

Федеральное агентство по образованию

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Кафедра физической электроники**

**Т.И. Данилина, К.И. Смирнова**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Технология ЭВС – 1**

**Учебное пособие**

**2005**

Корректор: Осипова Е.О.

**Данилина Т.И., Смирнова К.И.**

Технологические процессы микроэлектроники: Технология ЭВС – 1:  
Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2005. – 223 с.

© Данилина Т.И., Смирнова К.И., 2005  
© Томский межвузовский центр  
дистанционного образования, 2005

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ.....	6
2 ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ .....	7
2.1 Фотолитография .....	7
2.2 Способы экспонирования .....	14
2.3 Фотошаблоны и технология их получения .....	18
2.4 Методы и технология формирования рисунка интегральных микросхем .....	31
3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛЕНОЧНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....	37
3.1 Термическое испарение в вакууме.....	37
3.1.1 Вакуумные напылительные установки.....	37
3.1.2 Формирование молекулярного потока.....	38
3.1.3 Испарение вещества .....	39
3.1.4 Скорость конденсации.....	42
3.1.5 Механизм испарения соединений и сплавов.....	47
3.1.6 Способы испарения.....	50
3.1.7 Практические рекомендации .....	58
3.2 Ионно-плазменное распыление.....	61
3.2.1 Физика ионного распыления.....	61
3.2.2 Модель ионного распыления .....	64
3.2.3 Скорость осаждения пленок .....	72
3.2.4 Получение пленок ионно-плазменным распылением....	73
4 ЭЛЕМЕНТЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ .....	78
4.1 Подложки пленочных ИМС .....	78
4.1.1 Материалы подложек .....	78
4.1.2 Свойства подложечных материалов.....	80
4.1.3 Очистка подложек.....	84
4.2 Тонкопленочные резисторы .....	86
4.2.1 Выбор материалов.....	86
4.2.2 Технологические погрешности резисторов.....	89
4.3 Тонкопленочные конденсаторы .....	93
4.3.1 Параметры тонкопленочных конденсаторов.....	93
4.3.2 Диэлектрические материалы.....	96

4.3.3 Выбор материала обкладок .....	97
4.4 Тонкопленочные индуктивности .....	98
4.5 Проводники и контактные площадки .....	100
5 ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИМС .....	105
6 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС .....	115
6.1 Структуры элементов полупроводниковых ИМС .....	115
6.2 Выбор материала подложек полупроводниковых ИМС ....	119
6.3 Технологические особенности изготовления полупроводниковых ИМС .....	122
7 ЛЕГИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ .....	123
7.1 Легирование полупроводников диффузией .....	123
7.2 Расчет режимов диффузии .....	130
7.3 Расчет профилей распределения примеси .....	139
7.4 Технология получения диффузионных <i>p – n</i> -переходов .....	141
7.5 Контроль параметров диффузионных слоев .....	144
7.6 Ионное легирование полупроводников .....	146
8 ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ .....	153
8.1 Эпитаксия химическим осаждением из газовой фазы ....	153
8.2 Молекулярно-лучевая эпитаксия .....	160
9 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК .....	164
9.1 Диэлектрические слои для полупроводниковых ИМС ...	164
9.2 Термическое окисление кремния .....	164
9.3 Химическое осаждение диэлектрических пленок .....	171
10 МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР	173
11 ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС .....	176
11.1 Классификация процессов .....	176

11.2 Изготовление биполярных ИМС с изоляцией $p-n$ -переходом .....	181
11.3 Изготовление биполярных ИМС с диэлектрической изоляцией.....	187
11.4 Изготовление биполярных ИМС с комбинированной изоляцией.....	189
11.5 Изготовление МДП ИС .....	192
12 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ .....	200
12.1 Методические указания к выполнению контрольных работ.....	200
12.2 Контрольная работа №2 .....	207
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	219
ЛИТЕРАТУРА.....	220
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	221
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	222
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	223

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Технологические процессы микроэлектроники» предназначено для студентов специальности 220500 «Конструирование и технология электронно-вычислительных средств» и представляет собой конспект лекций по аналогичному курсу по учебному плану набора 1997 года и по дисциплине «Технология ЭВС», ч.1 по учебному плану набора 2001 года.

Цель преподавания дисциплины – ознакомление студентов с современным производством интегральных схем. В результате освоения дисциплины студенты должны знать основы технологических процессов, используемых при производстве интегральных схем, основные технологические методы и приемы, их сравнительные характеристики, а также связь параметров технологических режимов с выходными параметрами интегральных схем. Студенты должны уметь построить технологический маршрут, обосновать выбор параметров каждой технологической операции. В качестве базы студенты используют знания, полученные при изучении физики, химии, математики, материалов электронной техники, физических основ микроэлектроники и др.

В учебном пособии рассмотрены методы получения рисунка интегральных схем, технологические основы пленочной микроэлектроники, элементы тонкопленочных интегральных схем (разделы 1–5). Конструктивные технологические особенности и элементы полупроводниковых интегральных схем, технология эпитаксии, легирования, окисления и металлизации, а также типовые технологические процессы изготовления полупроводниковых ИМС представлены в разделах 6 – 11. Разделы 1 – 5, 7.6 написаны доцентом Данилиной Т.И., разделы 6 – 11 – доцентом Смирновой К.И.

## 2 ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

### 2.1 Фотолитография

Получение рельефа требуемой конфигурации в диэлектрических и металлических пленках, нанесенных на поверхность полупроводниковых или диэлектрических подложек, является неотъемлемым процессом технологии изготовления интегральных схем (ИС). Он получил название **литографии**. Литография основана на использовании особых высокомолекулярных соединений – резистов, обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного рода излучений – ультрафиолетового (фотолитография), рентгеновского (рентгенолитография), потока электронов (электронолитография) и ионов (ионно-лучевая литография).

**Фотолитография** состоит в следующем. Чувствительные к свету соединения **фоторезисты** (ФР) наносятся на поверхность подложки и подвергаются воздействию излучения (**экспонируются**). Использование специальной стеклянной маски с прозрачными и непрозрачными полями **фотошаблона** (ФШ) приводит к локальному воздействию излучения на ФР и, следовательно, к локальному изменению его свойств. При последующем воздействии определенных химикатов происходит удаление с подложки отдельных участков пленки ФР, освещенных или неосвещенных в зависимости от типа ФР (**проявление**). Создается защитная маска с рисунком, повторяющим рисунок фотошаблона. Резисты могут быть как негативными, так и позитивными. После воздействия экспонирующего облучения растворимость негативных резистов в проявителе уменьшается, а позитивных увеличивается (рис. 2.1).

Фоторезисты – это светочувствительные материалы с изменяющейся под действием света растворимостью. Фоторезисты обычно состоят из трех компонентов:

- **светочувствительных веществ;**
- **пленкообразующих веществ;**
- **растворителей.**

В **негативных** ФР под действием света протекает реакция фотоприсоединения (фотополимеризации). При **фотополимери-**

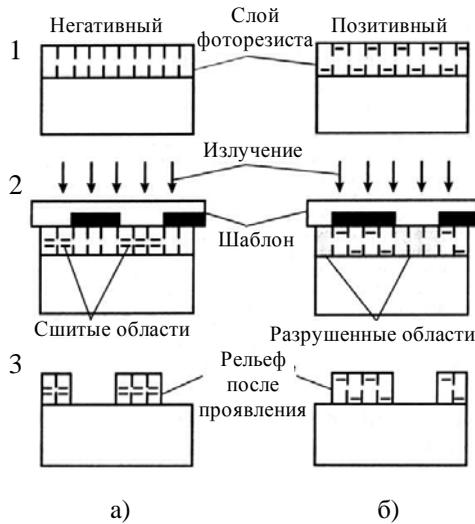


Рис. 2.1 – Схемы процесса фотолитографии с негативным (а) и позитивным (б) фоторезистами

**зации** происходит поперечная сшивка молекул полимера, в результате чего они укрупняются, становятся трехмерными, и их химическая стойкость возрастает. В негативных ФР на основе поливинилциннаматов (ПВЦ) полимерной основой является эфир поливинилового спирта, с молекулами которого связана коричневая кислота, представляющая собой светочувствительный компонент (циннамоильная группа). В структуре коричневой кислоты имеются группы с относительно малой энергией связи  $\Delta H$ . При воздействии света с энергией кванта  $h\nu \geq \Delta H$  происходит разрыв связей между молекулами ПВЦ. В результате исходные молекулярные цепочки ПВЦ образуют трехмерную структуру. Интенсивное поглощение света фоторезистом на основе ПВЦ, приводящее к образованию трехмерной структуры, начинается с длины волны  $\lambda$  менее 320 нм. Граница поглощения сдвигается в сторону более длинных волн (360–410) нм при добавлении сенсibilизатора.

Фоторезисты на основе ПВЦ имеют удовлетворительную кислотостойкость, но они не выдерживают воздействия концен-

трированной плавиковой кислоты. Повышенной кислотостойкостью обладают негативные ФР на основе каучуков с различными добавками. Каучуки не являются светочувствительными веществами, поэтому в состав ФР вводят светочувствительные диазосоединения. Под действием света молекула диазосоединения разлагается с потерей молекулы азота, образуя новые вещества – нитрены, которые вступают в реакцию с макромолекулами каучука. В результате образуется стойкая трехмерная структура.

В **позитивных** ФР под действием света образуются растворимые соединения (**фоторазложение**). Для осуществления этой задачи удобно использовать смеси нафтохинондиазидов (НХД) с фенолформальдегидными смолами в органических растворителях. Светочувствительной основой является НХД, а смола играет роль химически стойкого полимера. В результате облучения и разрыва связей образуется инденкарбоновая кислота. Для завершения деструкции и перевода кислоты в растворимую соль необходимо воздействовать на нее проявителем со щелочными свойствами. При этом проявитель должен растворять и полимерную основу. Необлученные молекулы НХД затрудняют, но не исключают полностью растворение основы в щелочных растворителях на неэкспонированных участках.

Важным компонентом ФР являются растворители, от которых зависят стабильность жидких растворов, характеристики нанесения и качество слоя ФР и др.

Основными параметрами ФР являются **светочувствительность, разрешающая способность, химическая стойкость** к травителям [1, 2]. Светочувствительность  $S$  – это величина, обратная экспозиции, т.е. количеству световой энергии, необходимой для облучения ФР, чтобы перевести его в нерастворимое (негативный ФР) или растворимое (позитивный ФР) состояние

$$S = \frac{1}{H} = \frac{1}{(Et)},$$

где  $H$  – экспозиция (доза облучения);

$E$  – энергооблученность;

$t$  – длительность облучения (или плотность потока энергии на поверхность фотослоя).

Критерием светочувствительности ФР служит четкость рельефа рисунка в его слое после проведения процессов экспонирования и проявления. При этом рельеф рисунка должен иметь резко очерченную границу между областями удаленного и оставшегося на поверхности подложки слоя ФР.

**Негативный ФР** можно рассматривать как фоточувствительный материал с эффективной пороговой энергией  $E_n$ . Если энергия фотонов  $E$ , падающих на резист, меньше пороговой энергии, то резист удаляется в процессе проявления. Если же  $E > E_n$ , то резист становится нерастворимым в проявителе и получающееся изображение действует как защитная маска. Величина  $E_n$  зависит от многих факторов: типа ФР, толщины ФР, материала подложки и др. Приблизительная оценка  $E_n$  может быть получена из характеристической кривой резиста – зависимости глубины проявления от энергии экспонирования или экспозиции  $H$  (рис. 2.2). Характеристическая кривая представляет собой зависимость отношения толщины полимеризованной пленки  $d_s$  к ее исходной толщине  $d_0$  от  $\lg H$  [2]. Интенсивные фотохимические реакции для негативного ФР начинаются при экспозиции  $H_1$ , что соответствует пороговой чувствительности ФР  $S_n = 1/H_1$ . При величинах энергии, превышающих пороговое значение в 2–3 раза растворяется очень незначительная часть пленки негативных ФР. В качестве критерия светочувствительности  $S_0$  была выбрана  $d$ , составляющая

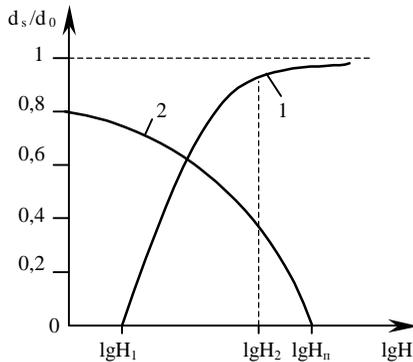


Рис. 2.2 – Характеристические кривые для негативных (1) и позитивных (2) ФР

90 % от исходной толщины. Это соответствует экспозиции  $H_2$  и  $S_0 = 1/H_2$ .

В соответствии с законом Бугера-Ламберта интенсивность света, а, следовательно, и экспозиция уменьшается с увеличением глубины проникновения энергии в ФР, т.е. по экспоненциальному закону

$$H_d = H_0 \exp(-\mu d),$$

где  $H_0$  – экспозиция на поверхности ФР;

$\mu$  – коэффициент поглощения энергии материалом ФР, зависящий от длины волны экспонирующего излучения;

$d$  – глубина проникновения энергии в ФР.

Экспозиция на поверхности фоторезиста, при которой он прорабатывается на глубину  $d$ , будет равна

$$H_0 = H_d \exp(\mu d),$$

отсюда  $d = (\lg H_0 - \lg H_d) / (\mu \lg e)$ .

Толщина сшитого слоя пропорциональна  $\lg H$ . Последнее уравнение описывает линейный участок характеристической кривой (интервал  $H_1 - H_2$ ). Кривая справедлива только для конкретной марки и толщины ФР.

Позитивный ФР имеет аналогичную характеристическую кривую, но в зеркальном изображении (см. рис. 2.2). Растворимость позитивного резиста в проявителе имеется даже при нулевом значении  $H$ . При увеличении энергии она значительно возрастает до тех пор, пока при некотором пороговом значении  $H_n$  не наступит полная растворимость. При экспонировании позитивного фоторезиста необходимо облучение с большей энергией (большее время экспонирования), чем для негативного фоторезиста. Следовательно, эффективность экспонирования позитивного ФР меньше по сравнению с эффективностью экспонирования негативного ФР.

Более полную информацию о поведении позитивного фоторезиста дает зависимость скорости проявления  $V_{np}$  от экспозиции, представленная на рис. 2.3. Для позитивного фоторезиста важно, чтобы время проявления облученных участков в щелочном растворе было минимальным. Поскольку скорость раство-

рения облученных участков зависит от концентрации образующейся при фотолизе инденкарбоновой кислоты, зависимость  $V_{пр}$  от экспозиции позволяет оценить чувствительность фоторезиста [2]. Она определяется при  $H_2$ , когда скорость проявления достигает максимума  $S_0 = 1/H_2$ .

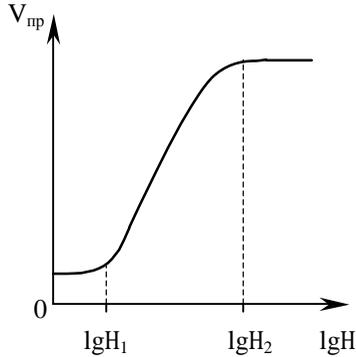


Рис. 2.3 – Зависимость скорости проявления позитивного ФР от экспозиции

Таким образом, критерием светочувствительности **негативного** ФР является образование после экспонирования и проявления на поверхности подложки локальных полимеризованных участков – рельефа рисунка. Критерием  $S$  позитивного ФР является полнота разрушения и удаления с поверхности подложки локальных участков слоя ФР после экспонирования и проявления и образование рельефа рисунка.

**Разрешающая способность** характеризует способность ФР к созданию рельефа рисунка с минимальными размерами элементов. Разрешающая способность  $R$  определяется числом линий равной ширины, разделенных промежутками такой же ширины и умещающихся в одном миллиметре. Разрешающая способность определяется путем экспонирования ФР через штриховую миру, которую используют в качестве ФШ. После проявления выделяется участок с различимыми штрихами наименьшей ширины. Разрешающая способность ФР и процесса ФЛ в целом

с уменьшением толщины слоя ФР увеличивается (рис. 2.4). Однако нижний предел толщины слоя ФР обусловлен снижением защитной способности таких слоев. При  $d < 0,2$  мкм возрастает растравливание слоя за счет дефектов пленки на операции проявления. Разрешающая способность для негативных ФР составляет 300 линий/мм, для позитивных ФР она выше – 1500–2000 линий/мм. Для получения изображений элементов с размерами 5–10 мкм необходимо выбирать фоторезист с  $R=500$ –1000 линий/мм. Основные характеристики некоторых позитивных и негативных фоторезистов приведены в [2].

