольцами убывающей интенсивности. Для повышения качества изображения существенное значение имеет уменьшение диаметра центрального пятна, поскольку в нем сосредоточено преобладающее количество света³⁰. Этот диаметр зависит от длины волны излучения λ и апертуры объектива A :

$$2r = 1,22\lambda/A.$$

²⁸ Гидрофильность - гидрофобность обычно характеризуют углом смачивания, образованным поверхностью подложки и касательной к капле воды.

²⁹ Фотолитография и оптика / Под ред. Я.А.Федотова и Г.Поля. – М.: Сов. радио, 1974. – 392 с

³⁰ В центральном пятне сконцентрировано 83,8 % всего света, в то время как уже в первом концентрическом кольце - всего лишь 7,2 %.

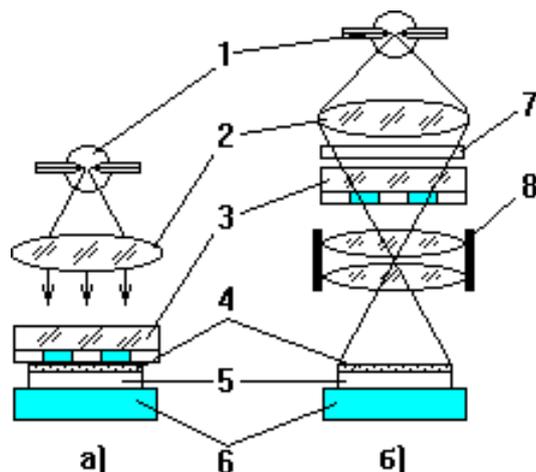


Рисунок 8.3 – Схемы контактного (а) и проекционного (б) экспонирования:
 1 - ртутная лампа; 2 – конденсор; 3 – фотошаблон; 4 - фоторезист; 5 – подложка; б – столик, 7 – светофильтр; 8 – объектив

Апертура объектива характеризует площадь поверхности линзы для входа света (диаметр входного отверстия):

$$A = n \cdot \sin\theta,$$

где n – показатель преломления среды в пространстве изображения (для воздуха $n = 1$);

θ – угол, образуемый нормалью к поверхности линзы в центральной точке и прямой, соединяющей границу входного отверстия с фокусом.

Разрешающая способность определяется как расстояние между двумя точками изображения, при котором максимум дифракционной картины одной точки совпадает с первым минимумом дифракционной картины другой точки. Это расстояние

$$\alpha = \frac{2r}{2} = 0,61\lambda/A$$

определяет наименьший видимый размер элемента. С увеличением апертуры разрешающая способность улучшается, но снижается глубина резкости T :

$$T = \lambda/A^2.$$

Контактная литография при нулевом зазоре между фотошаблоном и подложкой и толщине фоторезиста 0,2 мкм позволяет получать размеры структур, сравнимые с длиной волны. При проекционном экспонировании дифракционные явления, характерные для контактной литографии, подавляются, и разрешающая способность ограничивается явлением интерференции: многократные отражения на границах фоторезист – пленка SiO_2 , и пленка SiO_2 – подложка приводят к образованию стоячей волны монохроматического излучения и появлению ореола (расширению окна) [2].

Для облегчения операции совмещения на фотошаблонах создаются так называемые фигуры совмещения - специальные топологические рисунки в виде щели, креста, штрихов и т. п. [2 - 4].

Микроскоп для визуального наблюдения и контроля качества совмещения должен обладать определенным увеличением (определяет размер изображения рисунка), разрешающей способностью и глубиной резкости. Компромиссное выполнение указанных требований приводит к тому, что используемые оптические системы дают очень небольшие полезные поля. Так, для совмещения элементов с размерами 2 - 5 мкм требуется увеличение в 200 раз. Если при этом необходима глубина резкости 10 - 15 мкм рабочее поле составит около 1 - 3 мкм. Столь малое поле не позволяет качественно контролировать совмещение по всей подложке, имеющей много большие размеры. Поэтому в установках совмещения и экспонирования используются специальные двухпольные микроскопы, позволяющие наблюдать одновременно два удаленных друг от друга участка подложки.

Оптимальные режимы экспонирования зависят от чувствительности и толщины слоя фоторезиста. Увеличение времени экспонирования позволяет уменьшить время проявления. При этом проявитель меньше воздействует на неэкспонированные участки резиста, что приводит к уменьшению плотности дефектов - проколов. Однако чрезмерное увеличение времени экспонирования чревато снижением точности передачи размеров изображения и ухудшением воспроизводимости процесса.

Проявление позитивных фоторезистов осуществляют, например, в сильно разбавленных растворах КОН и NaOH или тринатрийфосфата Na_3PO_4 . Характерной особенностью позитивных фоторезистов является их чувствительность к перепроявлению: при длительном пребывании в проявителе необлученные участки пленки резиста начинают химически взаимодействовать с ним и постепенно растворяются.

Для проявления негативных фоторезистов обычно используют органические растворители (толуол, хлорбензол, трихлорэтилен и др.), под воздействием которых набухают облученные и растворяются необлученные участки пленки фоторезиста.

Задубливание защитного рельефа (вторая сушка фоторезиста) производится при 130 - 200 °С (для резистов различных марок), как правило, в несколько этапов с постепенным повышением температуры. Целью этой операции является повышение адгезии и кислотостойкости защитного рельефа фоторезиста. После задубливания рельефа обычно следуют контроль и исправление дефектов.

Травление свободных от фоторезиста участков поверхности подложки возможно с использованием и жидкостных, и сухих процессов. Жидкостные процессы травления имеют очень высокую селективность и успешно применяются при изготовлении ИС невысокой степени интеграции. Применение жидкостного травления в производстве больших ИС ограничено несколькими причинами [7]: 1) размер рисунка не может быть меньше 2 мкм; 2) из-за изотропности процесса травления рельеф формируется с наклонными стенками; 3) требуется многоступенчатая промывка и сушка; 4) используемые химикаты, как правило, сильно ядовиты; 5) вносятся дополнительные загрязнения. По указанным причинам для травления линий с субмикронным разрешением и высоким аспектным отношением в основном используются различные плазменные обработки.

Одним из наиболее перспективных процессов считается травление потоком химически активных, но нейтральных частиц³¹. К таким частицам относятся свободные радикалы и некоторые короткоживущие молекулярные комплексы, которые возникают в плазме соответствующих газов.

Схема реактора для химического (радикального) травления приведена рис. 8.4 [7]. ВЧ разряд в реактивном газе возбуждается в кварцевой трубе, помещенной в волновод. За счет разницы давлений в разрядной камере и реакторе плазма распространяется по транспортной трубе в разрядную камеру. Однако заряженные частицы быстро рекомбинируют, тогда как радикалы достигают обрабатываемой пластины.

Основное применение подобные процессы находят в технологических операциях связанных с изотропным, но высоко селективным травлением. Например, при удалении резистов, при травлении маски из нитрида кремния на оксиде или поликремнии. В комбинации с созданием пассивирующих слоев на боковых стенках линий достигается анизотропия, достаточная для травления структур с высоким аспектным отношением [7, 11].

Удаление позитивного фоторезиста возможно кипячением в серной кислоте или обработкой в горячей (70 - 80 °С) смеси деметилформамида и моноэтаноламина. Негативные фоторезисты в растворителях только набухают, удаление их с поверхности пластин требует механического воздействия. В последние годы для удаления фоторезиста преимущественно используют плазмохимические методы.

После удаления фоторезиста осуществляется финишный контроль.

³¹ Chemical downstream etching (CDE) process.

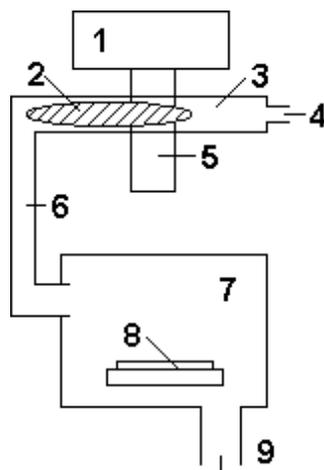


Рисунок 8.4 – Схема реактора для химического (радикального) травления:
 1 - СВЧ генератор; 2 - плазма; 3 - разрядная трубка; 4 - реактивный газ; 5 - волновод; 6 - транспортная труба с нейтральными радикалами; 7 - реактор; 8 - подложка; 9 - откачка

8.1.3 Фотошаблоны

Фотошаблоны (ФС) представляют собой прозрачные пластины с рисунком в виде непрозрачных и прозрачных (для излучения определенной длины волны) участков. Рисунок (фотомаска) содержит информацию о топологии одного из слоев структуры ИС и многократно повторяется в пределах поля ФС.