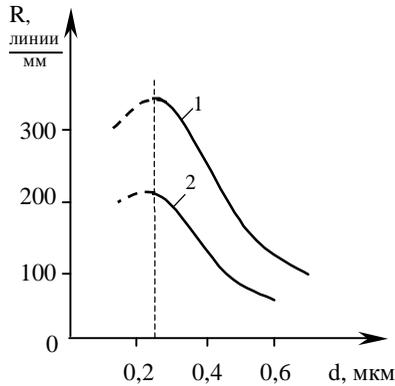


Рис. 2.4 – Зависимость разрешающей способности негативного фоторезиста (1) и фотолитографического процесса в целом (2) от толщины фоторезиста

**Химическая стойкость** – это способность слоя ФР защищать поверхность подложки от воздействия травителя. Критерием стойкости является время, в течение которого ФР выдерживает действие травителя до момента появления таких дефектов, как частичное разрушение, отслаивание от подложки, локальное точечное растравливание слоя или подтравливание его на границе с подложкой. Стойкость ФР к химическим воздействиям зависит от типа ФР, его толщины и др. Поэтому стойкость ФР оценивают величиной бокового подтравивания  $l$  или фактором травления  $K = d/l$ , где  $d$  – глубина травления (рис. 2.5). Чем меньше боковое подтравливание  $l$  при заданной глубине травле-

ния, тем выше стойкость фоторезиста к травителю. На негативном фоторезисте боковой подтрав составляет 1–2 мкм, на позитивном фоторезисте на основе НХД – порядка 0,3–0,4 мкм.

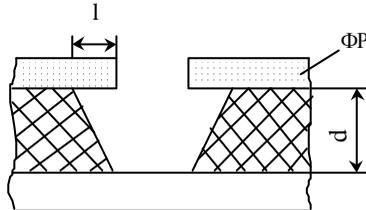


Рис. 2.5 – Боковой подтрав

**Адгезия** – это способность слоя ФР препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру рельефа рисунка элементов. Стабильность свойств ФР характеризуется их сроком службы.

**Выбор толщины фоторезиста** делается, исходя из следующих соображений. Практикой установлено, что **толщина ФР должна быть в 3–4 раза меньше минимального размера рисунка элементов**. С другой стороны, толщина ФР должна быть достаточной, чтобы противостоять действию травителей (кислот и щелочей) и перекрывать локальные дефекты. Таким образом, выбор толщины ФР обусловлен компромиссом между требованием достаточной разрешающей способности и адгезии, с одной стороны, и защитными свойствами, с другой. Обычно толщину ФР выбирают в пределах 0,5–1,5 мкм.

## 2.2 Способы экспонирования

В оптической литографии используется три способа:

- **контактная** фотолитография;
- **бесконтактная** или фотолитография с зазором;
- **проекционная** фотолитография.

При контактной фотолитографии фотошаблон находится в непосредственном контакте со слоем ФР на подложке (рис. 2.6). Для засветки ФР через ФШ используется источник света с требуемой длиной волны.

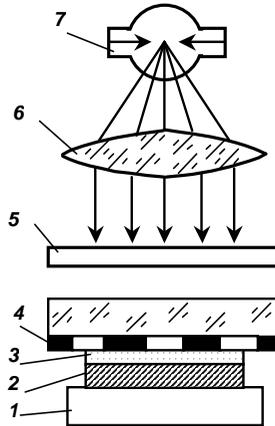


Рис. 2.6 – Схема контактной фотолитографии:  
 1 – предметный столик; 2 – подложка; 3 – слой фоторезиста;  
 4 – фотошаблон; 5 – затвор; 6 – конденсор; 7 – источник света

Конденсорная линза (конденсор) служит для создания равномерного светового потока. Затвор задает дозу экспонирования. На некотором расстоянии от источника света размещается подложка с фотошаблоном. За счет плотного контакта достигаются высокие разрешения. Технологически между ФШ и подложкой будет зазор, обусловленный толщиной ФР, наличием неровностей на подложке, искривлением подложки и др. Кроме того, разрешение зависит от свойств ФР. Рассмотрим особенности прохождения света в негативных и позитивных ФР (рис. 2.7).

При прохождении света наблюдаются дифракция на границе темного и светлого полей на ФШ, рассеяние света в слое ФР и отражение света от подложки. За счет отражения света область негативного ФР полимеризуется и удерживается при проявлении за счет сил сцепления с подложкой. В результате этого в негативных ФР образуется «ореол», ухудшающий разрешающую способность ФР. В позитивных ФР при проявлении вымывается только верхняя часть рисунка, что не влияет на разрешающую способность. Отсюда следует, что разрешающая способность позитивного ФР будет лучше, чем негативного ФР.

Для уменьшения дифракции надо использовать для экспонирования более коротковолновое излучение с  $\lambda=220-260$  нм.

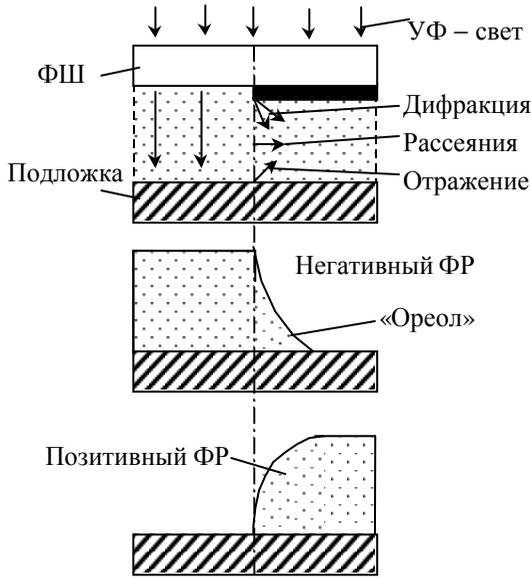


Рис. 2.7 – Прохождение света в негативном и позитивном ФР

Основной недостаток контактной ФЛ состоит в изнашивании ФШ при его многократном использовании. Плотное соприкосновение ФШ с подложкой приводит к возникновению дефектов на соприкасающихся поверхностях как шаблона, так и резиста. Накопление дефектов и частиц ФР, прилипающих к ФШ, приводит к его быстрому износу.

В **бесконтактной** ФЛ во время экспонирования между подложкой и ФШ поддерживается небольшой зазор 10–40 мкм. Этот зазор уменьшает (но не устраняет) возможность повреждения поверхности шаблона. При наличии зазора дифракция света уменьшает разрешающую способность и одновременно ухудшает четкость изображения. Степень этих негативных явлений зависит от величины зазора между ФШ и подложкой, который может быть неодинаковым вдоль пластины. При малых зазорах основным источником искажений являются неровности поверх-

ности подложки (пластины), при больших – эффекты дифракции. Процесс переноса изображения осуществляется в дифракционной области, разрешение в которой определяется как

$$b_{\min} = \sqrt{\lambda h},$$

где  $b_{\min}$  – минимальная ширина линии;

$h$  – величина зазора.

**Проекционная** фотолитография заключается в проектировании изображения ФШ на подложку, покрытую ФР, с помощью проекционного объектива (рис. 2.8).

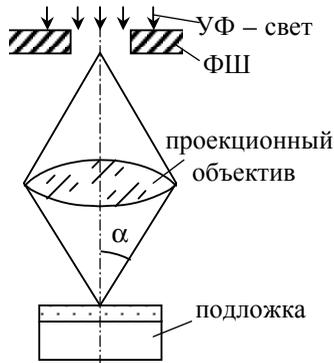


Рис. 2.8 – Перенос изображения в проекционной ФЛ

Качество проекционного объектива характеризует такой параметр, как числовая апертура

$$NA = n \cdot \sin \alpha,$$

где  $n$  – коэффициент преломления среды в пространстве изображения (для воздуха  $n \approx 1$ );

$\alpha$  – половина максимального угла расходимости лучей, приходящих в точку изображения на оптической оси проекционной системы.

Разрешающая способность (минимальный передаваемый размер элемента) определяется длиной волны излучения и числовой апертурой проекционного объектива

$$b_{\min} = K_1 \cdot \lambda / (NA),$$

где  $K_1$  – технологический фактор.

Числовой коэффициент  $K_1$  зависит от параметров оптической системы, а также от свойств ФР, режимов его обработки и др. Желательно, чтобы  $K_1$  был по возможности меньшим. Если сделать  $K_1 < NA$ , то  $b_{\min} \approx \lambda$ . Однако это трудно достижимо. Чаще всего для систем с дифракционными ограничениями  $K_1 = 0,6-0,8$ . Чем больше числовая апертура объектива, тем выше его разрешающая способность.

Важным параметром проекционной системы является глубина резкости  $\Delta f$ , определяемая как

$$\Delta f = \pm \lambda / (NA)^2 .$$

Для компенсации аберраций оптической системы, искривления поверхности подложек и изменения толщины слоя ФР необходима наибольшая глубина резкости. Глубина резкости оптической системы должна превышать  $\pm 5$  мкм. Это ограничивает апертуру линз и, следовательно, разрешающую способность метода. Для повышения разрешающей способности необходимо уменьшить  $\lambda$ , что, однако, затруднительно из-за возрастания коэффициента поглощения оптических стекол. Обычно в проекционных системах используют монохроматичное излучение с  $\lambda = 400-440$  нм. Схемы установки проекционной литографии без изменения масштаба переноса изображения и установки мультипликации с уменьшением приведены в [3, 4].

### 2.3 Фотошаблоны и технология их получения

Фотошаблоны являются основным инструментом для получения рисунка в слое ФР на подложке. **Фотошаблон** – плоскопараллельная пластина из прозрачного материала, на которой имеется рисунок, состоящий из непрозрачных для света определенной длины волны участков, образующих топологию одного из слоев структуры прибора, многократно повторенного в пределах рабочего поля подложки. Топология структуры – рисунок (чертеж), включающий в себя размеры элементов структуры, их форму, положение и принятые допуски. Для изготовления ИМС необходим комплект ФШ в соответствии с количеством формируемых технологических слоев.

Типономиналы размеров ФШ, используемых в производстве полупроводниковых ИМС, приведены ниже.

Размер рабочего поля ФШ (диаметр полупроводниковой подложки), мм	60	76	100	125	150
Размер стеклянной пластины ФШ, мм	76x76	102x102	127x127	153x153	178x178

Производство ФШ является сложным многостадийным процессом, включающим:

- проектирование топологии интегральных схем;
- изготовление увеличенного фотооригинала;
- изготовление промежуточного ФШ;
- изготовление эталонного ФШ;
- изготовление рабочих ФШ.

Технологические основы производства ФШ изложены в [2]. Самым простым методом изготовления оригинала является вырезание увеличенного рисунка топологии в двухслойной пленке, состоящей из прозрачной основы (полиэфирные пленки) и непрозрачного покрытия (красный пластик). Прорезание непрозрачного покрытия осуществляется на координатографе. Управление движениями резца осуществляется либо вручную (ручной координатограф), либо автоматически по программе (автоматический координатограф). В производстве находят применение ручные ЭМ-701 и ЭМ-707 с рабочим полем 800x800 мм и автоматизированные ЭМ-703 и ЭМ-706 с рабочим полем 1200x1200 мм координатографы. **Точность позиционирования** резца для ручных моделей  $\Delta x = \pm 50$  мкм. Тогда **точность выполнения рисунка** для линии шириной  $b$  при масштабе увеличения  $M$  будет

$$\Delta b = \pm \frac{2 \cdot \Delta x}{b \cdot M}.$$

Масштаб оригинала выбирается, исходя из двух соображений:

- 1) требуемой точности изготовления рисунка;
- 2) размера рабочего поля подложки.

Размеры оригиналов будут увеличены в  $M$  раз по сравнению с размерами подложек, которые составляют для полупроводниковых интегральных схем  $1 \times 1$ ,  $4 \times 3$  мм, для пленочных –  $8 \times 10$ ,  $10 \times 12$  мм и т.д. Полученный оригинал должен уместиться на рабочем поле координатографа. Рисунок топологии выполняется для полупроводниковых схем в масштабе от  $200:1$  до  $1000:1$ , а для пленочных схем – до  $50:1$ . Этот увеличенный рисунок и является **первичным оригиналом**.

Первичный перенос изображения с оригинала на фотопластину осуществляется в редуционной фотокамере (рис. 2.9, а). Редуционные фотокамеры позволяют производить отъем с оригиналов, имеющих максимальные размеры  $750 \times 750$  и  $1200 \times 1200$  мм соответственно на фотопластины с размерами  $60 \times 90$  или  $90 \times 120$  мм. Уменьшение осуществляется ступенчато от 10 до 50 раз. В результате последующей фотохимической обработки (проявления и фиксации изображения) получают **промежуточный ФШ** на эмульсионной основе.

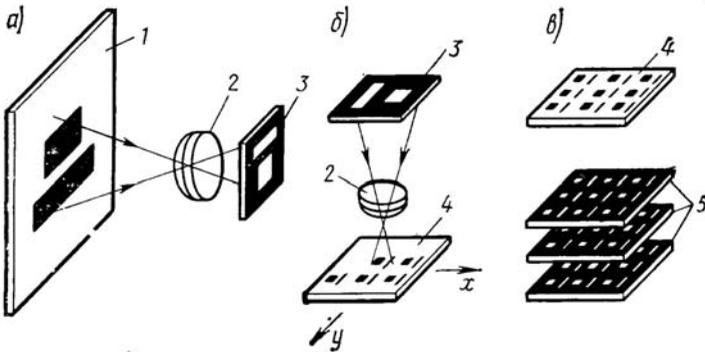


Рис. 2.9 – Первичный отъем оригинала с уменьшением (а), вторичный отъем промежуточного ФШ с одновременным мультиплицированием (б) и контактная печать с эталонного ФШ (в): 1 – оригинал; 2 – объектив; 3 – промежуточный ФШ; 4 – эталонный ФШ; 5 – рабочие ФШ

**Эталонный** групповой ФШ получают путем мультиплицирования изображения рисунка, т.е. пошагового впечатывания,

уменьшенного до натурального размера изображения промежуточного ФШ на фотопластину (рис. 2.9, б). Процесс выполняется на специальных оптико-механических установках – фотоповторителях. Точность шага расположения модулей, т.е. **точность позиционирования**, составляет для установки ЭМ-515А  $\pm 2,5$  мкм, а для ЭМ-522А  $\pm 0,2$  мкм. Мультиплицирование изображений можно выполнять не только на эмульсионных ФШ, но и на пластинах, покрытых фоторезистом с подслоем хрома. Это позволяет сократить число этапов производства ФШ за счет исключения этапа экспонирования эмульсионного эталонного ФШ, который имеет низкую стойкость к контактной печати.

**Рабочие ФШ** представляют собой копии с эмульсионных или хромированных эталонов, полученные методом контактной печати. В качестве покрытий для рабочих ФШ используются пленки хрома (хромированные ФШ) или полупрозрачные покрытия из окиси железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (транспарентные ФШ). Хромированные ФШ имеют стойкость до 50 отпечатков, транспарентные ФШ выдерживают до 100 отпечатков. Не менее важно то, что для транспарентных ФШ проще поиск знаков совмещения, так как окисное покрытие поглощает ультрафиолетовое излучение, но является прозрачным для видимого света.

Рассмотренный метод изготовления ФШ называется **оптико-механическим** методом. Необходимость многократного воспроизведения изображения на групповом ФШ, а также получения фотокопий с износостойким покрытием приводит к многоступенчатости процесса изготовления ФШ. Однако с каждой ступенью процесса происходит накопление дефектов в рисунке, и требование высокой точности приходит в противоречие с требованием малой плотности дефектов. Оптико-механический метод получается длительным и дорогостоящим и рекомендуется для изготовления ФШ полупроводниковых приборов и интегральных схем крупносерийного производства.

Современным методом изготовления ФШ является **микрофотонаборный** метод генерации изображения. Микрофотонаборный метод реализуется либо оптическим, либо электронным генератором изображения. В основе работы оптического генератора изображения лежит принцип фотонабора. Топологическая

структура рисунка расчленяется на элементарные прямоугольники с различным отношением сторон и определенной ориентацией по углу (рис. 2.10). По заданной программе очередной элемент формируется подвижными шторками диафрагмы и разворачивается на необходимый угол, а двухкоординатный стол, на котором размещена светочувствительная пластина, обрабатывает заданные координаты. После остановки стола производится экспонирование светом с заранее установленной выдержкой. Соответственно, исходными данными для каждой экспозиции являются длина и ширина очередного элемента, угол его поворота вокруг центра тяжести относительно оси  $x$  и координаты центра тяжести элемента ( $x$  и  $y$ ). С помощью генератора изображения получают оригинал в масштабе 10:1, который используют для изготовления эталонных ФШ с помощью фотоповторителя. Схемы генераторов изображений приведены в [3, 4], а схемы фотоповторителей и их основные характеристики в [2].

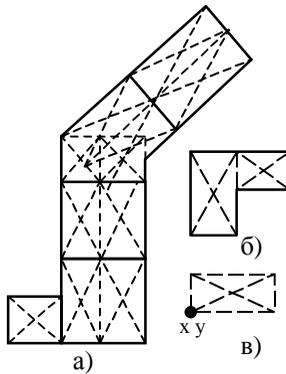


Рис. 2.10 – Генерация изображений топологических элементов на микрофотонаборной установке: а – сложного; б, в – простых

Оптический генератор позволяет осуществить до 300 тысяч экспозиций в час и формировать с большой скоростью сложный топологический рисунок. Однако ввиду того, что современные интегральные схемы имеют до миллиона топологических элементов, даже при таком быстродействии формирование одного фотошаблона составляет десятки часов.

Электронно-лучевой генератор изображения в сравнении с оптическим имеет более высокое быстродействие. В нем используется электронный луч в режиме векторного сканирования. При этом возможно получение на рабочем поле до 50 млн. элементов.

Изготовление рабочих ФШ представляет собой процесс контактной ФЛ, состоящей из следующих этапов:

- осаждение пленки рабочего материала;
- нанесение ФР;
- первая сушка;
- совмещение и экспонирование;
- проявление ФР;
- травление пленок;
- удаление ФР;
- контроль ФШ.

Процессы контактной ФЛ описаны в [1–4].

Качество процесса ФЛ во многом определяется механическим и физико-химическим состоянием поверхности подложек. Механическое состояние поверхности подложек влияет на точность получения элементов рисунка, поэтому любые неровности, микробугорки, впадины, царапины и риски приводят к их искажению. Кроме того, при нанесении слоя ФР эти дефекты вызывают появление пузырьков или проколов в слое ФР.

Физико-химическое состояние поверхности подложек влияет на ее смачиваемость и адгезию ФР. Поэтому на рабочих поверхностях подложек не должно быть инородных частиц, а также адсорбированных атомов и ионов жидкостей и газов.

Нанесенный на предварительно подготовленную поверхность подложек слой ФР должен быть однородным по толщине по всему их полю, без проколов, царапин (т.е. быть сплошным) и иметь хорошую адгезию. **Для нанесения слоя ФР чаще всего используют метод центрифугирования.** При этом методе на подложку, которая устанавливается на столике центрифуги и удерживается на нем вакуумным присосом, фоторезист подается капельницей – дозатором. Когда столик приводится во вращение, фоторезист растекается тонким слоем по поверхности подложки. Прилегающий к подложке граничный слой формируется за счет уравновешивания центробежной силы, пропорциональ-

ной числу оборотов, и силы сопротивления, зависящей от когезии молекул резиста. Когезия характеризуется вязкостью фоторезиста, так что толщина слоя  $d_{\text{ФР}}$  прямо пропорциональна вязкости  $\nu$  и обратно пропорциональна числу оборотов центрифуги  $\omega$

$$d_{\text{ФР}} = A\sqrt{\nu/\omega},$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Вязкость фоторезиста составляет 0,02–0,05 см/с, число оборотов центрифуги – от 2000 до 10000 об/мин. Зависимости толщины слоя ФР от частоты вращения центрифуги при различных коэффициентах его вязкости показаны в [4]. Используя метод центрифугирования, можно в зависимости от вязкости ФР регулировать толщину его слоя от 0,4 до 3,5 мкм, изменяя частоту вращения центрифуги от 1500 до 8000 об/мин. При малых скоростях центрифугирования слой ФР получается неровным и наблюдается его утолщение по краям подложки. Выбирая толщину слоя ФР, необходимо учитывать, что он должен обладать высокой разрешающей способностью (чем меньше толщина, тем выше разрешающая способность) и не терять стойкости к травителю. Кроме того, слой фоторезиста не должен иметь дефектов в виде проколов, количество которых с уменьшением толщины увеличивается. Следовательно, толщина слоя ФР должна быть наименьшей, но достаточной для обеспечения его стойкости к травителю и обеспечивать малую дефектность.

Для окончательного удаления растворителя из слоя ФР его просушивают. При этом уплотняется молекулярная структура слоя, уменьшаются внутренние напряжения и повышается адгезия к подложке. Неполное удаление растворителя из слоя ФР снижает его кислотостойкость. Для удаления растворителя подложки нагревают до температуры, примерно равной 100 °С. Большое значение при сушке имеет механизм подвода теплоты. Существуют три метода сушки ФР: конвекционный, инфракрасный и в СВЧ-поле.

При **конвективной сушке** подложки выдерживают в термокамере при 90–100 °С в течение 15–30 мин. Недостаток этого метода – низкое качество ФР слоя.

При **инфракрасной сушке** источником теплоты является сама подложка, поглощающая ИК-излучение от специальной лампы. Так как «фронт сушки» перемещается от подложки к поверхности слоя ФР, качество сушки по сравнению с конвективной существенно выше, а время сокращается до 5–10 мин.

При **СВЧ-сушке** подложки нагреваются, поглощая электромагнитную энергию СВЧ-поля. Время сушки – несколько секунд. Достоинством этого метода является высокая производительность, а недостатками – сложность оборудования, а также неравномерность сушки слоя ФР.

При любом методе сушки ее режимы (время, температура) должны исключать появление структурных изменений в слое фоторезиста.

При нанесении слоя ФР могут появиться различные **виды брака**. Плохая адгезия ФР к подложке вызывает при последующем травлении растравливание и искажение рисунков элементов. Причиной плохой адгезии является некачественная подготовка поверхности подложек. Локальные неоднородности рельефа слоя ФР, имеющие вид капелек, обусловлены попаданием пылинок на подложки или присутствием посторонних частиц в фоторезисте. Микродефекты (проколы) слоя ФР связаны с теми же причинами, что и локальные неоднородности.

Точность полученного в процессе фотолитографии топологического рисунка в первую очередь определяется процессом совмещения и экспонирования. **Передача изображения с фотошаблона на подложку должна выполняться с точностью 10 % от минимального размера элемента.** Поэтому процессы совмещения и экспонирования проводят одновременно на одной установке. Перед экспонированием слоя ФР фотошаблон следует правильно сориентировать относительно подложки и рисунка предыдущего слоя. Для полного формирования структуры ИМС необходим комплект ФШ со строго согласованными топологическими рисунками элементов. При первой фотолитографии, когда поверхность подложки еще не имеет рисунка, фотошаблон ориентируют относительно базового среза подложки. При последующих ФЛ, когда на подложках сформированы топологические слои, рисунок ФШ ориентируют относительно рисунка предыдущего слоя. Совмещают рисунки ФШ и подложки по

специальным знакам – фигурам совмещения, предусмотренным в рисунке каждого топологического слоя. Существует два метода совмещения ФШ с подложками:

- визуальный, при котором, выполняя совмещение, наблюдают за контрольными отметками в микроскоп; при этом точность совмещения составляет 0,25–1,0 мкм и зависит от возможностей установки;

- автоматизированный фотоэлектрический, обеспечивающий точность совмещения 0,1–0,3 мкм.

Процедура совмещения осуществляется с помощью механизма совмещения микроизображений. Основными элементами этого механизма являются предметный шаровой столик со сферическим основанием-гнездом, рамка для закрепления ФШ и устройства перемещения рамки и поворота предметного столика. Подложку размещают на предметном столике так, чтобы слой ФР был сверху, и закрепляют ФШ в подвижной рамке над поверхностью подложки. Между подложкой и ФШ должен быть зазор для свободного перемещения рамки при совмещении знаков.

После выполнения совмещения подложку прижимают к ФШ и экспонируют слой ФР. Обеспечить идеальный контакт и отсутствие локальных зазоров по большим площадям практически невозможно. Зазор при контактировании двух поверхностей носит случайный характер и обусловлен неплоскостью подложки, изгибом подложки при термообработках, наличием нижележащего микрорельефа и др. Этот зазор может колебаться в диапазоне 5–20 мкм. Наличие зазора ухудшает разрешающую способность контактной фотолитографии.

Окончательное формирование в пленке ФР изображения элементов схем происходит при его **проявлении**, когда в зависимости от типа ФР удаляются экспонированные или неэкспонированные участки. В результате на поверхности подложки остается защитная фоторезистивная маска требуемой конфигурации.

Проявителями для негативных ФР служат органические растворители: толуол, бензол, трихлорэтилен и др.

Позитивные ФР проявляются в слабых водных растворах щелочей: 0,3–0,6 %-ный раствор КОН; 1–2 %-ный раствор три-натрийфосфата и др.

Для каждого резиста существуют оптимальные сочетания времен экспонирования и проявления, обеспечивающие наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка (рис. 2.11). Такие зависимости для позитивного фоторезиста ФП-383 приведены в [2].

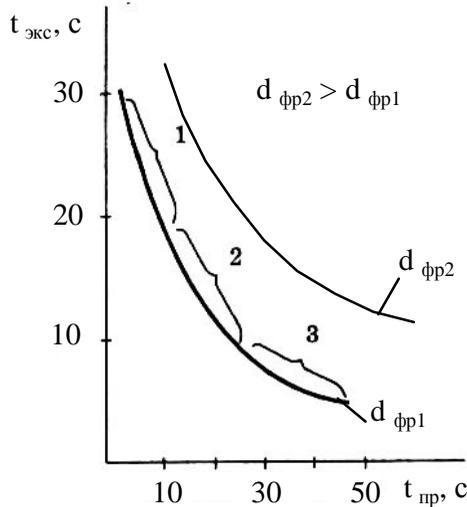


Рис. 2.11 – Зависимость между временами экспонирования и проявления, обеспечивающими наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка: 1,3 – области неустойчивых режимов; 2 – область устойчивых режимов

Увеличение экспозиции уменьшает время проявления, но приводит к изменению размеров проявленных элементов рисунка (в позитивных резистах размеры увеличиваются, в негативных уменьшаются). Увеличение времени проявления повышает пористость и растравливание границ рисунка по контуру. Времена проявления и экспонирования связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью

$$t_{np} = k \frac{d_{\Phi P}^2}{t_{\text{экс}}},$$

где  $k$  – технологический фактор.

Если известно время проявления для одной толщины фоторезиста  $d_{\Phi P1}$ , то можно определить время проявления для другой толщины  $d_{\Phi P2}$  при заданном времени экспонирования:

$$t_{np2} = t_{np1} = \frac{d_{\Phi P2}^2}{d_{\Phi P1}^2}.$$

При проявлении негативных ФР происходит набухание и затем растворение неэкспонированных участков. При этом набухают и растворяются и экспонированные участки, но в значительно меньшей степени. Поэтому для получения четкого рисунка подбирают такой проявитель, который бы минимально воздействовал на экспонированные участки. При недостаточной экспозиции облученные участки будут растворяться почти так же, как и необлученные, что приведет к очень некачественному рисунку. Механизм проявления позитивных ФР заключается в образовании при химической реакции растворимых в воде солей, которые вымываются при проявлении. В отличие от негативных ФР в позитивных ФР отсутствует набухание, что повышает их разрешающую способность.

**После проявления подложки промывают и сушат** при повышенных температурах. Температура сушки составляет: для негативных ФР – 200–220 °С при времени выдержки 1 ч; для позитивных ФР – 200–240 °С – 0,5 ч. В процессе сушки в негативных ФР происходит окончательная полимеризация проявленных участков. Вследствие этого повышается стойкость слоя ФР к действию травителей и улучшается его адгезия к подложке.

После сушки подложки подвергают контролю под микроскопом. При контроле обнаруживаются: **посторонние включения, пылинки, микрочастицы**, которые создают участки, обладающие повышенной растворимостью. Эти дефекты, как правило, незаметные во время нанесения резиста, выявляются при проявлении, поскольку обладают повышенной растворимостью. В результате растворения они создают **поры (проколы)** в слое ФР. Плотность зависит не только от чистоты и качества резиста,

запыленности окружающей среды, но и от толщины наносимого ФР. С уменьшением толщины плотность дефектов  $D$  увеличивается:

$$D = 1,4d_{\text{ФР}}^{-3},$$

где  $D$  – деф/см<sup>2</sup>;

$d$  – мкм.

Задубливание является финишной операцией нанесения фоторезистивной маски, поэтому после нее следует окончательный визуальный контроль перед травлением.

**Основные виды выявляемых дефектов** сводятся к следующим:

- некачественное удаление резиста (вызывается низкой адгезией из-за плохой подготовки поверхности);
- плохо проявленный рисунок (вызывается некачественным фоторезистом, нарушениями температуры первой сушки и режимов экспонирования);
- двойной край или большой клин по краю рельефа (вызывается неоптимальными режимами экспонирования и проявления, большим зазором между подложкой и фотошаблоном при экспонировании);
- неровный («рваный») край рельефа (в основном из-за загрязненного фотошаблона и несоблюдения режимов экспонирования);
- проколы (из-за запыленности среды и фоторезиста, перепроявления, уменьшения толщины, нарушения режимов экспонирования);
- остатки фоторезиста в проявленных окнах (из-за недопроявления или нарушения режимов экспонирования);
- изменение размеров рисунка (из-за ошибки в экспозиции либо нарушения режимов проявления).

Контактная ФЛ заканчивается операцией травления технологического слоя и последующим удалением фоторезистивной маски. Для удаления фоторезистов можно применять множество жидких растворителей или использовать газофазные процессы с возбужденным кислородом (сжигание в кислородной плазме). Позитивные ФР легко удаляются в органических растворителях. Негативные ФР лучше удаляются при окислении.

При жидкостном методе подложки кипятят в органических растворителях (диметилформамиде и др.). При этом слой ФР набухает и удаляется. Чем больше задублен ФР, тем он прочнее, тем сложнее его растворить.

Эффективное удаление ФР можно проводить в среде кислорода при высоких (до 700 °С) температурах, если это позволяет структура подложки. Освещение подложки ультрафиолетовыми лучами позволяет резко снизить температуру обработки.

Формирование топологии рисунка на технологическом слое (металлизация, диэлектрическая пленка) является конечной задачей фотолитографии. Это осуществляется химическим жидкостным либо «сухим» (ионно-плазменным) методами. **Химическое жидкостное травление основано на растворении в химических реагентах незащищенных фоторезистивной маской участков технологического слоя** и состоит из следующих стадий: диффузии и адсорбции молекул травителя к поверхности подложки; химической реакции; десорбции продуктов реакции и удаления их в раствор. Скорость травления зависит от наиболее медленной стадии и, кроме того, определяется составом травителя и его температурой. Используемые химические травители должны обладать **селективностью (избирательностью)**, т.е. способностью активно растворять основной технологический слой, не взаимодействуя с фоторезистом и другими нижележащими слоями. **Процесс химического жидкостного травления, как правило, изотропен, т.е. имеет одинаковую скорость во всех направлениях.** Участки подложки, незащищенные пленкой ФР, травятся не только вглубь, но и в стороны, т.е. происходит так называемое боковое подтравливание, что приводит к изменению линейных размеров элементов рисунка. При плохой адгезии слоя ФР травитель может проникать под него на значительное расстояние, и в этом случае боковое подтравливание становится недопустимо большим. При хорошей адгезии фронт бокового травления (клин травления) имеет форму дуги. Изменение размеров элементов рисунка не должно превышать допусков, указанных в технических условиях.