В зависимости от вида фотомаски все ФС подразделяются на две группы: 1) непрозрачные и 2) селективно-прозрачные (полупрозрачные) или, как еще говорят, транспарентные или цветные. Непрозрачные ФС изготавливаются на основе фотоэмульсий или металлических пленок, их называют, соответственно, фотоэмульсионные и металлические ФС. Цветные ФС изготавливаются на основе пленок оксидов металлов, в частности оксида железа Fe_2O_3 . «Непрозрачные» участки цветных ФС обладают высокой оптической плотностью (низким пропусканием) в ультрафиолетовой области и низкой оптической плотностью (высоким пропусканием) в красной области спектра.

Сложность изготовления ФС принято оценивать по минимальным размерам элементов ИС, точности и дефектности [3]. Вначале на фотопластине создается так называемый первичный фотооригинал (ПФО) - топологический рисунок слоя ИС в масштабе 10:1. Последовательным пошаговым экспонированием ПФО в фотоповторителе (мультиплицированием) изготавливается эталонный шаблон (ЭС) - матрица рисунков слоя с истинными (рабочими) размерами элементов. Копированием ЭС слоев изготавливают комплект рабочих шаблонов (РШ), который непосредственно используется в производстве ИС.

На начальном этапе развития литографии для изготовления ПФО использовали в основном, два метода [2 - 4]: оптикомеханический и фотонабор. Суть первого метода состоит в механическом вырезании на ручном или автоматическом координатографе первичного оригинала (увеличенного в 200 - 500 раз рисунка), с последующим фотографическим уменьшением размеров рисунка посредством редуционной камеры. Данный метод применим в производстве ИС весьма низкой степени интеграции.

Метод фотонабора реализуется на специальных установках (см. рис. 8.5). Введенный в ЭВМ топологический рисунок слоя с учетом допустимой погрешности топологии автоматически разлагается на элементарные прямоугольники. ЭВМ управляет координатным столом и подвижными пластинами наборной диафрагмы. Центр экспонируемого прямоугольника совмещается с оптической осью проектора. После установки координатного стола и подвижных пластин наборной диафрагмы в заданное положение происходит

экспонирование. Затем стол перемещается на следующую позицию и устанавливается соответствующий этой позиции размер экспонируемого прямоугольника.

Существуют также оптические генераторы изображения (ОГИ) с остро сфокусированным лучом света. В процессе сканирования площади фотопластины луч вспыхивает и гаснет в соответствии с программой, создавая рисунок заданной топологии. ОГИ принципиально проще фотонаборных установок, но работают медленнее и составление программ для них – сложнее.

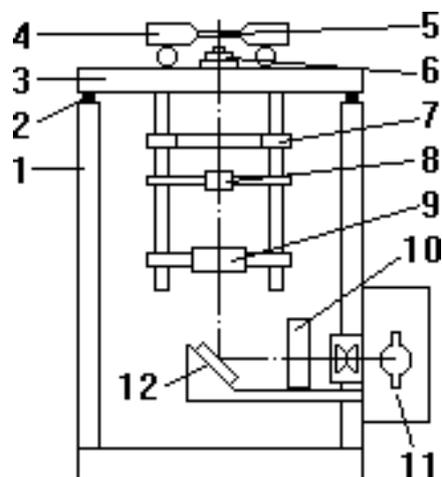


Рисунок 8.5 – Схема микрофотонаборной установки:

1 – несущая тумба; 2 - резиновые прокладки; 3- основание; 4 - координатный стол; 5 - фотопластина; 6 – объектив; 7 – гнездо оригинала; 8 – оптическое устройство; 9 – наборная диафрагма; 10 – затвор; 11 – осветитель; 12 – зеркало

В последние годы ЭШ изготавливаются преимущественно методом электроннолучевой литографии (см. раздел 8.3.1). Этот метод сложнее рассмотренных, но обеспечивает более высокую воспроизводимость результатов и более высокие предельно достижимые характеристики ФШ.

8.2 Повышение разрешающей способности фотолитографии

8.2.1 Фазосдвигающие маски

При экспонировании близкорасположенных линий световые лучи имеют приблизительно одинаковые фазы. В области между соседними линиями происходит интерференция «хвостов» экспонирующих эти линии световых потоков. При работе в режиме близком к дифракционному пределу это приводит к резкому снижению разрешающей способности (см. рис. 8.8) [6]. Применение специальных фазосдвигающих покрытий при изготовлении фотошаблонов обеспечивает экспонирование соседних линий лучами с противоположными фазами, что позволяет повысить разрешение.

Более простым способом исключения интерференционных эффектов является экспонирование с применением так называемого внеосевого освещения. В этом случае угол падения света на резист выбирается так, чтобы соседние линии освещались лучами с противоположными фазами.

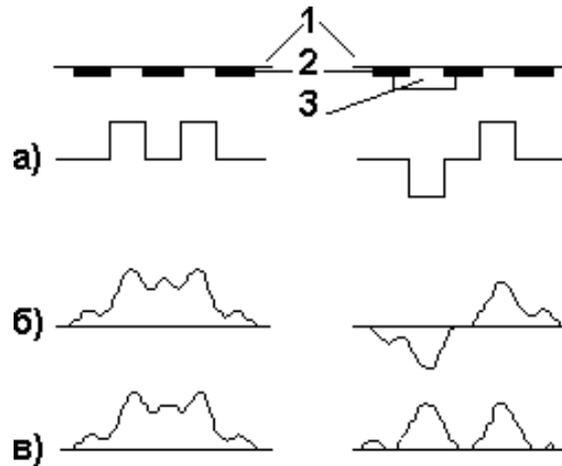


Рисунок 8.8 – Экспонирование резиста с использованием шаблона без сдвига фазы (слева) и с фазовым сдвигом (справа):

1 - кварцевое стекло, 2 - фотомаска, 3 - фазосдвигающее покрытие; а) фаза монохроматического излучения над фоторезистом; б) энергия излучения в фоторезисте с учетом интерференции; в) рабочий эффект излучения

8.2.2 Многослойные резисты

Уже существующий на поверхности пластины сложный рельеф перед очередным нанесением фоторезиста можно «выровнять» (планаризовать) путем нанесения специального антиотражающего покрытия (см. рис. 8.9) [6, 11]. Помимо планаризации поверхности, этот дополнительный слой поглощает излучение, отраженное от поверхности подложки.

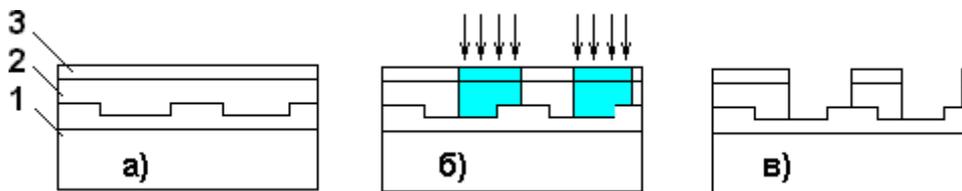


Рисунок 8.9 – Применение двухслойного резиста с антиотражающим покрытием: а) нанесение на подложку (1) антиотражающего покрытия (2) и резиста (3); б) экспонирование; в) проявление

Обычно в качестве антиотражающего покрытия используются различные низкочувствительные к излучению органические композиции. Они должны пропускать свет в том же спектральном диапазоне, что и резист, обладать хорошей адгезией к подложке и резисту, проявляться и удаляться тем же процессом, что и резист. Высокочувствительный слой верхнего резиста может иметь малую толщину, что положительно влияет на допустимую глубину фокуса и, соответственно, качество изображения.

На рис. 8.10 показана схема процесса, который может быть назван литографией с двухслойным резистом различной полярности [6, 11]. На первом этапе на подложку с ранее организованным сложным рельефом наносится толстый слой позитивного резиста. Его толщина выбирается из условия достижения максимальной планаризации поверхности пластины. Затем наносится тонкий слой резиста другой полярности. Его толщина выбирается из условия получения оптимальной глубины фокуса и достижения наивысшего разрешения для данной оптической системы. После экспонирования и проявления тонкого верхнего резистивного слоя он играет роль маски при глубоком экспонировании толстого нижележащего резиста.

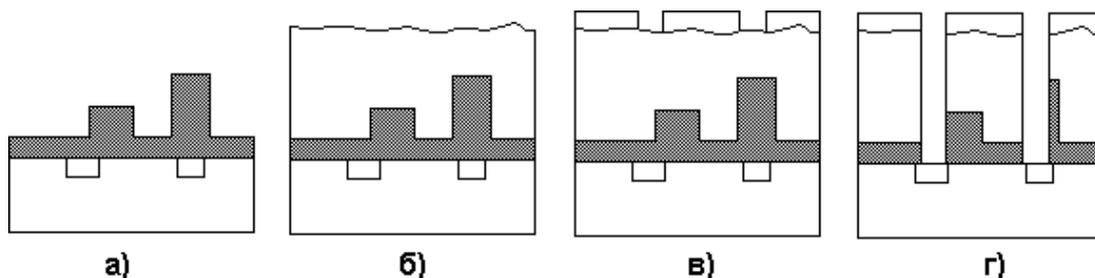


Рисунок 8.10 – Схема литографического процесса с двойным резистом разной полярности: а) исходная структура; б) нанесение слоя первого (позитивного) резиста; в) нанесение, экспонирование и проявление слоя второго (негативного) резиста; г) экспонирование и проявление первого резиста, травление рельефа

Существует и др. варианты использования двухслойного резиста. Один из них получил название «lift-off» процесс³² и часто используется для получения металлических линий нанометрового масштаба (см. рис. 8.11) [6]. Рельеф фоторезиста в этом процессе можно рассматривать как трафарет, абсолютно плотно совмещенный с подложкой. Последующие операции состоят в осаждении рабочей пленки и стравливании рельефа фоторезиста. При этом вместе с резистом удаляются и те участки рабочей пленки, которые нанесены на его поверхность.

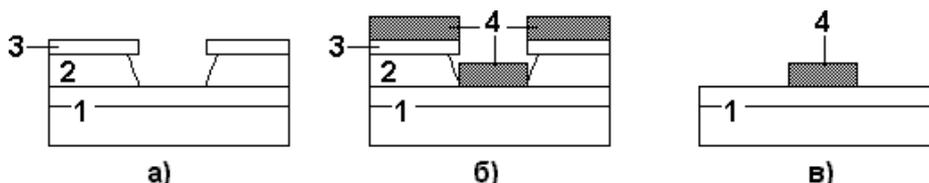


Рисунок 8.11 – «Lift-off» процесс, основанный на применении двухслойного резиста: 1 - подложка, 2 - первый резист, 3 - второй резист, 4 - металл; а) проявление двухслойного резиста; б) осаждение металла; в) удаление резистивного слоя

8.2.3 Литография с экстремальным ультрафиолетом

С уменьшением длины волны дифракционное рассеяние уменьшается, поэтому в технологии литографии используют преимущественно коротковолновое излучение. Для производства ИС с разрешением 350 нм применялась 360 нм дуговая ртутная лампа (i-линия). Дальнейшее увеличение степени интеграции ИС привело к переходу в область так называемого глубокого ультрафиолета: топология 250 нм транзистора рисуется с использованием 248 нм KrF эксимерного³³ лазера, 180 нм литография - 198 нм ArF эксимерного лазера, 118 - 120 нм литография - 157 нм F₂ лазера [6, 7].

В фотолитографии с экстремальным ультрафиолетом используются излучение с длиной волны 11 - 14 нм, что требует применения отражательной оптики и шаблонов. На первом этапе развития таких систем применялось синхротронное излучение. Позже были разработаны малогабаритные источники предельного ультрафиолета, принцип работы которых состоит в следующем. Излучение стандартного неодимового лазера (1063 нм длина волны, 40 Вт мощность, 100 Гц частота, 5 нс длительность импульсов) фокусируется на импульсной газовой струе ксеноновых кластеров. Образующаяся лазерная плазма излучает широкую спектральную полосу предельного ультрафиолета с длиной волны 10 - 25 нм.

³² Этот процесс называют также обратной (взрывной) фотолитографией или методом контактной маски.

³³ Эксимер (от англ. excited dimer - возбужденный димер) - молекула, которая может существовать только в возбужденном состоянии.

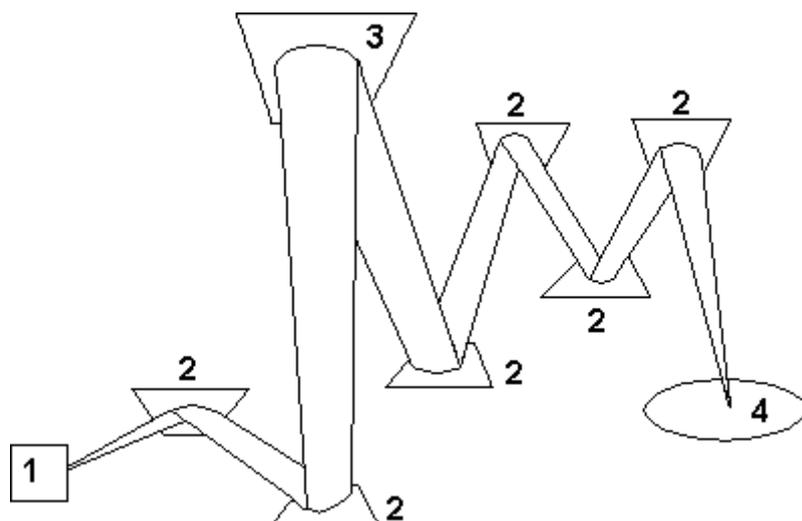


Рисунок 8.12 – Схема процесса экспонирования с экстремальным ультрафиолетом:
1 - источник излучения; 2 - зеркала; 3 - фотомаска; 4 – подложка

На рис. 8.12 показана схема экспонирования резиста экстремальным ультрафиолетом, включающей два набора зеркал [7]: 1) между источником света и маской; 2) между маской и подложкой с резистивным слоем. Второй набор зеркал обеспечивает уменьшение изображения в 4 раза. Многослойные интерференционные зеркала могут содержать от 40 до 80 пар слоев молибден – кремний с оптической толщиной каждого слоя, равной четверти длины волны. Такое же сложное строение имеет и фотомаска (см. рис. 8.13). Требования к оптическим характеристикам очень жесткие. В частности поверхности и границы раздела зеркал и других оптических элементов должны иметь неровности не более 0,25 нм. Необходимо также термостатирование рабочих элементов или компенсация "ухода" размеров, вызванного изменением температуры [4].

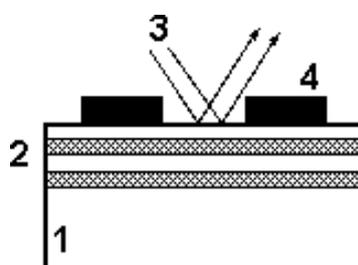


Рисунок 8.13 – Строение фотомаски для литографии с экстремальным ультрафиолетом:
1 - подложка; 2 - многослойное покрытие; 3 - излучение; 4 - поглотитель

Литография с экстремальным ультрафиолетом позволяет получать ширину линий до 30 нм. Недостатки процесса - необходимость сканирования изображения фотомаски по поверхности подложки, высокая сложность зеркальной оптики и технологии изготовления фотошаблонов. Все это делает такой подход исключительно дорогостоящим и оставляет место для разработки литографических процессов основанных на иных физических принципах.

8.3 Другие виды литографии

8.3.1 Электронно-лучевая литография

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) основана на управлении траекторией движения свободного электрона электрическим и магнитным полем³⁴. Длина волны электрона

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mqU}} \approx 10^{-4} \sqrt{\frac{150}{U}},$$

где h – постоянная Планка;

m и q – масса и заряд электрона, соответственно;

U – разность потенциалов на пути, пройденном электроном в процессе ускорения.

При $U = 15$ кВ $\lambda = 10^{-5}$ мкм, что на несколько порядков ниже длины волны светового излучения. При столь малых длинах волн, минимально возможные размеры рисунка при экспонировании резиста, определяются уже не дифракционным рассеянием, а условиями взаимодействия электронного пучка с системой резист – подложка [2 - 4].

Классическая установка для электроннолучевой литографии (см. рис. 8.14) содержит электронную пушку, систему формирования и отклонения электронного пучка, систему перемещения по координатным осям предметного столика, на котором располагается экспонируемая подложка. Включение и отключение электронного пучка, его сканирование, а также управление предметным столиком осуществляется с помощью ЭВМ. В качестве резиста широко используется полиметилметакрилат.