## 2.4 Методы и технология формирования рисунка интегральных микросхем

Для создания геометрического рисунка совмещенных тонкопленочных элементов, образующих многослойную структуру, можно выделить две группы методов: контактные маски и методы свободной маски. В технологии полупроводниковых ИМС используются контактные маски, которые представляют собой применение последовательной селективной и обратной фотолитографии. Метод последовательной ФЛ (прямые маски) представлен на рис. 2.12, а. Сначала на подложку 1 наносится тонкопленочный слой из рабочего материала 2, например,  $\text{SiO}_2$  на кремниевую подложку, затем контактной фотолитографией формируется фоторезистивная маска (рис. 2.12, 4–7). Через прямую ФР-маску травится слой  $\text{SiO}_2$ . Травитель для  $\text{SiO}_2$  не дол-

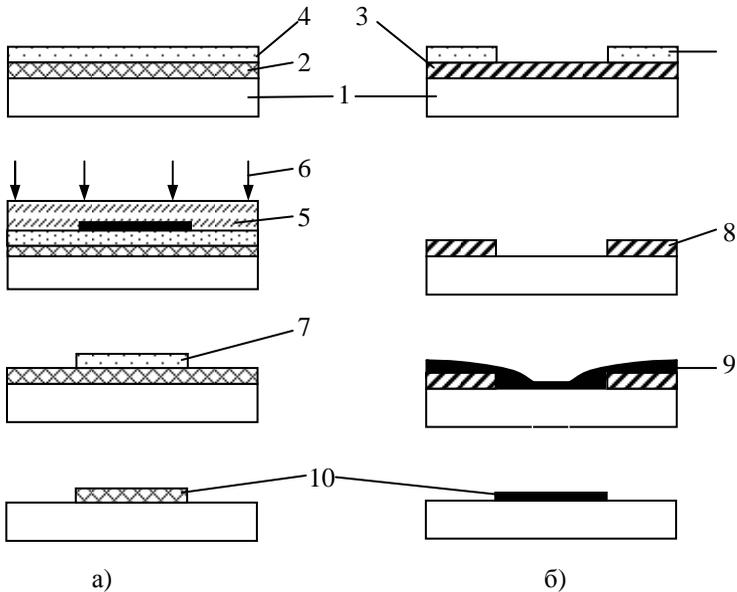


Рис. 2.12 – Методы последовательной (а) и обратной (б) фотолитографии: 1 – подложка; 2 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 3 – слой меди; 4 – фоторезист; 5 – фотошаблон; 6 – излучение; 7 – фоторезистивная маска; 8 – обратная маска в слое меди; 9 – пленка рабочего материала; 10 – рисунок в рабочем слое

жен разрушать и травить (селективный травитель). После травления ФР-маска удаляется.

В обратной ФЛ маска формируется в слое ФР или в пленке из вспомогательного металла, который легко травится, например, из меди (рис. 2.12, б). Пленка меди 3 напыляется непосредственно на подложку 1. С помощью фоторезистивного защитного рельефа 4 в нем формируется рисунок 8, негативный (обратный) по отношению к требуемому изображению. Фоторезистивная маска удаляется и на металлическую маску наносится рабочий материал 9. При травлении материала маски (меди), находящейся под рабочим слоем, последний удаляется с подложки, за исключением мест, где он осажден непосредственно на подложку. За счет этого получается рисунок 10 в рабочем материале. Однако технологический процесс с обратной металлической маской несколько усложняется. Возможен и упрощенный метод обратной ФЛ, при котором на подложку наносится фоторезист и на нем образуется негативный рисунок требуемой конфигурации; далее наносится сплошной слой рабочей пленки, который удаляется с подложки вместе с фоторезистом.

Метод обратной фоторезистивной маски исключает действие сильных травителей на пленку, так как ФР удаляется органическим растворителем. Однако, используя обратную ФР маску, нельзя применять сильный нагрев, так как он приводит к дополнительной полимеризации или разложению фоторезиста. В процессах, в которых имеет место нагрев, следует применять обратную ФЛ с подслоем (рис. 2.12, б).

Особенностью фотолитографии для пленочных микросхем является широкий диапазон применяемых материалов и методов их осаждения, что требует более разнообразных способов формирования рисунка, чем в полупроводниковой технологии [5]. В тонкопленочной технологии используются разнообразные методы селективного травления через фоторезистивные и металлические маски, а также обратные маски, если трудно подобрать селективный травитель.

Рассмотрим получение рисунка тонкопленочных резисторов на основе пленок хрома с контактами из меди и никеля. При прямой ФЛ на подложку 1 напыляются три сплошных слоя: хром 2, медь 3 и никель 4 (рис. 2.13, а). Нанесенный ФР 7

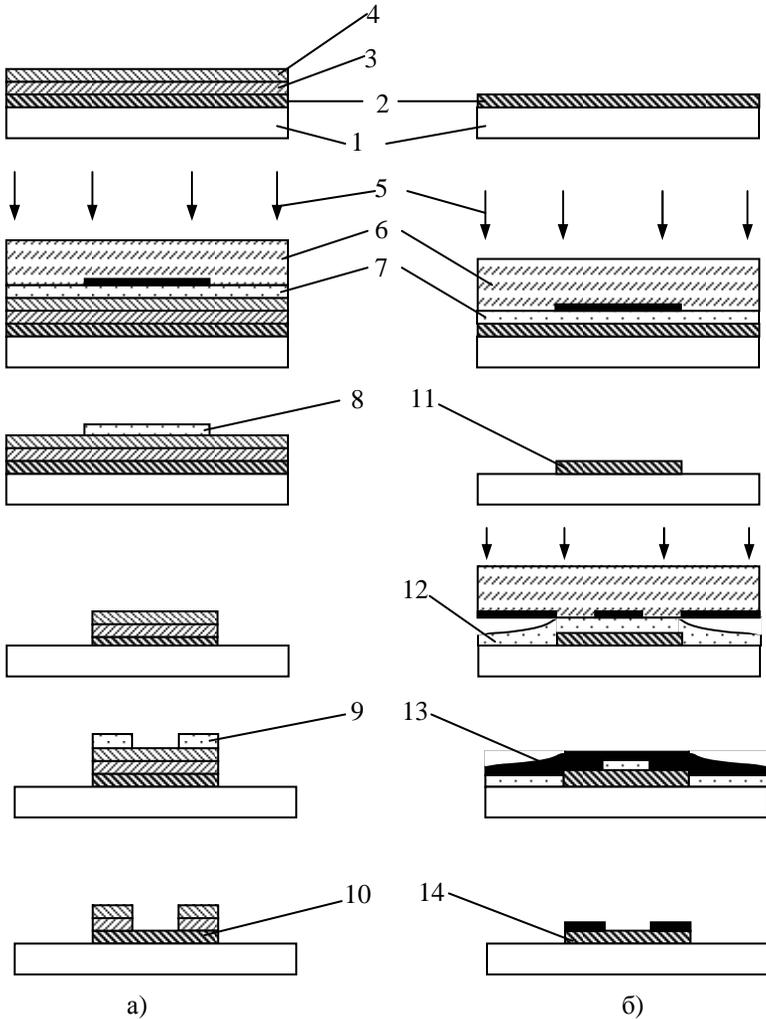


Рис. 2.13 – Формирование рисунка тонкопленочных резисторов с применением прямой (а) и обратной (б) масок: 1 – подложки; 2 – пленка хрома; 3 – пленка меди; 4 – пленка никеля; 5 – излучение; 6 – фотошаблон; 7,12 – фоторезист; 8,9 – ФР-маски; 10 – резистор из пленки хрома с контактами хром-медь-никель; 11 – рисунок резистора из пленки хрома; 13 – пленка материала контактов; 14 – резистор с контактами

экспонируют через ФШ: задающий совместный рисунок резистора и контактных площадок. Затем травят одновременно все три слоя на участках, незащищенных ФР (рис. 2.13, а, 8). Вторая фотолитография проводится с целью формирования защитного рельефа на контактах, через который удаляют с помощью селективного травителя пленки меди и никеля с самого резистора (рис. 2.13, 9–10). В результате получается резистор из пленки хрома с трехслойными контактами хром-медь-никель. Формирование этого же тонкопленочного резистора с применением обратной ФЛ представлено на рис. 2.13, б. Рисунок резистора с контактами формируется прямой фотолитографией на пленке хрома 11. Затем наносится ФР 12 и формируется защитный рельеф, на который напыляется сплошным слоем материал контактов 13. При травлении обратной фоторезистивной маски удаляется лежащая на ней пленка и получаются резистор и контакты с подслоем хрома 14.

Достоинством контактных масок является их высокая точность, а недостатком – многократность повторения процессов ФЛ, действие травителей на пленки, что ухудшает их свойства.

Метод свободных масок базируется на использовании специальных металлических трафаретов. К трафарету предъявляют ряд требований, определяемых условиями его эксплуатации. Трафарет используют в качестве маски при напылении пленок методом термического испарения в вакууме. Он устанавливается перед подложкой с некоторым зазором. Напыляемое вещество с испарителя поступает на подложку только через окна в трафарете, которые и образуют рисунок. Поэтому трафарет должен обладать жесткостью и упругостью, чтобы при нагреве в процессе напыления не деформироваться, но при этом быть достаточно тонким для уменьшения эффекта затенения. Этим требованиям удовлетворяют сплавы меди, сталь, молибден, бериллиевая бронза при толщинах фольги 50–125 мкм.

Схема изготовления монометаллического трафарета представлена на рис. 2.14, а и включает в себя операции изготовления ФР маски (нанесение ФР 1 на фольгу 2, экспонирование 3, проявление). Затем следует операция травления фольги. На операции травления другую сторону пластины защищают лаком 5. Величина подтравливания приблизительно равна глубине трав-

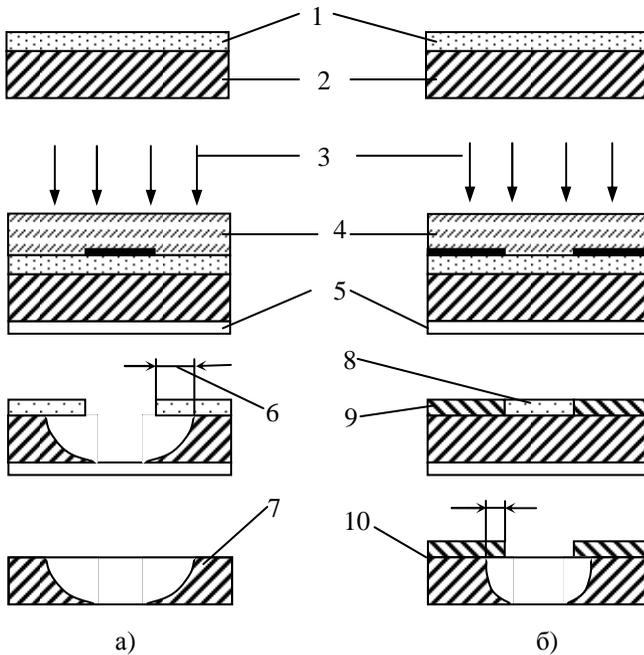


Рис. 2.14 – Схема изготовления монометаллического (а) и биметаллического (б) трафаретов: 1 – фоторезист; 2 – фольга; 3 – излучение; 4 – фотошаблон; 5 – лак; 6 – подтрав; 7 – монометаллический трафарет; 8 – ФР-маска; 9 – слой никеля; 10 – биметаллический трафарет

ления б (рис. 2.14, а). Монометаллические трафареты, полученные методом контактной ФЛ, применяют редко из-за сильного растравливания материала фольги и ограниченной точности перенесения рисунка с фотошаблона (до 5–15 мкм).

Для устранения подтравливания применяют биметаллические трафареты, в которых один слой, более толстый (100–150 мкм), служит основой и обеспечивает механическую прочность маски; другой слой, относительно тонкий (7–10 мкм), является собственно трафаретом и обеспечивает точное воспроизведение рисунка (биметаллический трафарет).

В качестве основы биметаллического трафарета применяют пластины из бериллиевой бронзы толщиной 0,1–0,15 мм, на ко-

торой формируют защитную маску из фоторезиста (рис. 2.14, б). Изолирующий рисунок на поверхности пластины соответствует будущим местам отверстий в трафарете. На открытые участки пластины гальваническим способом наращивают слой никеля толщиной до 10 мкм. Затем фоторезистивную маску удаляют и травят пластину на всю глубину, при этом слой никеля выполняет функцию защитной маски. Биметаллические трафареты характеризуются более высокой точностью по сравнению с монометаллическими трафаретами, но отличаются непрочностью нависающих слоев никеля и возможностью зарастания щели при напылении материалов.

## 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛЕНОЧНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

### 3.1 Термическое испарение в вакууме

#### 3.1.1 Вакуумные напылительные установки

Суть метода заключается в нагреве вещества до температуры испарения, его испарении и последующей конденсации в вакууме на подложке. Получение пленок возможно только при низких давлениях в вакуумных установках. Схема установки показана на рис. 3.1.

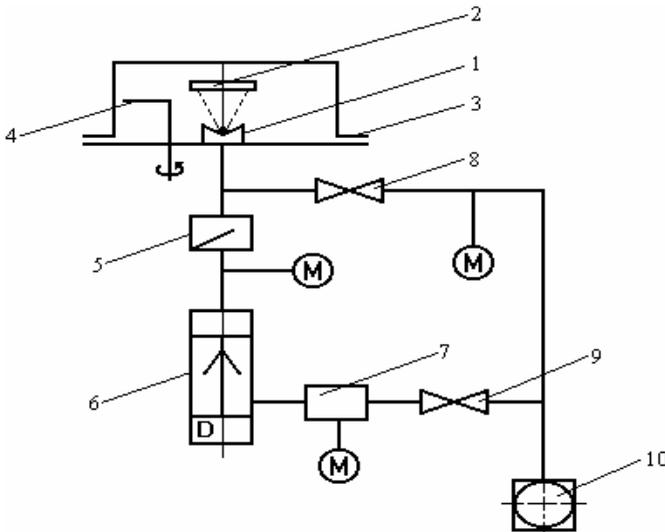


Рис. 3.1. Схема установки вакуумного напыления:  
 1 – испаритель; 2 – подложка; 3 – рабочая камера; 4 – заслонка;  
 5 – затвор; 6 – высоковакуумный насос; 7 – форбаллон;  
 8, 9 – вакуумные вентили; 10 – форвакуумный насос

В условиях высокого вакуума материал, помещенный в испаритель 1, разогревается и испаряется, в результате чего молекулы вещества движутся к подложке 2, где они конденсируются, образуя пленку. Процесс осуществляется внутри камеры 3, связанной с непрерывно работающей системой откачки воздуха.

Вакуумная система состоит из высоковакуумного паромасляного насоса 6 и механического насоса 10. Подключение насосов к рабочей камере осуществляется с помощью вакуумных вентиляей по основной и вспомогательной линиям откачки. Откачка рабочей камеры 3 производится через отверстие в рабочей плите установки. На входе паромасляного насоса 6 устанавливаются маслоотражатель и затвор 5, отделяющий входной патрубков насоса от рабочего объема. По основной линии откачка производится следующим образом: рабочая камера 3 – открытый затвор 5 – насос 6 – форбаллон 7 – открытый вентиль 9 – насос – 10, а по вспомогательной линии: камера 3 – открытый вентиль 8 – насос 10. При этом вентиль 9 должен быть закрыт. С помощью вспомогательной линии откачки в рабочей камере создается давление порядка 10 Па, необходимое для работы высоковакуумного насоса. Затем вентиль 8 закрывают, открывают вентиль 9 и затвор 5 и дальше производят откачку по основной линии, предварительно включив нагреватель паромасляного насоса.

Таким образом, для осуществления процесса термического испарения в вакууме необходимо обеспечить следующие основные условия: достаточно интенсивное испарение материала, направленный молекулярный поток к подложке и конденсацию пара на подложке.

### **3.1.2 Формирование молекулярного потока**

Для формирования молекулярного потока условия в пролетном пространстве между испарителем и подложкой должны быть такими, чтобы молекулы испаренного вещества без столкновений с молекулами остаточных газов достигали подложки. Если столкновения часты, то будет мала скорость осаждения пленок, велико подпыление (рис. 3.2, а). Направленное движение молекул вещества к подложке может быть создано за счет достаточно высокого вакуума и путем соответствующей конфигурации испарителей (рис. 3.2, б). Для определения условий существования молекулярного потока удобнее характеризовать

степень вакуума не давлением остаточных газов  $p_e$ , а средней длиной свободного пробега молекул  $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \frac{kT_e}{p_e \pi \sigma^2 \sqrt{2}},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$T_e$  – температура газа;

$p_e$  – давление газа;

$\sigma$  – диаметр молекул испаряемого вещества.

Уже при давлении  $p_e = 10^{-2}$  Па средняя длина свободного пробега составляет 50 см, что превышает реальное расстояние  $h$  от испарителя до подложки (обычно не более 20 см).

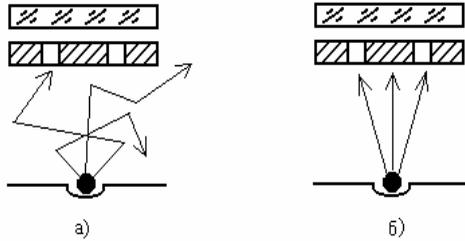


Рис. 3.2 – Осаждение пленок в условиях низкого (а) и высокого (б) вакуума

Таким образом, для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление остаточного газа порядка  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Па.