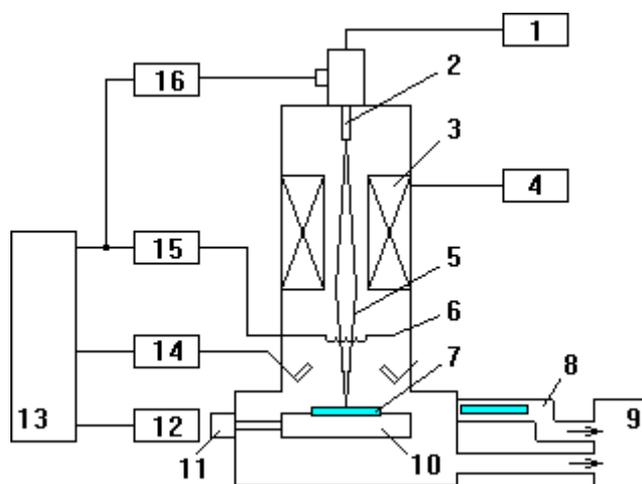


Рисунок 8.14 – Схема установки электроннолучевой литографии:

- 1 – источник питания электронной пушки; 2 - электронная пушка; 3 – система фокусирования пучка электронов; 4 - устройство для возбуждения системы фокусирования; 5 – электронный пучок; 6 - устройство отклонения электронного пучка; 7 – подложка; 8 - камера замены подложек; 9 – откачивающая система; 10 – предметный стол; 11 – двигатель; 12 – привод двигателя; 13 – ЭВМ; 14 – детектор обратного рассеяния электронов; 15 – устройство управления сканированием электронного пучка; 16 – устройство для управления запирающим-отпиранием электронного пучка

Существуют два типа систем отклонения пучков – растровые и векторные [3]. В растровых системах электронный пучок сканирует поверхность подложки независимо от наличия или отсутствия рисунка. На участках, которые не должны экспонироваться, электронный пучок прерывается, для чего в установках предусматривается система включения и отключения (отведение в сторону специальными электродами) электронного пучка (см. рис. 8.15, а). В векторных системах электронный пучок сканирует только те участки

³⁴ В 1967 году было предложено использовать электронно-лучевую трубку в качестве экономичного и быстродействующего генератора фотошаблонов для специализированных ИС, в 1968 электронно-лучевое экспонирование было применено для непосредственного «рисования» по резисту [7].

подложки, которые должны быть экспонированы. По завершении экспонирования одного участка луч переводится в начало координат следующего участка (рис. 8.15, б).

В обеих системах размер экспонируемого участка составляет несколько квадратных миллиметров. Для экспонирования топологического рисунка на всей подложке нужно передвигать предметный столик с ней в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Используются шаговое и непрерывное перемещения. При шаговом перемещении столик останавливается на время экспонирования, а затем перемещается в новое положение и производится сканирование следующего участка подложки. При непрерывном перемещении столика одновременно происходит и экспонирование. Такое перемещение применяется только для растровых отклоняющих систем. Столик и пучок электронов двигаются во взаимно перпендикулярных направлениях. Скорость движения столика задается такой, чтобы за время сканирования полосы и обратного возвращения луча столик переместился на ширину линии экспонирования. Такой способ более производителен.

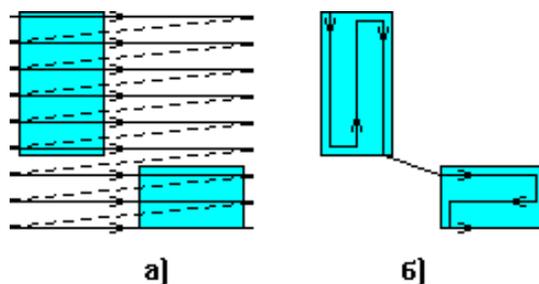


Рисунок 8.15 – Способы сканирования электронного луча:
а – растровый; б – векторный

При использовании ЭЛЛ непосредственно для изготовления ИС необходимо обеспечить точное совмещение рисунков различных топологических слоев. Для проведения процессов совмещения на подложке создают специальные маркерные метки [3]. Метки изготавливают так, чтобы при сканировании по ним электронного пучка на соответствующих детекторах возникли сигналы, обусловленные отраженными, либо вторичными электронами. Положение подложки при первой литографии принимается за эталонное.

Суть процесса совмещения состоит в следующем. Электронный пучок сниженной мощности по сравнению с экспонирующим (чтобы избежать воздействия на резист) при пересечении маркерной метки в процессе сканирования вызывает появление сигнала на детекторе электронов. По результатам сканирования метки (обычно во взаимно перпендикулярных направлениях) вычисляется положение ее осей относительно оси электронно-оптической системы, определяется ошибка и корректируется положение столика с подложкой. По достижении требуемого совмещения производится экспонирование. Перед экспонированием следующего участка подложки операции совмещения повторяются.

Маркерные метки обычно выполняются в виде ступеньки в кремнии, в осажденных на него пленках двуокиси кремния или металлов с большими атомными номерами. Коэффициент отражения электронов возрастает с увеличением высоты ступеньки и уменьшением отклонения ее стенки от вертикали. Обычно высота ступеньки составляет несколько микрометров.

Для оптимизации процесса экспонирования с целью получения минимального размера элементов большое значение имеет правильный выбор ускоряющего напряжения, т. к. от него зависит минимальный диаметр сфокусированного пучка электронов [2 - 4]. Фундаментальное ограничение по разрешению определяется соотношением неопределенностей Гейзенберга ($\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$) и может достигать значений ниже 10 нм [6]. Вследствие рассеяния электронов, отражения их от границы с подложкой и образования достаточно энергетичных вторичных электронов диаметр области резиста, экспонируемого электронами, превышает диаметр

электронного пучка. Причем величина расширения линии сильно зависит от толщины слоя резиста. Минимально достижимая ширина линии может быть оценена как сумма диаметра пучка электронов и толщины слоя резиста. Глубина резкости сфокусированного электронного пучка может составлять 25 – 100 мкм, что позволяет получать одинаково резкие изображения по всей площади полупроводниковой пластины.

Недостатком системы сканирования остросфокусированным пучком является значительное время экспонирования. Причем время экспонирования увеличивается при повышении разрешающей способности, т. к. при уменьшении диаметра пучка необходимо снижать его ток и увеличивать число линий сканирования. Имеются также ограничения и по площади сканирования. Низкая производительность процесса сдерживает внедрение метода непосредственно в производство ИС.

Один из способов увеличения производительности ЭЛЛ – использование матрицы параллельных электронных пучков (микроколонн). Однако этот способ предъявляет весьма жесткие требования к каждому источнику электронов в матрице по таким характеристикам, как интенсивность, моноэнергетичность и метод управления пучком [6].

Оценки производительности системы микроколонн в установке для 100 нм литографии следующие [6]: разрешение до 50 нм; пластины диаметром до 300 мм; производительность 10 пластин в час; количество микроколонн - 50; рабочий ток - 30 нА на колонну. В случае увеличения числа колонн ток понижается до 0,8 нА на колонну. Если количество обрабатываемых пластин будет увеличено, например, до 25 штук в час, то все параметры соответственно должны быть изменены в 2,5 раза. Источник электронов должен иметь высокие эмиссионные характеристики при низкой энергии пучка, быть стабильным, когерентным, надежным. В качестве источников электронов предлагается использовать алмазоподобные соединения углерода - фуллерены или нанотрубки.

Для формирования рисунка на большой площади пластины, кроме рассмотренной выше схемы микроколонн (или микропучков [6]), используется также проекционная электронно-лучевая литография. Существуют два типа проекционных систем: с сохранением и с уменьшением (редуктированием) изображения. Основным элементом установки первого типа³⁵ (см. рис. 8.16) является освещаемый ультрафиолетовым светом фотокатод, который служит одновременно источником электронов и шаблоном с рисунком той конфигурации, которая должна быть получена на подложке. Фотокатод представляет собой отполированную кварцевую пластину, на поверхность которой нанесена пленка двуокиси титана по рисунку, соответствующему одному из слоев ИС. На эту пленку наносится сплошная пленка палладия толщиной около 0,004 мкм. Выбор этих материалов основан на хорошем поглощении ультрафиолетового света пленкой двуокиси титана и хорошими фотоэмиссионными свойствами палладия. Те участки палладия, которые не защищены двуокисью титана, под действием ультрафиолетового света испускают электроны. Электроны вылетают под разными углами к поверхности, затем ускоряются электрическим полем, фокусируются и направляются на покрытую резистом подложку. Совмещение рисунков, как и для предыдущей установки, производится с помощью реперных знаков, создаваемых в процессе первой литографии [1].

В современных установках используется электростатический прижим пластин, т. к. нарушение их плоскостности приводит к искажению изображения. Еще одним источником погрешности являются рассеянные электроны, которые ускоряются и опять попадают на пластину, снижая контраст изображения.

³⁵ Метод предложен фирмой Westinghouse и опубликован в 1969 г.

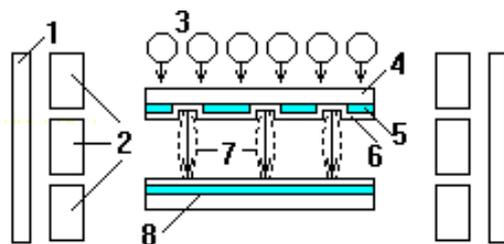


Рисунок 8.16 – Схема технологической камеры установки проекционной электронолитографии:

1 – отклоняющие катушки; 2 – фокусирующие катушки; 3 – ультрафиолетовые лампы осветителя; 4 - кварцевая пластина; 5 – пленка двуокиси титана; 6 - пленка палладия; 7 – траектория электронов; 8 - окисленная пластина кремния с пленкой резиста

В системах редуционного типа специальное электронно-оптическое устройство освещает свободно подвешенную маску и формирует ее уменьшенное изображение на пластине. Развитие метода до некоторого времени сдерживалось следующими основными причинами [6, 7]. Во-первых, абсорбционная маска (основанная на разной поглощающей способности отдельных участков рисунка) сильно нагревается в результате поглощения большой дозы излучения, что ограничивает ускоряющее напряжение проекционных систем. Во-вторых, для уменьшения влияния aberrации необходимо малое апертурное число; при низких энергиях электронов невозможно применение малых числовых апертур из-за снижения глубины фокуса и поля зрения магнитных фокусирующих систем. Кроме того, повышение тока луча, необходимое для увеличения производительности системы, приводит к ухудшению разрешающей способности по причине влияния пространственного заряда.

Понимание ограничений абсорбционной ЭЛЛ привело к появлению новых проекционных систем, одна из которых получила название SCALPEL³⁶ (см. рис. 8.17). Главное отличие новых систем от предыдущих заключается в использовании нового типа масок [6, 7].

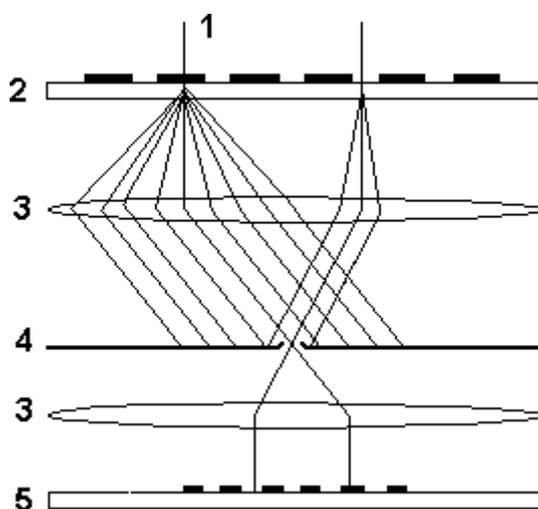


Рисунок 8.17 – Принцип работы проекционной электронно-лучевой системы SCALPEL:

1 - электронный пучок; 2 - рассеивающая маска; 3 - линза; 4 - апертурное окно; 5 – изображение

Маска системы SCALPEL (см. рис. 8.18) представляет собой набор мембран, изготовленных из легких элементов, с высокой проницаемостью для электронов. Сам рисунок образован материалом с высокой отражательной способностью к электронам. Мембраны (толщиной 75 - 150 нм из нитрида кремния) нанесены на решетку (толщина стенок решетки -

³⁶ От английского SCattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography

0,2 мм), вытравленную в кремниевой подложке. На мембрану нанесен рисунок - рассеивающее масочное покрытие (масштаб рисунка 4:1), которое собственно и является шаблоном.

Электронный пучок почти не рассеивается мембраной и рассеивается на угол в несколько миллирадиан слоями W и Cr. Этого рассеяния достаточно, чтобы апертурное окно, расположенное в фокальной плоскости, задержало рассеянные электроны. Результатом этого процесса является высококонтрастное изображение маски, получаемое на поверхности подложки.

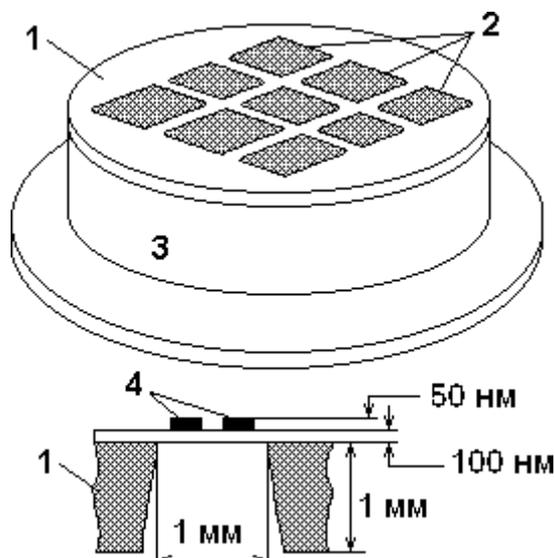


Рисунок 8.18 – Конструкция маски для SCALPEL технологии:

1 – кремниевая пластина (протравленная); 2 – мембраны; 3 – поддерживающее кольцо;
4 – W/Cr рассеиватель

Производительность процесса зависит от тока пучка и чувствительности резиста. Взаимодействие электронов в пучке приводит к его существенной размазке, ограничивая разрешение 35 нм при токе 10 мкА. Следствием некогерентности излучения является отсутствие дифракционных и интерференционных явлений, сохранение линейных зависимостей для всех рабочих параметров при уменьшении размеров элементов до 35 нм. Общий недостаток всех систем электронолитографии состоит в необходимости помещения подложек в вакуум, что в целом усложняет технологический процесс.

8.3.2 Рентгенолучевая литография

Литография рентгеновского диапазона использует длину волны излучения 0,4 - 1,4 нм. В отсутствие необходимой рентгеновской оптики метод основан на проецировании изображения фотошаблона на пластину в масштабе 1:1 (см. рис. 8.19). Негативное изображение рисунка слоя ИС (собственно защитная маска от рентгеновских лучей) создается из пленки золота толщиной около 0,3 мкм, нанесенной, например, на тонкий слой кремния. Золото хорошо поглощает рентгеновские лучи (по сравнению с др. распространенными материалами). Слои кремния толщиной до нескольких микрометров вполне прозрачны для рентгеновского излучения.

Тонкие слои кремния (мембраны) для шаблонов можно изготовить локальным травлением кремниевых пластин в анизотропных травителях. Исходные кремниевые пластины (кристаллографической ориентации (100) и толщиной около 200 мкм) предварительно сильно легируют бором или др. примесями на глубину, равную толщине будущей перемычки. Анизотропные травители подбирают с таким расчетом, чтобы скорость травления сильнолегированных слоев была существенно меньше скорости травления высокоомного кремния. В этом случае процесс травления практически прекратится, когда травитель стравит кремний почти на всю толщину пластины и дойдет до сильнолегированного

слоя. Площадь локально вытравленной области должна соответствовать площади, занимаемой ИС [2].

Резисты, чувствительные к потоку электронов (полиметилметакрилат и др.), чувствительны и к рентгеновским лучам. Время экспонирования большинства резистов рентгеновским излучением составляет до 1 минуты, что ненамного выше, чем в фотолитографии. Соответственно, производительность установок рентгенолитографии близка к производительности фотолитографических установок.

Совмещение рисунков при рентгенолучевой литографии может производиться оптически и с использованием рентгеновского излучения. В первом случае мембрана шаблона должна быть прозрачна для видимого света. Такие мембраны изготавливают нанесением на кремниевые пластины слоев нитрида кремния, нитрида бора, карбида кремния или их многослойных комбинаций с последующим локальным травлением кремния с обратной стороны пластины до вскрытия материала мембраны.