### 3.1.3 Испарение вещества

Переход твердых тел или жидкостей в газообразное состояние называется испарением и может быть рассмотрен на основе положений термодинамики и кинетической теории газа. Особое значение имеет условие термодинамического равновесия, при котором два состояния вещества, например, конденсированная

фаза (жидкость, твердое вещество) и ее пар, существуют при одной и той же температуре в контакте друг с другом без каких-либо изменений во времени. Это означает, что количество испаренного вещества должно быть равно количеству сконденсированного вещества за все время, пока поддерживается равновесие (состояние насыщения). При этих условиях твердые тела и жидкости характеризуются определенным давлением насыщенных паров  $p_s$ , которое зависит только от температуры для данного вещества. На первый взгляд может показаться, что равновесное давление пара не имеет непосредственного отношения к процессу вакуумного испарения, поскольку последний заключается в переходе вещества из одного состояния в другое. Тем не менее, теория и экспериментальные данные показывают, что скорости испарения не могут превышать некоторого предела, пропорционального равновесному давлению пара. Следовательно, давление  $p_s$  над поверхностью твердого или жидкого тела является важной величиной, позволяющей определить способность вещества к испарению и температуры, при которых достижимы необходимые скорости испарения. Из условия равновесия пар-твердое тело, пар-жидкость путем решения уравнений термодинамики получена зависимость давления насыщенного пара от температуры испарения  $T_u$

$$\lg p_s = A - \frac{B}{T_u}, \quad (3.1)$$

где  $p_s$  – давление насыщенного пара, Па;

$A$  и  $B$  – постоянные, характеризующие природу вещества, приведены в [2].

Таким образом, чем выше температура, тем больше давление насыщенного пара и больше скорость испарения. Температуру вещества, при которой давление насыщенного пара  $p_s = 1,33$  Па, называют условной температурой испарения. Для некоторых веществ условная температура испарения ниже температуры плавления, т.е. эти вещества достаточно интенсивно испаряются из твердого состояния (возгонка или сублимация). Данные по давлению паров в широком температурном интервале для разных веществ приведены в [7].

Применение кинетической теории газов для интерпретации явления испарения позволяет создать теорию процесса испарения. Количественные оценки скорости испарения, с которой вещество из конденсированной фазы переходит в газообразную, связаны с именами Герца, Кнудсена, Ленгмюра.

Скорость испарения определяется числом молекул, уходящих из исходного вещества в единицу времени. Число молекул, обладающих скоростями, достаточными для ухода их в паровое пространство, можно определить из максвелловского распределения, которое показывает, какая доля молекул от всего количества молекул обладает скоростями, лежащими между  $v$  и  $v + dv$ . Для компоненты скорости  $v_x$ , перпендикулярной к границе раздела, имеем

$$dn = n \sqrt{\frac{m}{2\pi k T_u}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT_u}\right) v_x dv_x, \quad (3.2)$$

где  $n$  – число молекул в единице объема исходного вещества,  $\text{м}^3$ ;

$m$  – масса молекулы, кг;

$k$  – постоянная Больцмана, Дж/град.;

$T_u$  – температура, до которой нагрето вещество, К.

Скорость испарения будут определять все молекулы, компонента скорости которых, перпендикулярная к границе раздела, превышает некоторую  $v_{np}$ . Они покинут поверхность и перейдут в газовую фазу

$$N_u = n \sqrt{\frac{m}{2\pi k T_u}} \int_{v_{np}}^{\infty} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT_u}\right) v_x dv_x = n \sqrt{\frac{kT_u}{2\pi m}} \exp\left(-\frac{mv_{np}^2}{2kT_u}\right), \quad (3.3)$$

где  $N_u$  – число молекул, испаренных с единицы площади в единицу времени,  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

При рассмотрении процесса испарения можно воспользоваться условием термодинамического равновесия, при котором количество испаренных из исходного вещества молекул равно количеству вновь сконденсированных молекул из парового пространства. Однако конденсироваться могут молекулы с нулевой

скоростью. Тогда после интегрирования выражения (3.3) получим

$$N_{\kappa} = n_{\text{наpa}} \sqrt{\frac{kT_u}{2\pi m}}.$$

Воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$p_{\varepsilon} V = nkT_{\varepsilon}, \quad (3.4)$$

где  $p_{\varepsilon}$  – давление газа, Па;

$V$  – объем газа, м<sup>3</sup>;

$n$  – число молекул газа в единице объема, м<sup>-3</sup>;

$T_{\varepsilon}$  – температура газа, К.

Для пространства, занятого паром, уравнение (3.4) можно записать

$$p_s V = n_{\text{наpa}} k T_u.$$

Отсюда для единичного объема

$$n_{\text{наpa}} = \frac{p_s}{k T_u}, \quad (3.5)$$

где  $T_u$  – температура, до которой нагрето испаряемое вещество.

С учетом (3.5) количество испарившихся молекул будет

$$N_u = N_{\kappa} = \frac{p_s}{\sqrt{2\pi m k T_u}}. \quad (3.6)$$

Скорость испарения, т.е. количество вещества, покидающее единицу поверхности испарителя в единицу времени, определяется

$$W_u = m N_u = p_s \sqrt{\frac{m}{2\pi k T_u}}, \text{ кг/м}^2\text{с}. \quad (3.7)$$

### 3.1.4 Скорость конденсации

Количество вещества, достигающее поверхности подложки, будет зависеть от конфигурации испарителя и подложки. Рассмотрим малую сферу  $ds_1$ , испаряющую вещество с одинаковой скоростью в количестве  $Q$  во всех направлениях. Такой испаритель будем называть точечным источником. Для молекулярного

потока испарение вещества из точечного источника в телесный угол  $d\omega$  в направлении  $r$  (рис. 3.3) аналогично распространению лучистой энергии и описывается известными оптическими соотношениями. Поток испаренного вещества, приходящийся на единицу телесного угла, есть

$$dQ_1 = \frac{Q}{4\pi}, \quad (3.8)$$

где  $Q$  – общее количество вещества, испаренного с испарителя  $ds_1$  за время  $t$ , кг.

Величина  $Q$  связана со скоростью испарения следующим соотношением

$$Q = W_u ds_1 t. \quad (3.9)$$

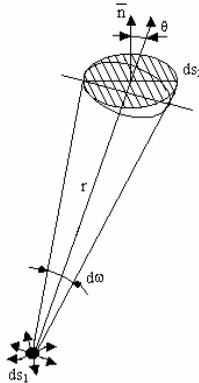


Рис. 3.3 – Испарение вещества из точечного источника в телесный угол  $d\omega$  в направлении  $r$

В пределах пространственного угла  $d\omega$  на площадку  $ds_2$  поступает

$$dQ = \frac{Q}{4\pi} d\omega. \quad (3.10)$$

Через любое сечение конуса, ограниченного  $d\omega$ , проходит один и тот же поток. Сечение конуса сферической поверхностью с центром в  $ds_1$  и радиусом, равным единице, дает меру телесного

угла конуса  $d\omega$ . Если нормаль  $\vec{n}$  к  $ds_2$  составляет угол  $\theta$  с осью конуса, а расстояние от  $ds_1$  до площадки  $ds_2$  есть  $r$ , то

$$d\omega = \frac{ds_2 \cos \theta}{r^2}. \quad (3.11)$$

Количество вещества, поступающего на единицу поверхности  $ds_2$ , с учетом (3.10) и (3.11) есть

$$dQ = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{\cos \theta}{r^2}, \quad (3.12)$$

т.е. это количество обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до приемной поверхности и прямо пропорционально косинусу угла, составляемого направлением потока (осью узкого конуса, внутри которого распространяется поток) с нормалью к приемной поверхности.

Рассмотрим маленькую площадку  $ds_1$ , с одной стороны которой испаряется  $Q$  вещества (в угол  $\pi$ ). Для поверхностного испарителя количество испаренного вещества зависит от направления испарения. Тогда в соответствии с законом косинуса Ламберта-Кнудсена количество вещества, проходящего в телесном угле  $d\omega$  по направлению  $r$ , образующему угол  $\varphi$  с нормалью к поверхности испарителя (рис. 3.4), равно

$$dQ = \frac{Q}{\pi} \cos \varphi d\omega. \quad (3.13)$$

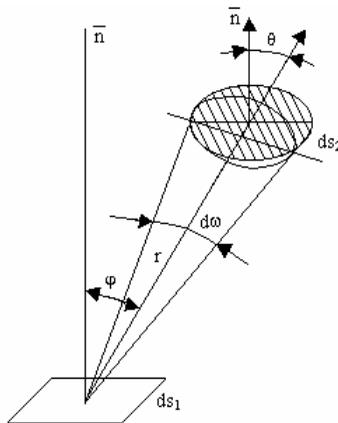


Рис. 3.4 – Испарение вещества с элементарной площадки

В отличие от точечного источника количество испаренного вещества с поверхностного испарителя пропорционально  $\cos \varphi$ . Если вещество поступает на площадку  $ds_2$ , наклоненную к направлению пучка паров под углом  $\theta$ , то количество вещества, осажденного на такую площадку, равно

$$dQ = \frac{Q}{\pi} \cos \varphi \cdot \cos \theta \frac{ds_2}{r^2}. \quad (3.14)$$

Количество вещества  $dQ$  можно определить через его плотность  $\gamma$  и объем  $dV$ , занимаемый конденсатом на подложке

$$dQ = \gamma dV = \gamma ds_2 d, \quad (3.15)$$

где  $d$  – толщина пленки, сконденсированная в каждой точке подложки за время напыления.

С учетом (3.9), (3.14) и (3.15) толщину пленки можно определить

$$d = \frac{dQ}{\gamma ds_2} = \frac{Q}{\pi \gamma} \cdot \frac{\cos \varphi \cos \theta}{r^2};$$

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{\pi \gamma} \cdot \frac{\cos \varphi \cos \theta}{r^2}. \quad (3.16)$$

Аналогичные рассуждения для точечного испарителя приводят к выражению

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{4\pi \gamma} \cdot \frac{\cos \theta}{r^2}. \quad (3.17)$$

Скорость конденсации определяется как скорость наращивания толщины пленки за единицу времени  $t$ , т.е.  $W_\kappa = d/t$ . Если подложка расположена параллельно поверхности испарителя, то для любой точки подложки (рис. 3.5) имеем

$$\cos \varphi = \cos \theta = h/r, \quad \text{а} \quad r^2 = h^2 + x^2 + y^2.$$

Тогда для поверхностного испарителя

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{\pi \gamma} \cdot \frac{h^2}{(h^2 + x^2 + y^2)^2}. \quad (3.18)$$

Для точечного испарителя

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{4\pi \gamma} \cdot \frac{h}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}}. \quad (3.19)$$

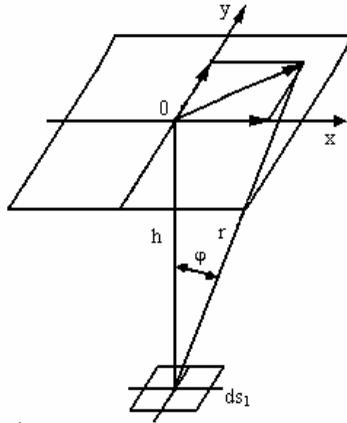


Рис. 3.5 – Испарение с малой площадки  $ds_1$  на параллельную ей плоскую поверхность

Толщина пленки над источником (при  $x=0, y=0$ ) для поверхностного испарителя равна

$$d_0 = \frac{W_u ds_1 t}{\pi \gamma} \cdot \frac{1}{h^2}. \quad (3.20)$$

Отношение толщины пленки в произвольной точке к толщине пленки в центре подложки будет:

для поверхностного испарителя

$$\frac{d}{d_0} = \frac{h^4}{(h^2 + x^2 + y^2)^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^2}; \quad (3.21)$$

для точечного испарителя

$$\frac{d}{d_0} = \frac{h^3}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^{3/2}}. \quad (3.22)$$

Эти отношения используются для оценки равномерности толщины пленки по подложке.

При выводе уравнений (3.16) и (3.17) предполагалось, что оба испарителя имеют бесконечно малую площадь испарения  $ds_1$ . На практике испарение осуществляют из испарителей с конечными размерами. В этом случае толщина может быть получена интегрированием уравнений (3.16) и (3.17). Расчеты для испарителей в виде диска и тонкого кольца приведены в [7].

### 3.1.5 Механизм испарения соединений и сплавов

При испарении металлов основным видом частиц в газовой фазе являются одиночные атомы металла. При испарении соединений переход в газообразное состояние обычно сопровождается изменением вида молекулы. Было доказано, что испарение соединений сопровождается диссоциацией, которая сильно влияет на стехиометрическое соотношение составляющих. Это особенно сильно проявляется, если один из продуктов диссоциации является нелетучим. Последний случай соответствует термическому разложению и исключает возможность применения непосредственного испарения. Таким образом, осаждение пленок соединений из одного испарителя возможно только в том случае, если вещество переходит в газообразное состояние в виде неразложенных молекул или если продукты разложения обладают одинаковой летучестью. Если это условие выполняется, то говорят о согласованном испарении.

Примером испарения без диссоциации является процесс испарения некоторых окислов, таких как  $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$  и др. Стехиометрические пленки монооксида кремния  $\text{SiO}$  получают при температурах испарения 1200–1250 °С. Окислы  $\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Mg}$  и др. испаряются с диссоциацией. Пары этих веществ содержат молекулы двойных окислов, атомы кислорода и молекулы низших окислов. Высшие окислы теряют кислород при температурах, слишком малых для заметной летучести низших окислов. В результате этого в пленках окислов наблюдается недостаток кислорода, что вызывает изменение диэлектрических, оптических и других свойств пленок.

Испарение полупроводниковых соединений  $\text{CdS}$ ,  $\text{CdSe}$ ,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{ZnSe}$  и др. сопровождается диссоциацией, приводя-

щей к увеличению содержания легколетучих компонент S, Se, Te в паре и, соответственно, в пленках.

При термическом разложении испарение соединений идет несогласованно, т.е. при температуре испарения летучесть их составляющих отличается столь сильно, что химический состав пара и, следовательно, пленки не совпадает с химическим составом исходного вещества. При испарении GaAs, InSb и других соединений  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  для относительно летучих веществ V группы (As, Sb) давление  $p_s = 1,33$  Па достигается при температурах от 700 до 900 °С. В этом диапазоне температур металлы III группы Ga, In, Al находятся в расплавленном состоянии и имеют давление  $p_s$  на несколько порядков меньше, чем для элементов V группы. В этом случае пленка на подложке не образуется вовсе или ее состав существенно отличается от состава исходного вещества. Составляющие сплавов испаряются подобно чистым металлам независимо друг от друга и преимущественно в виде отдельных атомов A и B. Однако давление пара составляющей B сплава отличается от давления чистого металла при той же температуре. Это происходит вследствие изменения химического потенциала металла B, когда он растворяется в другом металле A, образуя сплав AB. Если молярную концентрацию выражать в виде молярной концентрации  $x_B$ , то имеем

$$p_B = x_B p_{sB},$$

где  $p_B$  – парциальное давление пара компоненты B над расплавом при постоянной температуре испарения;

$p_{sB}$  – давление насыщенного пара чистой компоненты B.

Это выражение является одной из форм записи закона Рауля, который говорит о том, что давление составляющей над раствором уменьшается пропорционально молярной концентрации. Поведение реальных сплавов отличается от растворов, поэтому необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающий активность компоненты A и B в сплаве  $p_B = f_B x_B p_{sB}$ . Точки  $p_{sA}$  и  $p_{sB}$  соответствуют давлению паров чистых компонентов A и B (рис. 3.6). Понижение давления паров A вследствие растворения в нем компоненты B изобразится прямой  $p_{sA} - B$ . Анало-

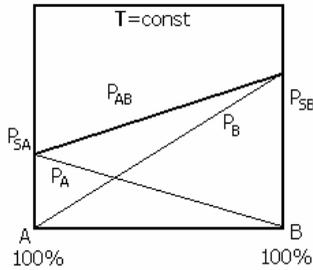


Рис. 3.6 – Графическое изображение закона Рауля

гичная зависимость будет для давления паров компоненты В – прямая  $p_{sB}$  – А. Общее давление пара  $p_{AB}$ , равновесного с расплавом, будет равно

$$p_{AB} = f_A x_A p_{sA} + f_B x_B p_{sB}.$$

Коэффициент  $f$  зависит от температуры и от природы компонентов сплава и может быть больше 1 и меньше 1. Для идеальных растворов  $f = 1$ . При  $f > 1$  силы взаимодействия между разнородными атомами слабее, чем взаимодействие в чистой фазе, и необходимая для испарения энергия ниже, и наоборот. Если  $f$  отличается от 1, то состав паровой фазы будет отличаться от состава вещества, помещенного в испаритель. Это явление называется фракционированием сплава.

Применение закона Рауля для процесса испарения жидких сплавов приводит к тому, что в уравнении Кнудсена появляются коэффициенты активности. Запишем потоки при испарении сплава АВ

$$N_{uA} = \frac{p_{sA} f_A x_A}{\sqrt{2\pi k T_u m_A}}; \quad N_{uB} = \frac{p_{sB} f_B x_B}{\sqrt{2\pi k T_u m_B}}.$$

Следовательно, отношение числа частиц А к числу частиц В в потоке пара в любой момент времени будет

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{f_A x_A p_{sA}}{f_B x_B p_{sB}} \left( \frac{M_B}{M_A} \right)^{1/2},$$

где  $x_A + x_B = 1$ .