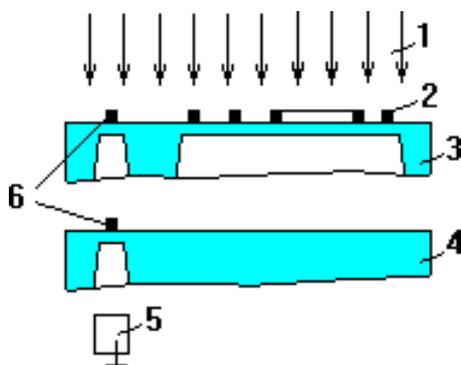


Рисунок 8.19 – Схема рентгенолучевой литографии:

1 – рентгеновское излучение; 2 – рисунок на основе пленки золота; 3 – кремниевая мембрана; 4 – кремниевая подложка; 5 – детектор рентгеновского излучения; 6 – маркерные знаки

Оптическое совмещение производится вне зоны экспонирования. По завершении совмещения скрепленные подложка и шаблон экспонируются. Для совмещения шаблона и подложки с использованием рентгеновского излучения рядом с основными создают дополнительные мембраны, на которых располагают метки совмещения. Снизу подложки под меткой совмещения помещается детектор рентгеновских лучей, с помощью которого можно сформировать сигнал рассогласования (см. рис. 8.19) [2]. Источниками рентгеновского излучения могут служить рентгеновские трубки с электронно-лучевым распылением алюминиевых или медных мишеней [2]. В установках с мишенями из алюминия используется средняя длина волны $\lambda = 0,834$ нм; ускоряющее напряжение составляет не менее 8 кВ. Перспективно использование синхротронного излучения, а также источников аналогичных литографии с экстремальным ультрафиолетом [6]. Наряду с высокой разрешающей способностью рентгенолучевая литография обладает еще рядом достоинств. Одним из них является нечувствительность к загрязнениям, поскольку пылинки и др. инородные частицы на поверхности подложки не поглощают рентгеновского излучения. Кроме того, процесс рентгенолучевой литографии проводится в безвакуумной среде, на более простом и дешевом оборудовании, чем при электронно-лучевой литографии.

8.3.3 Ионная литография

Потоки ионов различных газов, например водорода, азота, неона, аргона, ускоренных до энергий 60 - 100 кэВ, могут приводить к перестройке молекулярной структуры и изменению химических свойств резистов. Главным достоинством ионных пучков является малое обратное рассеяние, а следовательно, минимальный эффект близости. В отличие от ЭЛЛ, нет необходимости в использовании очень тонких слоев резиста для улучшения разрешающей способности. Возможность увеличения толщины резиста до 1 мкм и более приводит к

снижению плотности дефектов (проколов в слое резиста) и, соответственно, к повышению вероятности выхода годных ИС [2, 7].

Экспонирование осуществляют либо фокусированным, либо коллимированным пучком ионов. Фокусированные пучки используются для рисования непосредственно по пластине элементов с размерами менее 20 нм. Поскольку процесс занимает много времени, использование его в массовом производстве неприемлемо.

Ионно-пучковые проекционные установки сочетают в себе высокие разрешающую способность и производительность. Длина пробега легких ионов (водорода, гелия) при энергиях 50 - 100 кэВ лежит в том же интервале, что и типично используемая в технологическом процессе толщина резистов. При чувствительности резиста $10^{12} - 10^{13}$ ион/см² необходимо менее 1 секунды для экспонирования площадки от 10 до 100 мм² [6].

Шаблон может представлять собой кремниевую мембрану, на которой из пленки золота создается рисунок маски, защищающей от потока ионов. Толщина пленки золота составляет около 0,7 мкм. Совмещение достигается путем детектирования обратно рассеянных ионов (от специально изготавливаемых реперных меток) [2]. Изменением состава ионов в пучках можно полностью сформировать структуру ИС, используя пучки ионов элементов III и V групп периодической системы для легирования внедрением, а ионные пучки газов для литографии. Ионы также могут использоваться в безрезистивных процессах, когда происходит прямая модификация поверхности. На подложках различных типов под действием ионного облучения могут образовываться островки магнитных материалов, массивы квантовых точек или волнообразный рельеф [7].

9 МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

9.1 Сущность проектирования интегральных схем

Процесс проектирования ИС включает следующие основные этапы³⁷: 1) составление технических требований; 2) выбор физической структуры; 3) разработка принципиальной электрической схемы; 4) разработка конструкции и топологии; 5) оформление документации.

На первом этапе анализируют техническое задание и составляют технические требования - к электрическим параметрам ИС, надежности и др.

Второй этап предполагает выбор структуры и электрофизических параметров подложки, формулирование требований к электрофизическим параметрам слоев, определение геометрических и электрических параметров активных элементов ИС. Толщины и электрофизические параметры слоев ИС определяют из требований, предъявляемых к основным структурам (транзисторам и др. активным элементам), – с учетом возможностей типового технологического процесса изготовления ИС. Для проектирования остальных (пассивных) элементов используются слои основных структур. Если выработанные требования к параметрам подложки и слоев не удовлетворяются базовым технологическим процессом, то в его режимы вносят соответствующие коррективы.

Разработка принципиальной электрической схемы ИС осуществляется в соответствии с техническими требованиями, с учетом технологических возможностей и ограничений. В качестве исходных данных используются электрические параметры активных элементов, определенные на предыдущем этапе. При необходимости указанные параметры могут быть скорректированы или уточнены.

Основной этап проектирования ИС – разработка топологии – производится в следующей последовательности [2]: 1) получение и согласование исходных данных; 2) расчет

³⁷ Николаев И.М., Филинюк Н.А. Интегральные микросхемы и основы их проектирования. - М.: Радио и связь, 1992. - 424 с

геометрических размеров элементов; 3) разработка эскиза топологии; 4) разработка предварительного варианта топологии; 5) оценка качества и оптимизация топологии.

Исходными данными являются принципиальная электрическая схема, а также технологические и конструктивные требования и ограничения. По принципиальной электрической схеме определяют перечень активных и пассивных элементов, формулируют требования к отдельным элементам. К конструктивным исходным данным относят порядок расположения на кристалле контактных площадок и предполагаемая конструкция корпуса. Выбор корпуса определяется необходимым числом выводов, размером кристалла и назначением ИС.

При разработке топологии необходимо учитывать точность технологических операций, определяющих геометрические размеры элементов (изготовления фотошаблонов, совмещения фотошаблонов с рисунком на подложке, травления окон в диэлектрической пленке и т. п.). Послойные чертежи входят в комплект конструкторско-технологической документации. Информация о топологии ИС может быть представлена также на магнитном носителе. Разработанная документация позволяет изготовить комплект эталонных фотошаблонов для производства ИС.

Заканчивается процесс проектирования изготовлением опытной партии ИС и их исследованием (проверка электрических параметров, оценка надежности, проведение механических и климатических испытаний и т. д.). Если в результате исследований выяснится, что изготовленные ИС не удовлетворяют требованиям технического задания, то после анализа причин несоответствия производят коррекцию того или иного этапа проектирования.

«Ручное» проектирование ИС с числом элементов около 104 ($K = 4$) требует более одного человеко-года, что не может устраивать ни разработчиков, ни потребителей: необходима автоматизация проектирования ИС. Компьютерное проектирование ИС указанной сложности занимает уже около семи человеко-дней [2].



Рисунок 9.1 – Взаимосвязь моделирования и оптимизации технологии изготовления, активных элементов и ИС

В компьютерном многоуровневом проектировании ИС [18] используются *технологические, физико-топологические, электрические, фрагментные* модели полупроводниковых структур (см. рис. 9.1). Для разработки топологии ИС используются геометрические и точечные модели элементов [2]. Простейшая геометрическая модель представляет собой прямоугольник, накрывающий элемент, с указанными на нем местами выводов. В точечных моделях элемент представляется в виде точки с исходящими из нее выводами; фиксируется только количество, либо и количество, и порядок следования выводов.

В комплекте документации на ИС должна содержаться полная информации об ее технологии изготовления, конструкции, назначении, нормах на параметры, режимах

испытаний и др. Упрощение конструирования достигается автоматизацией выпуска конструкторской документации.

Каждый тип ИС имеет свои особенности конструирования, которые определяются, в основном, используемой элементной базой и технологией изготовления.

9.2 Технологические модели

Технологические модели служат для анализа и оптимизации параметров процесса изготовления ИС. В частности, с помощью технологических моделей определяют результирующий профиль распределения примесей в полупроводниковых структурах ИС на основе технологических параметров процессов имплантации, диффузии и др.

Например, процесс диффузии примесей в полупроводник в одномерном приближении описывается уравнениями (5.1), (5.2). Результирующее распределение примесей зависит от технологических параметров – температуры, входящей в (5.1), времени диффузии, которое учитывается в отрезке интегрирования (5.2), концентрации диффузанта, учитываемой в краевых условиях – распределении концентрации $N(0, x)$ в начальный момент времени $t = 0$ и зависимости поверхностной концентрации $N_0 = N(t, 0)$ от времени при $x = 0$. Если задано желаемое распределение N_K в момент T_K окончания всех термических операций, то технологическую модель можно использовать для решения задачи оптимизации технологического процесса как задачи минимизации функционала³⁸:

$$\sigma = \int_0^h [N(T_K, x) - N_K]^2 dx,$$

где h – глубина слоя, в котором создается требуемый концентрационный профиль.

Концентрационные профили вместе с основными электрофизическими параметрами исходного полупроводникового материала (такими как время жизни неравновесных носителей заряда, плотность поверхностных состояний, подвижность носителей и т. д.) и топологией элементов ИС являются исходной информацией для физико-топологического моделирования полупроводниковых структур [2].

9.3 Физико-топологические модели

Физико-топологические модели определяют статику и динамику поведения подвижных носителей заряда в полупроводниковых структурах, характеризуются параметрами, связанными с геометрией и электрофизическими параметрами слоев и описываются дифференциальными уравнениями в частных производных [17, 18]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} j_p + g_p; \quad (9.1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} j_n + g_n; \quad (9.2)$$

$$j_p = q(-\mu_p p \operatorname{grad} U - D_p \operatorname{grad} p); \quad (9.3)$$

$$j_n = q(-\mu_n n \operatorname{grad} U - D_n \operatorname{grad} n); \quad (9.4)$$

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} U = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (9.5)$$

где q – заряд электрона;

j_p и j_n – плотности дырочного и электронного токов;

p и n , g_p и g_n , μ_p и μ_n , D_p и D_n – концентрации, скорости процессов генерации – рекомбинации, подвижности, коэффициенты диффузии дырок и электронов, соответственно;

E – вектор напряженности электрического поля;

ρ – плотность объемного заряда;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

При полной ионизации атомов примесей

³⁸ Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. - М.: Высш. школа, 1980.

$$\rho = q(p - n + N_D - N_A),$$

где N_D, N_A – концентрации доноров и акцепторов.

Уравнения (9.1) и (9.2) являются уравнениями непрерывности для дырок и электронов. Физический смысл каждого из этих уравнений следующий: изменения концентрации подвижных носителей заряда в элементе объема определяются генерацией - рекомбинацией носителей и разностью количеств носителей приходящих в объем и уходящих из него в единицу времени. При этом преобладанию генерации носителей над рекомбинацией соответствует положительная скорость g , а обратной ситуации – отрицательная.

Уравнения переноса (9.3) и (9.4) отражают наличие в полупроводнике как дрейфового тока, вызванного электрическим полем, так и диффузионного тока, обусловленного градиентом концентрации по объему полупроводника.

Уравнение Пуассона (9.5) описывает изменения напряженности электрического поля при наличии объемных зарядов.

Дополненные соответствующими краевыми условиями уравнения (9.1) – (9.5) представляют собой наиболее общую из применяемых на практике физико-топологических моделей полупроводниковых структур. Краевые условия состоят из начальных условий, характеризующих распределение зависимых переменных по объему кристалла в начальный момент времени $t = 0$, и граничных условий, задающих значения зависимых переменных на границах рассматриваемой полупроводниковой области.

Для скорости генерации – рекомбинации носителей заряда, инжектируемых в полупроводник, можно использовать выражение [17]:

$$g = g_n = g_p = \frac{pn - p_0n_0}{\tau_p(n+n_1) + \tau_n(p+p_1)},$$

где p_0 и n_0 – равновесные концентрации, τ_p и τ_n – времена жизни дырок и электронов в объеме полупроводника;

$n_1 = n_i \exp(U_1/U_T)$, n_i – собственная концентрация, U_1 находится в пределах $0,1 \div 0,3$ В, $U_T = kT/q$ – температурный потенциал, k – постоянная Больцмана, T – температура; $p_1 = n_i^2/n_1$. При низких уровнях инжекции дырок в n-полупроводник, т. е. при выполнении условия $n \gg p$ и $n = n_0$, имеем

$$g = \frac{p-p_0}{\tau_p},$$

а для электронов, инжектированных в p-полупроводник,

$$g = \frac{n-n_0}{\tau_n}.$$

Подвижности носителей заряда являются функциями напряженности электрического поля E и концентрации легирующей примеси N . В моделях полупроводниковых структур используется та или иная аппроксимация зависимостей μ_p и μ_n от E и N [18].

Перед решением система (9.1) – (9.5) обычно преобразуется. Наиболее очевидное преобразование имеет целью сокращение числа переменных и сводится к исключению плотностей токов j_p и j_n с помощью уравнений переноса из уравнений непрерывности и Пуассона:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{1}{q} \operatorname{div} (\mu_p p E - D_p \operatorname{grad} p) + g_p; \\ \frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{1}{q} \operatorname{div} (\mu_n n E - D_n \operatorname{grad} n) + g_n; \\ \operatorname{div} \operatorname{grad} U &= -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}. \end{aligned} \quad (9.6)$$

В системе уравнений (9.6) искомыми переменными являются концентрации носителей p и n и напряженность электрического поля E ; вместо E может фигурировать потенциал U , т. к. $E = -\operatorname{grad} U$.

Зачастую при анализе полупроводниковых структур используют такое преобразование уравнений, при котором от совокупности переменных p , n и U переходят к системе безразмерных переменных Φ_p , Φ_n и F , определяемых следующим образом:

$$\begin{aligned}\Phi_p &= \exp(F_p), \\ \Phi_n &= \exp(-F_n), F = U/U_T,\end{aligned}$$

где F_p и F_n – квазипотенциалы Ферми для дырок и электронов, которые выражаются через прежние переменные p , n и U :

$$\begin{aligned}F_p &= F + \ln(p/n_i), \\ F_n &= F - \ln(n/n_i).\end{aligned}$$

Подстановка новых переменных Φ_p , Φ_n и F вместо p , n и U в уравнения (9.1) – (9.5) в стационарном случае приводит к системе уравнений

$$\begin{aligned}\operatorname{div}(\mu_p \exp(-F) \operatorname{grad} \Phi_p) &= -\frac{q}{U_T n_i}; \\ \operatorname{div}(\mu_n \exp(F) \operatorname{grad} \Phi_n) &= -\frac{q}{U_T n_i}; \\ \operatorname{div} \operatorname{grad} F &= \frac{n_i \Phi_n \exp(F) - n_i \Phi_p \exp(-F) + N_D - N_A}{\varepsilon \varepsilon_0 U_T}.\end{aligned}\tag{9.7}$$

Рассмотренные распределенные физико-топологические модели в высшей степени универсальны и могут быть использованы для проектирования самых различных полупроводниковых структур. В принципе они применимы и для анализа ИС в целом. Однако, при современном уровне развития вычислительной техники распределенные задачи столь высокой размерности не могут быть успешно разрешены. В основном распределенные физико-топологические модели полупроводниковых структур используются для определения параметров электрических моделей элементов (моделей на макроуровне). При заданном базовом технологическом процессе изготовления ИС (известны глубины залегания р-п-переходов, поверхностные концентрации примесей, метод изоляции и др.) рассчитываются электрофизические параметры структуры - удельные емкости, напряжения пробоя, обратные токи переходов, удельные сопротивления слоев, геометрические размеры и параметры элементов. Однако, и в этих случаях используют различные способы упрощения физико-топологических моделей, поскольку решение трехмерной нестационарной задачи (9.1) – (9.5) или стационарной (9.7) весьма трудоемко даже для простейших полупроводниковых структур³⁹.

Первый способ упрощения задач – переход к одно- или двумерным моделям. Так для структуры интегрального транзистора (см. рис. 1.3) характерны большие размеры областей в плоскости кристалла по сравнению с размерами в вертикальном направлении (на рис. 1.3 вертикальные размеры увеличены по сравнению с горизонтальными). Поэтому при расчете распределения концентрации носителей в вертикальном направлении допустимо одномерное приближение. При анализе электрических процессов в таких областях как база или коллектор транзистора допустимо рассчитывать поля потенциалов и горизонтальных токов с помощью двумерных моделей. Многие электрические параметры транзисторов, такие как тепловые токи, статические коэффициенты усиления, сопротивления тел базы и коллектора, могут быть определены в статических режимах. Для анализа этих режимов вместо нестационарной модели используется более простая стационарная модель.

Второй способ упрощения задач основан на идее макромоделирования. Макромодели могут быть получены для некоторых типовых структур или для отдельных участков структур полупроводниковых элементов в результате приближенного аналитического решения уравнений, входящих в исходную систему (9.1) – (9.5). Использование макромоделей отдельных участков полупроводниковой структуры, прежде всего участков с заметными перепадами концентраций, потенциалов и др. переменных, существенно облегчает численное решение уравнений (9.1) – (9.5) для оставшихся областей, делает приемлемыми затраты

³⁹ Трехмерное численное моделирование субмикронных тонкослойных сильнолегированных полупроводниковых структур сопряжены с вычислительными ресурсами, сравнимыми или превосходящими ресурсы при решении задач точного прогнозирования погоды или проектирования авиалайнеров [2].