Если коэффициенты активности остаются постоянными, то параметры, характеризующие вещество системы, могут быть объединены в один параметр, который называется коэффициентом испарения сплава  $K$ :

$$K = \frac{f_A P_{sA}}{f_B P_{sB}} \left( \frac{M_B}{M_A} \right)^{1/2}.$$

Тогда соотношение компонент  $A$  и  $B$  в паре будет  $\frac{N_A}{N_B} = K \frac{x_A}{x_B}$ . Если считать, что состав пленки такой же, как и состав пара, то содержание компонент в пленке  $C_A$  и  $C_B$  можно определить следующим образом:

$$C_A + C_B = 1; K \frac{x_A}{x_B} = \frac{C_A}{C_B} = \frac{C_A}{1 - C_A} = K \frac{x_A}{1 - x_A},$$

отсюда для компоненты  $A$  получим

$$C_A = \frac{Kx_A}{1 - x_A(1 - K)}.$$

Для компоненты  $B$  расчет можно произвести аналогичным образом

$$\frac{C_A}{C_B} = K \frac{x_A}{x_B}; \frac{1 - C_B}{C_B} = K \frac{(1 - x_B)}{x_B}.$$

$$C_B = x_B [x_B + K(1 - x_B)]^{-1}.$$

При  $K=1$  состав источника пара и пленки одинаков. На практике  $K \neq 1$  и в ходе испарения материал в тигле обедняется одним из компонентов.

### 3.1.6 Способы испарения

Существующие испарители можно разделить на две группы: испарители с непосредственным нагревом и испарители с косвенным нагревом.

**Испарителями с непосредственным нагревом** называются такие испарители, в которых ток пропускается непосредственно через испаряемый материал. Такой метод испарения может быть применен только для проволочных или ленточных ма-

териалов, температура испарения которых ниже температуры плавления. Преимущество метода испарения с непосредственным нагревом заключается в том, что при этом отсутствуют элементы подогревателя, способные загрязнить наносимую тонкую пленку.

При испарении с косвенным нагревом предусматриваются специальные подогреватели, при помощи которых испаряемое вещество нагревается до температуры, соответствующей температуре испарения. Выбор материала подогревателей определяется в основном следующими основными требованиями:

1) давление насыщенных паров материала подогревателя должно быть пренебрежимо малым при рабочих температурах испарения;

2) испаряемый материал в расплавленном состоянии должен хорошо смачивать материал подогревателя, обеспечивая таким образом хороший тепловой контакт;

3) не должно происходить никаких химических реакций между материалом подогревателя и испаряемым металлом, а также не должны образовываться сплавы между этими веществами. Образование сплавов может привести к загрязнению и разрушению подогревателя.

**Испарители с косвенным нагревом** могут быть проволочные, ленточные и тигельные [2, 5]. Испарение металлов с проволочных нагревателей может происходить в телесные углы вплоть до  $4\pi$  (точечные испарители), в то время как с ленточных оно ограничено телесным углом  $\pi$  (поверхностные испарители). Различные конструкции испарителей показаны на рис. 3.7.

При небольших количествах испаряемого металла и при условии, что испаряемый металл смачивает материал нагревателя, применяются V-образные, линейные и спиральные испарители (см. рис. 3.7 а, б, в). В этих конструкциях испаряемый металл в виде загнутых кусочков проволок или полосок листового материала насаживается на испаритель. При пропускании тока эти кусочки расплавляются и смачивают испаритель, при этом смачивание и поверхностное натяжение удерживают расплавленный металл на поверхности испарителя. Практика показывает, что испарение металла происходит не из центра образованного расплавленного кусочка, а с прилегающих к нему участков

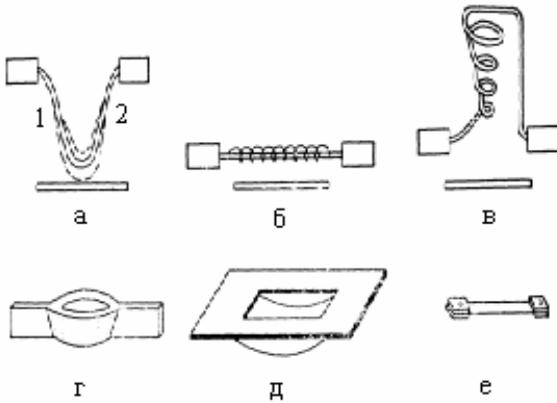


Рис. 3.7 – Схемы испарителей. Проволочные: а – V-образный испаритель; б – линейный испаритель; в – спиральный конический испаритель. Ленточные: г – лодочка; д – лента с вдавненным желобом; е – отрезок ленты

проволоки нагревателя (точки 1 и 2 рис. 3.7, а). При хорошем смачивании материала нагревателя испаряемым металлом всегда происходит некоторое взаимодействие между этими веществами. Типичным примером такого взаимодействия является образование сплава при испарении алюминия с вольфрама. Однако, несмотря на некоторую растворимость вольфрама в алюминии, можно подобрать такие условия испарения, при которых эта растворимость не оказывает существенного влияния на процесс испарения.

Для испарения больших количеств металла и порошкообразных материалов применяются испарители в виде лодочек или тиглей, подогреваемых электрическим током. Испарители типа «лодочка» изготавливаются из тугоплавких металлов: вольфрама, тантала, молибдена (см. рис. 3.7 г, д, е). Вольфрамовые ленты более хрупки и поэтому менее удобны в работе, чем другие ленты из перечисленных материалов.

Для испарения металлов с низкой температурой плавления можно использовать тигли из стекла и кварца, которые окружены спиралью. Для испарения больших количеств металлов с высокой

точкой плавления применяются тигли из алунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и окиси бериллия ( $\text{BeO}$ ). Такие тигли могут быть сделаны относительно большой емкости. Тигли из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  успешно используются для испарения металлов, точка плавления которых ниже  $1600^\circ\text{C}$ ; тигли из  $\text{BeO}$  могут быть использованы до температуры  $1750^\circ\text{C}$ .

Тигли из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  применяются для испарения больших количеств  $\text{Co}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Sn}$ . Тигли из  $\text{BeO}$  используются для испарения  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe}$  и  $\text{Si}$ . Для испарения металлов при температуре порядка  $2200^\circ\text{C}$  применяются тигли из окиси тория.

Для еще более высоких температур испарения в качестве материала для испарителей применяется графит. При этом испаряемый металл может быть введен в углубление на непосредственно нагреваемом графитовом стержне или в тигель из графита, подогреваемый при помощи спирали. Следует отметить, что при высоких температурах многие металлы реагируют с углеродом, образуя карбиды, поэтому они не могут быть испарены из графитовых тиглей. К таким металлам относится алюминий, который реагирует с углеродом с образованием легколетучего карбида алюминия. При испарении кремния из графитового тигля происходит образование карбида кремния, который является нелетучим. Аналогичные явления наблюдаются при испарении титана. Металлы, которые не реагируют с углеродом при высоких температурах (бериллий, серебро, стронций и др.), могут быть успешно испарены из графитовых тиглей.

Для испарения тугоплавких веществ используются **электронные испарители**, с помощью которых можно разогревать вещества до очень высоких температур, вплоть до  $3500^\circ\text{C}$  [7]. Однако многие химические соединения разлагаются под действием электронной бомбардировки. В результате осажденная пленка имеет химический состав, отличный от исходного вещества. Поэтому электронный нагрев применяют в основном для испарения тугоплавких металлов, элементарных полупроводников и некоторых диэлектриков.

Метод нагрева с помощью электронной бомбардировки при нанесении тонких пленок заключается в том, что испаряемое вещество, которое должно быть нагрето, размещается на электроде с высоким положительным потенциалом или само используется в качестве такого электрода. Нить накала, представляю-

щая собой несколько витков вольфрамовой проволоки, намотана вокруг этого положительно заряженного электрода или размещена вблизи него. Электроны, эмиттируемые накаленной нитью, бомбардируют электрод. В результате этого испаряемое вещество может быть нагрето до очень высоких температур. Несколько возможных конструкций электронных испарителей схематически изображены на рис. 3.8.

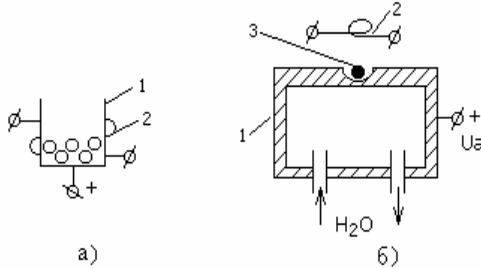


Рис. 3.8 – Схемы простых электронных испарителей:  
1 – тигель; 2 – термокатод; 3 – испаряемое вещество

Простые электронные испарители (рис. 3.8, а) содержат два электрода: тигель 1 и катод 2. Напряжение между тиглем и катодом равно приблизительно 4000 В, электронный ток 100 мА. Разогрев вещества 3, помещенного в тигель, может происходить до температур порядка 3000 К. Недостатком такого испарителя является взаимодействие расплава с материалом испарителя.

На рис. 3.8, б показано устройство, в котором в качестве испарителя используется охлаждаемый водой тигель 1 из меди. На торце этого тигля сделано углубление, в которое помещается испаряемое вещество 3. На катод 2 подается отрицательный относительно заземленного испарителя потенциал 2–4 кВ. Охлаждаемый испаритель предохраняет от сплавления материал тигля с испаряемым веществом.

Это объясняется тем, что во время электронной бомбардировки тигель остается сравнительно холодным и поэтому материал, находящийся в непосредственном контакте с холодной поверхностью, не плавится. Этот тонкий слой нерасплавившегося металла служит «тиглем» для остального материала, и, таким образом, исключается возможность образования сплава. Охлаж-

даемые тигли успешно использовались для испарения Al, Ni, Ti, Ta, Pt и окиси алюминия. Недостатком таких испарителей является запыление термокатада испаряемым веществом, отсюда потеря эмиссионной способности катода и его малый срок службы.

Для разогрева испарителя вместо простой раскаленной нити термокатада можно использовать электронную пушку. На рис. 3.9 приведена схема испарителя с магнитной фокусировкой электронного луча.

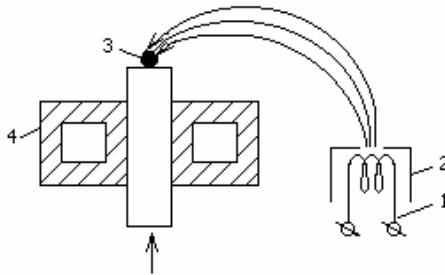


Рис. 3.9 – Схема сложного электронного испарителя с магнитной фокусировкой: 1 – термокатод; 2 – анод; 3 – испаряемое вещество; 4 – охлаждаемый держатель

Электроны эмитируются термокатодом 1, извлекаются с помощью анода 2. Электроны, попадая в поперечное магнитное поле  $\vec{B}$ , фокусируются и направляются на испаряемое вещество 3, которое подается в виде стержня в зону испарения через охлаждаемый водой держатель 4. Полюса магнита и электронная пушка расположены ниже уровня жидкого металла и защищены от попадания паров. Нагрев электронной бомбардировкой в сложных электронных испарителях дает возможность избежать непосредственного контакта тугоплавкого испаряемого вещества с материалом тигля в зоне расплава, что позволяет исключить один из источников загрязнения пленок. Испаритель работает при анодном напряжении  $U_a=8-12$  кВ и токе луча 0,2–0,5 А. Размеры фокусного пятна на поверхности металла могут быть сделаны  $2 \times 1$  мм<sup>2</sup>. При указанных параметрах можно испарять тугоплавкие металлы с большой скоростью.

Недостатком электронных испарителей является их сложность, большие потребляемые мощности и невозможность получения пленок сложных соединений стехиометрического состава.

Для получения пленок соединений и сплавов стехиометрического состава используются специальные методы испарения [7].

**Взрывное (дискретное)** испарение применяется для осаждения пленок, соединений, сплавов и смесей, составляющие которых имеют разные давления паров. Температура испарителя выбирается такой, чтобы происходило испарение наименее летучего вещества. Испаряемое вещество в виде гранул загружается в бункер 1 и подается за счет вибраций на транспортер 2. С транспортера вещество попадает на разогретый испаритель 3. Поток испаренного вещества поступает на подложку 4 (рис. 3.10).

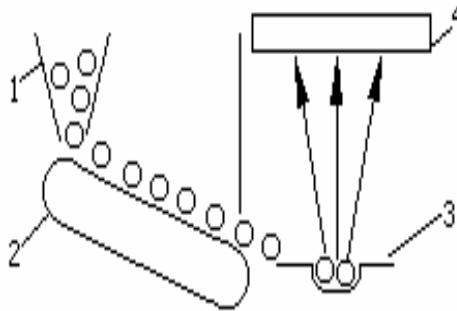


Рис. 3.10 – Схема взрывного испарения: 1 – бункер; 2 – транспортер; 3 – испаритель; 4 – подложка

Температура испарителя должна быть такой, чтобы каждая порция испарялась мгновенно и полностью. Весь процесс испарения разбивается на ряд дискретных испарений. Для взрывного испарения очень важным является выбор оптимальной температуры испарения. При температуре испарителя меньше оптимальной взрывное испарение будет происходить точно так же, как обычное термическое испарение с диссоциацией или разложением, а испарение при температуре больше оптимальной будет сопровождаться появлением в молекулярном потоке испа-

ренного вещества очень крупных частиц, попадающих на подложку, что в большинстве случаев недопустимо. Поэтому для реализации взрывного испарения необходимо грамотно выбирать температуру испарения, материал и конструкцию испарителя.

В случае металлов и сплавов непрерывное испарение малых количеств вещества можно производить при подаче проволоки с катушки через направляющую трубку на поверхность нагретого испарителя. Для испарения соединений используются, главным образом, устройства, в которых порошок подается за счет вибрации из бункера.

### **Метод одновременного испарения из двух испарителей.**

Испарение двух материалов при различных температурах с последующей их совместной конденсацией на одной и той же подложке исключает проблемы фракционирования и разложения, которые встречаются при непосредственном испарении большинства сплавов и соединений. Возможно также проводить совместное осаждение веществ, которые не образуют ни соединений, ни твердых растворов. Примером являются пленки резисторов из окислов и металлов (керметы).

Целью метода двух испарителей является получение пленок заданного состава. Для выполнения этой задачи необходимо поддерживать разные температуры испарителей  $T_1$  и  $T_2$ , обеспечивающие одинаковое давление насыщенных паров атомов компонент А и В в потоке пара, независимо от их летучести (рис. 3.11). Температура подложки ( $T_3$ ) должна способствовать конденсации пленок на подложке с образованием соединения АВ. Поэтому этот метод получил еще название метод трех температур.

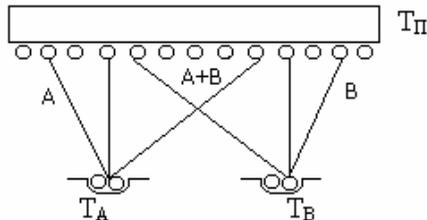


Рис. 3.11 – Схема одновременного испарения из двух испарителей

Одной из общих проблем является нахождение такого расположения испарителей, при котором площадь подложки была бы равномерно экспонирована для обоих потоков паров. В соответствии с законами распространения испаренного вещества (см. подраздел 3.1.4) надо определить геометрию источников, их взаимное расположение и расстояния до подложки  $h$ , чтобы площадь, на которой образуется пленка заданного состава, была максимальной. С этой целью используют, например, устройство из двух концентрических испарителей. Другим решением является такое наклонное положение испарителей, при котором оба потока будут направлены на подложку под одним и тем же углом. В общем случае влияние угла падения испаренных атомов можно уменьшить за счет увеличения расстояния от испарителя до подложки. Если необходимо получать пленки с меняющимся составом, то это может быть достигнуто удалением испарителей друг от друга.

Состав пленок соединений менее чувствителен к положению испарителей и не требует столь строгого контроля потока пара, как в случае пленок сплавов или пленок типа керметов. Причина этого заключается в том, что состав пленок соединений зависит не только от отношения давлений составляющих, но и от поверхностной реакции образования соединения на подложке при температуре  $T_3$ . Таким образом, испарение соединений из двух испарителей аналогично реактивному испарению, в котором рост пленки определяется температурой подложки. При испарении компонентов сплавов и керметов выбор температуры подложки диктуется получением плотных пленок с хорошей адгезией, а состав пленок будет зависеть от вышерассмотренных параметров.