машинного времени на решение таких задач, как оптимизация или статистический анализ активных элементов ИС, в частности транзисторов.

9.4 Электрические модели

Электрические (функциональные) модели полупроводниковых структур используются для расчета характеристик всей ИС или фрагментов ИС (фрагментные модели). Модель ИС получают объединением моделей, входящих в нее элементов: транзисторов, диодов, резисторов и т. д. В ЭВМ вводят описание модели разрабатываемой схемы, т. е. ее математическое представление, а затем исследуют реакцию и чувствительность схемы к изменению отдельных параметров и окружающих условий. Точность машинного расчета характеристик любой ИС полностью определяется точностью используемых моделей элементов.

По степени универсальности электрические модели разделяют на статические и динамические, для малого и большого сигналов, низкочастотные и высокочастотные. Для любого элемента такое деление позволяет организовать иерархический ряд моделей, отличающихся вычислительными затратами и допускающими переход от одной модели к другой в процессе моделирования. Очевидно, что наиболее точной и универсальной в таком ряду является динамическая высокочастотная модель большого сигнала⁴⁰.

Структуру электрической модели обычно представляют эквивалентной схемой (схемой замещения). Внутренние параметры определяются на основе физико-топологических моделей. Электрические параметры элементов можно измерить также с помощью так называемых тестовых структур. Однако, такое измерение сопряжено с рядом трудностей, основные из которых следующие [18]: большая погрешность методов измерения, связанная с влиянием на параметры нагрузки измерительных устройств; наличие паразитных эффектов, обусловленных токами утечки, влиянием электрических зарядов, локализованных в диэлектрических пленках и др.; невозможность измерения параметров на выводах каждого элемента ИС.

Различают формальные и физические эквивалентные схемы (модели). Формальные схемы не связаны с процессом, лежащим в основе действия структуры, и фактически иллюстрируют уравнения четырехполюсника. Физические эквивалентные схемы состоят из элементов, отражающих физическую природу явлений в данной структуре.

Например, при построении физических эквивалентных схем биполярных транзисторов учитываются процессы инжекции, экстракции, рекомбинации, перемещения носителей заряда, а также модуляция толщины базы, собственные шумы в структуре и др. Простейшей статической моделью биполярного транзистора является модель Эберса-Молла [17]: два диода и два источника тока включены навстречу друг другу (см. рис. 9.2, а). Источники тока управляются токами диодов, сами диоды считаются идеальными, а их характеристики имеют вид

$$I_{ЭД} = I_{Э0} \left[\exp \left(\frac{qV_{ЭБ}}{kT} \right) - 1 \right],$$

$$I_{КД} = I_{К0} \left[\exp \left(\frac{qV_{КБ}}{kT} \right) - 1 \right],$$

где $I_{Э0}$ и $I_{К0}$ – соответственно токи насыщения диодов, смещенных – при нормальном включении транзистора - в прямом и обратном направлении.

Внешние токи транзистора:

$$I_{Э} = I_{ЭД} - \alpha_i I_{КД},$$

$$I_{К} = I_{КД} - \alpha_n I_{ЭД},$$

$$I_{Б} = -(1 - \alpha_n) I_{ЭД} - (1 - \alpha_i) I_{КД},$$

⁴⁰ Автоматизация схемотехнического проектирования / Под ред. В.Н.Ильина. – Москва: Радио и связь, 1987. – 368 с.

где α_n и α_i – соответственно прямой и инверсный коэффициенты усиления транзистора в схеме с общей базой.

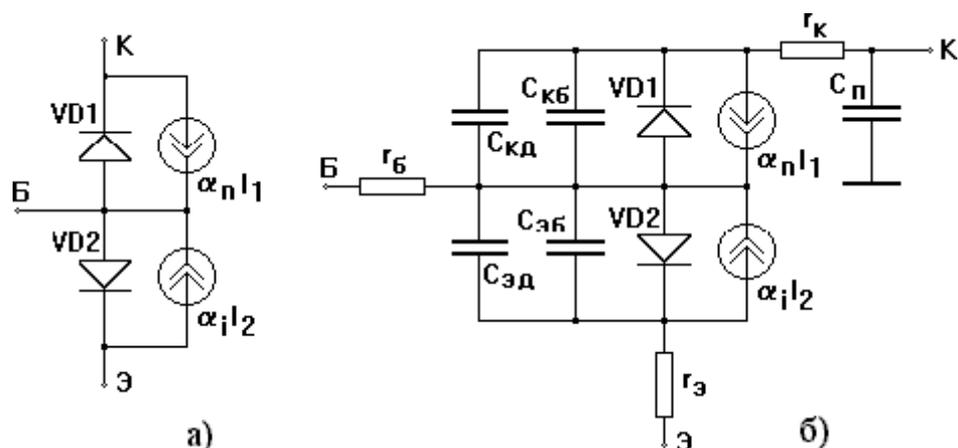


Рисунок 9.2 – Эквивалентные схемы основной модели Эберса - Молла (а) и нелинейной динамической модели интегрального транзистора (б)

Рассмотренные формулы устанавливают взаимосвязь между внешними токами и приложенными к переходам напряжениями в статическом режиме. Нелинейная динамическая модель интегрального транзистора (см. рис. 9.2, б) учитывает барьерные и диффузионные емкости эмиттерного, коллекторного и изолирующего переходов, а также омические сопротивления между активной областью транзистора и выводами коллектора, эмиттера и базы. При анализе функционирования ИС на малом переменном сигнале используются линейные модели (эквивалентные схемы) транзисторов и др. нелинейных элементов; параметры таких моделей определяются линеаризацией характеристик элемента в рабочей точке.

Для интегральных транзисторов с малыми геометрическими размерами и малыми глубинами залегания р-п-переходов (менее 0,3 – 0,5 мкм), в которых существенную роль играют эффекты вытеснения тока эмиттера, поверхностной рекомбинации и накопления заряда в пассивных областях, используются более сложные двумерные (секционные) модели [18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вендик О.Г. Курс «Микроэлектроника» для бакалавров. – URL: <http://www.1024.ru> (дата обращения: 20.04.2019). – Режим доступа: свободный.
2. Березин, А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С. Березин, О.Р. Мочалкина. - Москва: Радио и связь, 1992. – 320 с.
3. Черняев, В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В.Н. Черняев. - Москва: Радио и связь, 1987. – 464 с
4. Романовский М.Н. Технологические процессы микроэлектроники / М.Н. Романовский. – Томск: ТУСУР, 2002. – 190 с.
5. Драгунов В.П. Основы нанoeлектроники / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. – Новосибирск: НГУ, 2000. – 332 с.
6. Чурилов А.Б. Введение в нанoeлектронику/ А.Б. Чурилов. – Ярославль: ЯГТУ, 2002. – 132 с.
7. NanoTechnologies – URL: <http://irina1.netfirms.com> (дата обращения: 20.04.2019). – Режим доступа: свободный.
8. Кравченко А.Ф. Физические основы функциональной электроники: Учебное пособие / А.Ф. Кравченко. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 444 с.

9. Шука А. Электроника четвертого поколения - функциональная элетроника? – URL: <http://www.chipnews.ru> (дата обращения: 20.04.2019). – Режим доступа: свободный.
10. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия / М. Шур. – Москва: Мир, 1991. - 632 с.
11. Технология СБИС: В 2-х кн. / под ред. С. Зи. – Москва: Мир, 1986. Кн. 1, 2 – 857 с.
12. Данилина Т.И. Ионно-плазменная технология в производстве СБИС / Т.И. Данилина, С.В. Смирнов. – Томск: ТУСУР, 2000. – 140 с.
13. Иванов-Есипович Н.К. Технология микросхем / Н.К. Иванов-Есипович. – Москва: Высш. шк., 1972. – 256 с.
14. Технология тонких пленок: В 2-х т. / под ред. Л. Майселла и Р. Глэнга.– Москва: Сов. радио, 1977. Т. 1, 2 – 1432 с.
15. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки / М. Херман. – Москва: Мир, 1989. – 240 с.
16. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника/ А.Н. Пихтин. – Москва.: Высш. шк., 2001. – 573 с.
17. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах / Зи С. – Москва.: Мир, 1984. Кн. 1, 2 – 912 с.
18. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем / А.Н. Бубенников. – Москва: Высш. шк., 1989. – 320 с.