### 3.1.7 Практические рекомендации

Дальнейший выбор конкретного способа испарения определяется особенностями испарения веществ. Большинство металлов испаряется с помощью проволочных или ленточных испарителей [7]. Алюминий испаряется при температуре 1500 К с проволочного испарителя из вольфрама (см. рис. 3.7, а). Такой тип испарителя можно отнести к точечному с площадью испа-

рения 0,3–0,6 см<sup>2</sup>. Такие же испарители можно рекомендовать для испарения хрома при температуре 1670 К. Медь можно испарять из проволочных или ленточных испарителей при температуре 1530 К.

Предпочтительным материалом для ленточных испарителей является молибден. Ленточные испарители относятся к поверхностным испарителям с площадью испарения 1–3 см<sup>2</sup> (см. рис. 3.7, г–е). Такой металл, как галлий, имеет низкую температуру плавления (300 К), но достаточно высокую температуру испарения (1400 К), образует сплавы с тугоплавкими металлами, поэтому кадмий испаряют из тигельных испарителей, изготовленных из окиси бериллия (*BeO*) или окиси алюминия (*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*). Золото испаряется из жидкой фазы при температуре 1670 К из проволочных ленточных или тигельных испарителей. Золото в расплаве реагирует с танталом, смачивает вольфрам и молибден. Тигли из молибдена выдерживают всего несколько процессов испарения. Молибден можно испарять из твердой фазы при температуре 2800 К непосредственно из молибденовой фольги с малой скоростью за счет сублимации. Предпочтительным является электронно-лучевое испарение. Трудности испарения никеля связаны с тем, что расплав образует сплавы с тугоплавкими металлами, следовательно, загрузка должна быть ограничена. Лучше применять электронно-лучевое испарение с охлаждаемых тиглей (см. рис. 3.8, б). Платина испаряется при температуре 2370 К из вольфрамовых испарителей или тиглей из тугоплавких окислов. Поскольку температура испарения высокая, то предпочтительно электронно-лучевое испарение. Серебро легко испаряется с проволочных или ленточных испарителей из молибдена и тантала, но наиболее долговечны тигли из молибдена. Тугоплавкие металлы тантал, вольфрам, ванадий, цирконий и другие следует испарять с помощью электронно-лучевого испарителя (см. рис. 3.9). При этом можно обеспечить большие скорости испарения. При испарении кремния применяются тигли из тугоплавких окислов бериллия и циркония. Однако они разрушаются расплавленным кремнием и пленки загрязняются *SiO*. Наиболее чистые пленки получают при электронно-лучевом испарении.

Для испарения  $Al_2O_3$  используется электронный испаритель (см. рис. 3.9). Это соединение почти не разлагается при испарении из  $W$  и  $Mo$  при температурах 2100–2500 К. Аналогично испаряются окислы бора, бериллия, висмута, кальция и др. Испарение окислов индия ( $In_2O_3$ ) из платиновых тиглей идет с небольшим разложением. В составе пара фиксируются молекулы  $In, In_2O_3, O_2$ . При испарении из  $Al_2O_3$  тиглей при 1300–1700 К молекул  $In_2O_3$  больше, чем молекул  $In$ . Окисел сурьмы ( $Sb_2O_3$ ) при испарении из  $W$  переходит в низшие окислы. При использовании нагревателя из  $Pt$  разложения нет. Моноксид кремния  $SiO$  обычно испаряется при давлении остаточных газов меньших  $10^{-3}$  Па и температурах между 1420–1520 К. Диссоциация на  $Si$  и  $O_2$  начинается при температурах более 1520 К и может привести к пленкам с недостатком кислорода. Рекомендуемый тип испарителя – поверхностный, выполненный в виде тигля из  $Ta$  или  $Mo$ . Окись титана ( $TiO_2$ ) разлагается на низшие окислы при нагреве до 2300 К. При импульсном нагреве электронным лучом получаются почти стехиометрические пленки. При испарении окиси циркония ( $ZrO_2$ ) из тантала при 2000 К образуется летучая  $TaO$ . При испарении из  $W$  образуются пленки с дефицитом кислорода. При нагреве электронным лучом окись циркония также теряет кислород.

Полупроводниковые соединения  $CdS, CdSe, CaTe, PbS$  и другие испаряются из лодочек ( $Ta, Mo$ ) тигельных испарителей (графит,  $Al_2O_3$ ) с диссоциацией и состав пленок отличается от стехиометрического. При испарении соединения  $Sb_2Se_3$  из  $Ta$ -лодочки при 780–880 К наблюдается фракционирование и осаждение пленки с переменным составом. Для получения пленок из сложных соединений стехиометрического состава рекомендуется одновременное испарение из двух испарителей (см. рис. 3.11).

Метод взрывного испарения (см. рис. 3.10) рекомендуется для получения пленок сплавов  $Au - Cd, Ni - Fe, Ni - Cr$  и пленок из смеси порошков металл-диэлектрик ( $Cr + SiO, Cr + Si$ ). Этим же методом можно получать пленки сложных соединений.

При испарении порошка арсенида галлия ( $GaAs$ ) образуются эпитаксиальные пленки на кристаллах  $GaAs$  и  $Ge$ . Аналогично получают пленки соединений  $GaSb$ ,  $InP$ ,  $InAs$ ,  $InSb$  и др.

## 3.2 Ионно-плазменное распыление

### 3.2.1 Физика ионного распыления

Ионно-плазменное распыление – это процесс распыления мишени, выполненной из требуемого материала, высокоэнергетическими ионами инертных газов. Распыленные ионами атомы материала мишени, осаждаясь на подложке, формируют пленку материала. Ионно-плазменное распыление можно реализовать путем распыления материала катода в плазме газового разряда ионизированными молекулами разряженного газа (катодное распыление), либо путем распыления мишени в высоком вакууме сформированным пучком ионов (ионное распыление).

Распыление ионной бомбардировкой, как и испарение в вакууме, позволяет получать проводящие, резистивные, диэлектрические, полупроводниковые и магнитные пленки, но, по сравнению с термическим вакуумным напылением, имеет ряд преимуществ.

Катодное распыление основано на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными молекулами разряженного газа. Атомы, вылетающие с поверхности катода при его разрушении, распространяются в окружающем пространстве и осаждаются на приемной поверхности, которой является подложка. Схема процесса катодного распыления изображена на рис. 3.12. В рабочей камере 1 установлена двухэлектродная система, состоящая из «холодного» катода 2, изготовленного из материала, подвергаемого распылению, и анода 4, на котором располагается подложка 5. Между катодом и анодом расположена заслонка (на рисунке не показана), которая так же, как и при термическом напылении, предназначена для перекрывания потока распыляемого вещества по мере надобности. Из рабочей камеры откачивается воздух, после чего в камеру напускается рабочий газ, давление которого устанавливается равным 1–10 Па.

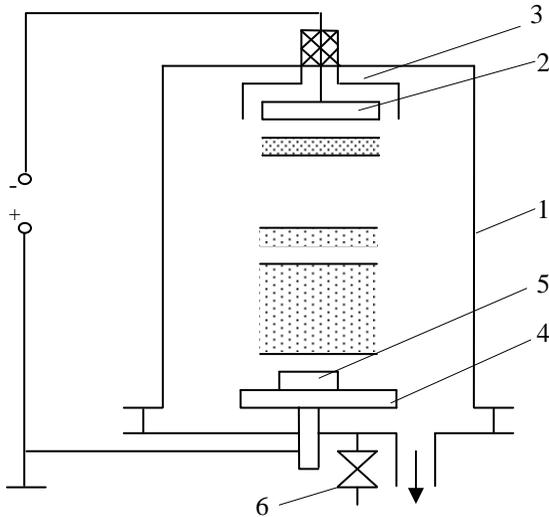


Рис. 3.12 – Схема процесса катодного распыления: 1 – рабочая камера; 2 – катод; 3 – экран; 4 – анод; 5 – подложка; 6 – натекатель

Затем между катодом и анодом подается высокое напряжение, порядка нескольких киловольт, которое вызывает пробой газового промежутка и поддержание разряда.

Глеющий разряд имеет характерное распределение потенциала между катодом и анодом, изображенное на рис. 3.12. Непосредственно у самого катода располагается светящаяся область, называемая катодным свечением. Прилегающая к ней область темного катодного пространства характеризуется наибольшим изменением потенциала. Затем следует область отрицательного свечения, за которой наблюдается темная, с размытыми краями область фардеева пространства. Примыкающая к аноду область называется положительным столбом. С точки зрения физики разряда наиболее важной является область темного катодного пространства. Основная часть приложенного напряжения падает на темном катодном пространстве, что объясняется большой разностью концентраций положительных ионов на границах катодного пространства. Толщина области приблизительно равна среднему расстоянию, которое проходят

эмитированные катодом электроны до первого ионизирующего столкновения. Из-за большой напряженности электрического поля в катодном темном пространстве вторичные электроны пересекают его быстро. Однако как только они достигают границы отрицательного свечения и вызывают генерацию большого числа электронно-ионных пар, положительный объемный заряд быстро спадает и начинается нейтральная область, содержащая приблизительно одинаковое число электронов и положительных ионов. Так как ионы экранируются электронами, они движутся в области отрицательного свечения посредством диффузии. Когда же ион достигает границы темного катодного пространства, он быстро устремляется к катоду и бомбардирует его с энергией, равной или меньшей энергии, соответствующей падению напряжения на темном катодном пространстве, в зависимости от того, испытал ли он на пути к катоду столкновения или нет. Удар иона о катод приводит к двум эффектам: к эмиссии нейтральных атомов (катодное распыление материала) и к эмиссии вторичных электронов. Вторичные электроны служат для поддержания разряда. Когда электроны попадают в область отрицательного свечения, они, по существу, обладают энергией, соответствующей полному катодному падению потенциала. Эта энергия затем теряется в серии столкновений, ионизирующих или возбуждающих атомы газа. В конце концов энергия электронов уменьшается настолько, что при последующих столкновениях они уже не могут ионизовать атомы газа. Соответствующий участок разрядного промежутка определяет дальнюю границу отрицательного свечения. Поскольку здесь не происходит ионизации газа, электроны накапливаются в этой области и образуют небольшой пространственный заряд. Энергии электронов недостаточно даже для возбуждения атомов газа, поэтому эта область темная и получила название фарадеево темное пространство. В оставшейся части разряда от края фарадеева темного пространства и до анода имеется слабое электрическое поле – положительный столб. Электроны ускоряются к аноду. Так как существование самостоятельного разряда зависит только от эмиссии достаточного числа электронов с «холодного» катода за счет его бомбардировки положительными ионами, то изменение расположения анода будет слабо влиять на электри-

ческие характеристики разряда до тех пор, пока его не придвинуть к краю темного катодного пространства. В этом случае разряд погаснет, так как это расстояние становится меньше длины пробега электронов, необходимой для ионизации газа. Это явление используется на практике для подавления побочных разрядов с нерабочей стороны катода. С этой целью вокруг катода устанавливается экран 3 (см. рис. 3.12), находящийся под потенциалом анода и на расстоянии меньше длины темного катодного пространства. Расположение подложки в пространстве между катодом и анодом оказывает большое влияние на условия осаждения пленок. Чем больше расстояние от катода до подложки, тем большее число распыленных атомов катода не доходит до подложки вследствие столкновений с молекулами газа, тем меньше скорость осаждения. Однако при приближении подложки к области темного катодного пространства распыление катода начинает замедляться в результате задержки ионов подложкой. Кроме того, на нее будут попадать из области отрицательного свечения электроны с большими энергиями, что неблагоприятно влияет на свойства пленок. Оптимальным является расстояние от подложки до катода, вдвое превышающее ширину темного катодного пространства.

Эффективность ионного распыления характеризуется коэффициентом распыления  $S$ , который равен числу атомов, распыляемых под воздействием одного иона

$$S = \frac{N_a}{N_u},$$

где  $N_a$  – число выбитых (распыленных) атомов;

$N_u$  – число падающих ионов.

Коэффициент распыления не является обычно целым числом и должен рассматриваться как статистическое среднее.

### 3.2.2 Модель ионного распыления

Единой теории, объясняющей механизм катодного распыления, пока не существует. Одной из теорий является теория «горячего пятна», которая объясняет распыление термическим испарением локально нагретого участка мишени вследствие

бомбардировки ионами. Существуют также различные гипотезы о химическом взаимодействии заряженной частицы с распыляемым веществом и образованием на поверхности мишени летучих соединений.

Наиболее удачно экспериментальные результаты по ионному распылению объясняются с позиций импульсного механизма. Модель ионного распыления по этой теории можно рассмотреть на схеме, представленной на рис. 3.13.

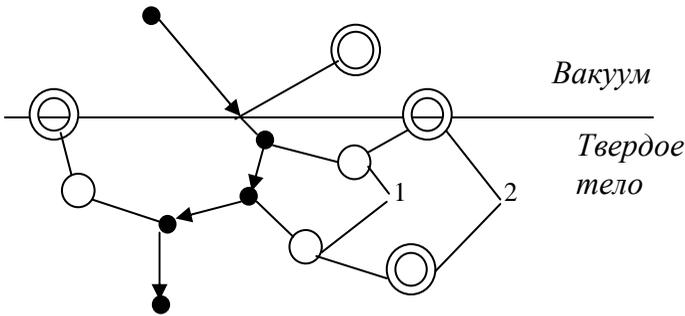


Рис. 3.13 – Схема процесса ионного распыления:  
1 – первично смещенные атомы; 2 – вторично смещенные атомы

Движущийся на катод (мишень) ион газа массой  $M_1$  передает свою энергию  $E$  атомам решетки в серии последовательных столкновений. Если при столкновении атому мишени массой  $M_2$  передается энергия, превосходящая энергию связи атомов в решетке (энергию смещения)  $E_{см}$ , он покидает свое равновесное положение, превращаясь в первично смещенный атом. Смещенный атом, в свою очередь, сталкивается с окружающими атомами решетки, производя вторичные смещения, и т.д. Этот процесс длится до тех пор, пока энергия атома не уменьшится до уровня, ниже которого передача энергии, большей  $E_{см}$ , становится невозможной. Затем атомы продолжают сталкиваться, но уже не смещают атомы и замедляются до энергии сублимации  $E_{суб}$  и затем принимают участие в тепловом движении атомов решетки.

Максимальная энергия, которую может ион передать атому при лобовом соударении, равна

$$E_{\max} = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot E, \quad (3.23)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – масса иона и атома мишени;  
 $E$  – энергия иона.

Смещенный атом характеризуется средней энергией  $\bar{E}$ , величина которой зависит от вида взаимодействия. Если смещенный атом получит энергию больше  $E_{cm}$  и импульс энергии будет направлен в сторону поверхности, то он может покинуть эту поверхность и стать распыленным атомом. Энергию смещения можно оценить, зная энергию сублимации для материала мишени  $E_{суб}$ . При сублимации происходит удаление атомов с поверхности, где действует только половина связей. Для удаления атома из объема мишени уже необходима энергия  $2E_{суб}$ . При столкновениях атом не только выбивается из занимаемого положения, но и внедряется в решетку, смещая другие атомы. Для удаления таких атомов необходима энергия не меньше  $4E_{суб}$ . Следовательно, процесс выбивания атомов из поверхности и их выброс в вакуум будет иметь место, если смещенные атомы получают энергию более  $4E_{суб}$ .

Вылет атомов из мишени в вакуум зависит как от энергии, так и от импульса, полученного им от иона или от быстрых смещенных атомов. Действительно, атом, который получил импульс, направленный внутрь мишени, не сможет вылететь из вещества. Если в результате соударения с другими атомами он получит импульс, направленный к поверхности, и сохранит при своем движении к ней достаточную энергию, чтобы преодолеть энергию связи, то такой атом вылетит из вещества. Импульсную теорию ионного распыления подтверждают следующие экспериментальные результаты.

При бомбардировке мишени электронами для распыления была бы необходима намного большая кинетическая энергия (например, 500 кэВ для меди), чем для ионов. Это обусловлено тем, что обмен энергиями между легким электроном и тяжелым атомом мишени весьма неэффективен. Ток вторичных электронов, измеренный при распылении, очень мал. Это говорит о том,

что отсутствует нагрев до высоких температур и термоэлектронная эмиссия.

Для поликристаллических и аморфных материалов в диапазоне температур до 600 К значение коэффициента распыления не зависит от температуры мишени. При дальнейшем повышении температуры коэффициент распыления должен уменьшаться, так как сечение смещения атомов материала бомбардирующими ионами уменьшается с ростом температуры. Наблюдаемые в ряде случаев аномальные зависимости от температуры мишени могут быть вызваны удалением загрязнений, структурными превращениями или началом испарения материала.

Зависимости коэффициента распыления от массы бомбардирующих ионов, их энергии, угла падения ионов и кристаллической структуры мишени также объясняются импульсным механизмом распыления.

### *Энергия распыленных атомов*

Вопрос об энергии распыленных атомов имеет большое значение для понимания процессов ионного распыления. Энергия атомов при распылении гораздо больше энергии атомов при испарении. Это подтверждается измерениями скоростей распыленных атомов различными методами. Средняя энергия атомов меди, распыленных ионами криптона с энергией 900 эВ, составляет 5 эВ, что эквивалентно температуре 58000 К, в то время как средняя энергия испаренных атомов при температуре испарения меди 1500 К составляет 0,2 эВ. При увеличении энергии бомбардирующих ионов увеличивается доля атомов с энергиями в десятки и даже сотни электронвольт. Большие энергии распыленных атомов могут быть объяснены только с позиций импульсного механизма и опровергают термическую теорию распыления.

### *Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов*

На рис. 3.14 представлена зависимость коэффициента распыления меди, бомбардируемой ионами аргона с энергией в интервале от 10 до 150000 эВ. Эта форма кривой типична для лю-

бого элемента. Эту зависимость можно приблизительно разделить на 5 областей.

Область I отвечает интервалу энергий ионов, слишком малых, чтобы вызвать какое-либо распыление. По-видимому, она простирается до порога распыления. Пороговая энергия  $E_{пор}$  представляет собой наименьшую энергию иона, необходимую для удаления с поверхности атома, связанного с решеткой максимально возможным числом связей. Ее можно определить из условия

$$E_{пор} \cdot \alpha \geq E_{суб},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, определяющий максимальную долю энергии, которую ион может передать атому.

Он зависит от соотношения масс иона  $M_1$  и атома  $M_2$

$$\alpha = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}. \quad (3.24)$$

Для комбинации серебро-ион ртути  $\alpha=0,9$  и  $E_{пор}=3$  эВ при энергии сублимации серебра 2,7 эВ. Если  $\alpha$  мало, например, для комбинации алюминий-ион водорода  $\alpha=0,13$ , то  $E_{пор}=24,5$  эВ.

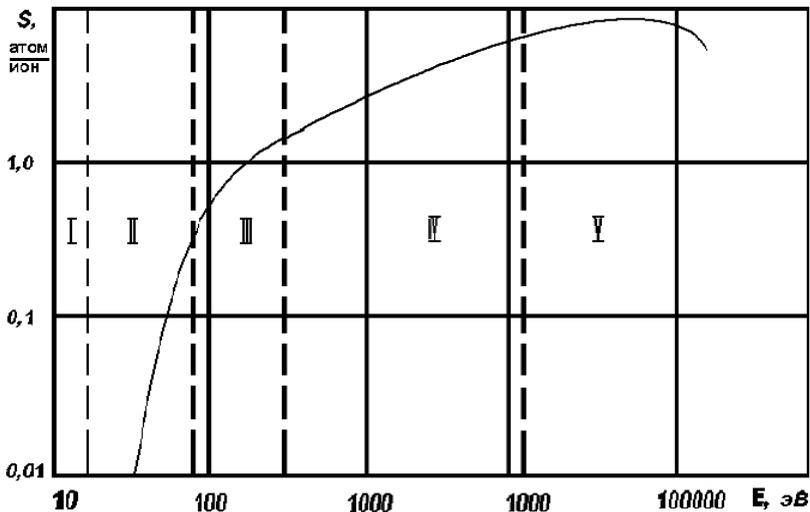


Рис. 3.14 – Коэффициент распыления поликристаллической меди, бомбардируемой ионами аргона ( $Ar^+$ )

В области II распыление уже начинается, однако с очень малой скоростью, и коэффициент распыления быстро возрастает при сравнительно малом увеличении энергии.

В области III с возрастанием энергии ионов коэффициент распыления увеличивается приблизительно линейно, а величина его становится достаточно большой для практического использования ионного распыления при нанесении тонких пленок.

В области IV, представляющей наибольший интерес при изготовлении пленок, коэффициент распыления продолжает увеличиваться с ростом энергии ионов, однако уже медленнее, чем в областях I-III. Снижение скорости роста коэффициента распыления при увеличении энергии ионов можно объяснить тем, что ионы большей энергии глубже проникают в мишень и, следовательно, не все атомы, выбитые со своих мест в решетке бомбардирующим ионом, смогут достичь поверхности и покинуть ее.

В области V имеется широкий максимум, где коэффициент распыления почти не зависит от энергии ионов. Затем кривая идет вниз, так как глубина проникновения ионов становится настолько большой, что коэффициент распыления уменьшается. Для легких ионов, таких как водород или гелий, максимум достигается уже при нескольких тысячах электрон-вольт, поскольку эти легкие ионы довольно свободно проникают вглубь материала. Для тяжелых ионов, таких как ксенон или ртуть, максимум может не достигаться даже при энергиях 50000 эВ или выше. Следовательно, на характер зависимости коэффициента распыления от энергии  $S(E)$  существенное значение оказывает отношение масс иона и атома мишени. Поэтому установленные из опытов закономерности действительны лишь в определенных пределах. В интервале энергий 50–400 эВ наблюдается линейный рост коэффициента распыления с увеличением энергии ионов  $E$  (область II)  $S = AE$ . Когда  $E > 700$  эВ, зависимость примерно можно описать формулой  $S = B\sqrt{E}$ . Последняя зависимость имеет место в диапазоне энергий:  $E = 0,7-70$  кэВ при  $M_1 > M_2$ ;  $E = 0,7-5(10)$  кэВ при  $M_1 < M_2$ ;  $E = 0,7-20$  кэВ при  $M_1 = M_2$ . Постоянные  $A$  и  $B$  характеризуют ион и атом вещества.

### *Влияние угла падения ионов на коэффициент распыления*

В условиях тлеющего разряда управлять углом падения ионов на катод или мишень не представляется возможным. В связи с этим зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов начали изучать при помощи пучков ионов. С точки зрения импульсной теории распыления должна существовать зависимость

$$S_{\varphi} = S_0 \sec \varphi, \quad (3.25)$$

где  $S_{\varphi}$  – коэффициент распыления для угла падения ионов  $\varphi$ ,  
 $S_0$  – то же для  $\varphi = 0^\circ$ .

С ростом угла падения ионов на поверхность распыляемого материала от 0 (отсчет ведется от нормали к поверхности) до 60–70° наблюдается увеличение коэффициента распыления материалов.

Зависимость (3.25) легко объяснить, исходя из механизма физического распыления. Коэффициент распыления при нормальном падении ионов прямо пропорционален энергии, рассеиваемой в поверхностном слое материала, в пределах которого упругие столкновения с атомами будут приводить к распылению. При угле падения  $\alpha$  длина пробега ионов, а следовательно, и число столкновений в этом поверхностном слое будут в  $1/\cos \alpha$  раз больше. Значение угла падения ионов  $\alpha_{\max}$ , при котором наблюдается максимальный коэффициент распыления материала  $S_{\max}$ , зависит от энергии ионов. Значение  $\alpha_{\max}$  в зависимости от энергии ионов  $E$  можно приблизительно рассчитать по формуле Линдхарда

$$\alpha_{\max} = \frac{\pi}{2} - \left[ \frac{5\pi a^2 N_0^{2/3} Z_1 Z_2 E_R}{E(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})} \right]^{1/2},$$

где  $a$  – радиус экранирования ядра орбитальными электронами;

$N_0$  – атомная плотность распыляемого материала;

$Z_1, Z_2$  – атомные номера иона и атома мишени;

$E_R = 13,5$  эВ – энергия связи электрона в атоме водорода.

Увеличение угла падения от 60–70 до 90 градусов приводит к уменьшению коэффициента распыления до нуля из-за отражения ионов от поверхности материала.

Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов не представляет большого интереса при осаждении тонких пленок, но очень важна при использовании ионно-плазменных процессов для травления микрорельефа.

### *Распыление монокристаллов*

Кристаллическое строение веществ оказывает существенное влияние на взаимодействие ионов или атомов с веществом. Это особенно ярко проявляется при распылении монокристаллов, когда атомы эмитируются вдоль направлений плотноупакованных цепочек атомов и следующих за ними по плотности упаковки. Р.Г. Силсби в 1957г. дал объяснение указанному явлению, открыв геометрические свойства атомных цепочек фокусировать столкновения атомов или, точнее, фокусировать направление импульса, который получает один из атомов цепочки. Налетающие на мишень ионы вызывают цепочки сфокусированных столкновений подобных тем, которые наблюдаются при соударении бильярдного шара с плотноупакованной группой подобных шаров. Схема действия механизма фокусировки показана на рис. 3.15.

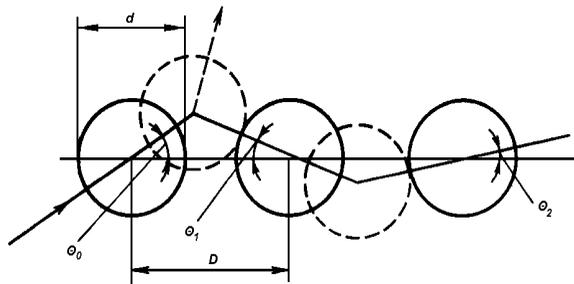


Рис. 3.15 – Схема действия механизма фокусировки

Рассматривая механизм взаимодействия частиц как соударение одинаковых твердых сфер диаметром  $d$ , расположенных

вдоль оси  $x$  на расстоянии  $D$  друг от друга, для малых значений  $\theta_0$  – угла налета частицы, можно записать

$$\theta_1 = \theta_0 \left( \frac{D}{d} - 1 \right),$$

где  $\theta_1$  – угол между осью  $x$  и направлением смещения второго атома в цепочке столкновений.

Фокусировка Силсби наблюдается в том случае, когда  $\theta_1/\theta_0 < 1$ . При этом условии угол  $\theta$  монотонно убывает по направлению  $x$ . В кристалле межатомные расстояния  $D$  зависят от направления в решетке, причем величина их минимальна в направлениях плотнейшей упаковки, поэтому в этих направлениях вероятность фокусировки высока и коэффициент распыления также должен быть высоким.

Таким образом, направленная эмиссия вдоль плотноупакованных направлений кристаллов обусловлена геометрическими свойствами цепочки атомов. Анизотропный характер распыления монокристаллов ясно указывает на импульсный механизм ионного распыления, так как при испарении монокристаллов испаряемые атомы имеют угловое распределение, которое описывается законом косинуса, являющимся следствием диффузного отражения молекул атомов от поверхности твердого тела (изотропное распределение).

### 3.2.3 Скорость осаждения пленок

Для количественной характеристики процесса ионного распыления вводится величина скорости распыления, определяемая коэффициентом распыления  $S$ , количеством бомбардирующих ионов  $N_u$  и плотностью материала мишени  $N_0$

$$V_p = \frac{N_u S}{N_0}. \quad (3.26)$$

Величина  $N_u$  зависит от плотности ионного тока в ионном пучке  $j$ , поступающем на мишень (катод)

$$N_u = \frac{j}{en}, \quad (3.27)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$n$  – кратность заряда иона;  
 $j$  – плотность ионного тока.

При расчете скорости осаждения пленок на подложке необходимо кроме скорости распыления учитывать расстояние от мишени до подложки и конфигурацию электродов. Для дисковой мишени и круглой подложки, расположенных параллельно друг другу, получена следующая формула для скорости осаждения

$$V_{oc} = V_p \cdot \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{r_k^2 - h^2 - r_n^2}{\left[ r_k^4 + 2(h^2 - r_n^2) \cdot r_k^2 + (h^2 + r_n^2)^2 \right]^{1/2}} \right\}, \quad (3.28)$$

где  $r_k$  – радиус мишени (катода);  
 $h$  – расстояние между мишенью и подложкой;  
 $r_n$  – радиус подложки;  
 $V_p$  – скорость распыления.

Зная скорость осаждения, можно определить толщину пленки  $d$ , наращиваемую за определенное время в разных точках подложки. Это позволяет оценить равномерность толщины пленки по подложке.

В экспериментальных исследованиях наблюдается уменьшение скорости осаждения пленок, когда давление рабочего газа превышает 1 Па. Это объясняется увеличением вероятности возвращения распыленных атомов на мишень из-за обратной диффузии и обратного рассеяния (отражения) с ростом давления газа. Учет этого явления в расчетах скорости осаждения дается в [9].

### 3.2.4 Получение пленок ионно-плазменным распылением

Получение чистых пленок полупроводников, металлов, сплавов и соединений реализуется путем распыления соответствующих мишеней в инертном газе, чаще всего в аргоне. Для реализации ионного распыления вакуумная установка предварительно откачивается до высокого вакуума ( $10^{-2}$ – $10^{-3}$ ) Па, затем напускается аргон до рабочего давления, при котором можно зажечь разряд. В диодных системах распыления (см. рис. 3.12)

разряд поддерживается при требуемых параметрах разряда  $U_p$  и токе разряда. Ионы аргона, ускоренные катодным падением потенциала, близким к  $U_p$ , бомбардируют поверхность катода. Катод выполняется из распыляемого материала или изготавливается специальная мишень. Энергию ионов можно приблизительно считать равной  $U_p$ . Разрядный ток определяет количество ионов, падающих на мишень, а, следовательно, и скорость распыления. Ионное распыление рекомендуется для получения пленок тугоплавких металлов вольфрама, молибдена, тантала, рения, циркония и др. Этот метод широко используется для получения пленок алюминия с добавкой кремния для металлизации в технологии полупроводниковых интегральных схем.

Для осаждения пленок сплавов метод ионного распыления имеет ряд преимуществ перед методом термического испарения. Химический состав напыленных пленок обычно соответствует составу катода-мишени даже в том случае, если компоненты сплава характеризуются различными коэффициентами распыления. Это объясняется тем, что спустя некоторое время после того, как компонент с наибольшей скоростью распыления покинет катод, поверхность катода обогащается другим компонентом до тех пор, пока не установится «стационарный» состав поверхности. По достижении этого состояния напыленная пленка будет иметь тот же состав, что и катод. Иначе обстоит дело при испарении: из-за высокой температуры испарения вещество из внутренних участков быстро диффундирует к поверхности. Если бы при распылении температура катода повысилась настолько, что диффузия из объема стала бы значительной, то напыленные пленки по составу отличались бы от катода.

При распылении сложных соединений не происходит диссоциации, что позволяет получать пленки стехиометрического состава. Этим способом получены пленки таких составов, как  $\text{InSb}$ ,  $\text{GeSb}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$  и др. с хорошей стехиометрией.

С помощью ионного распыления можно проводить эпитаксиальное наращивание различных металлических и полупроводниковых пленок. При ионном распылении эпитаксиальный рост может происходить при меньших температурах, чем при напылении. Были получены монокристаллические пленки  $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$  и др. на  $\text{NaCl}$  при комнатной температуре. Венер

получил монокристаллические пленки германия на подложке из германия при температуре подложки 300 °С.

Достоинством ионного распыления является возможность получения пленок тугоплавких соединений, таких как бориды, оксиды, нитриды и др. Процесс распыления практически не зависит от температуры плавления материала. Однако следует помнить, что если мишень выполнена из изолирующего материала, то производить распыление на постоянном токе невозможно. При отрицательном потенциале на мишени она зарядится положительно и далее на нее поступать ионы не будут. Поэтому прибегают к распылению на высокой частоте.

Преднамеренное введение реакционно-способного газа в распылительную среду с целью изменения или управления свойствами пленок называют реактивным распылением. Этим методом были получены пленки изолирующих и полупроводниковых соединений различных металлов. Это достигалось путем введения в распылительную среду кислорода или использования чистого кислорода. Кроме того, были получены нитриды, карбиды и сульфиды с помощью соответственно азота, метана или окиси углерода и сернистого водорода. Для осаждения диэлектриков чаще всего используют смесь инертного газа с относительно небольшой добавкой активного газа. В зависимости от давления активного газа реакция образования соединения может протекать либо на катоде (мишени), и тогда к подложке переносится готовое соединение, либо на подложке в процессе образования пленки. При низких давлениях более вероятен второй из указанных механизмов, при высоких – первый. Считается также, что реакция может протекать и в паровой фазе между атомами распыляемого материала и атомами газа, но такой процесс маловероятен.

Метод реактивного распыления – один из важнейших в тонкопленочной технологии, позволяющий управляемо изменять свойства пленок. Это можно продемонстрировать на примере распыления тантала в различных средах с добавлением активных газов. На рис. 3.16 показана зависимость удельного сопротивления получаемых пленок от парциального давления активных газов. Наименьшее из показанных парциальных давлений  $10^{-4}$  Па соответствует остаточному давлению перед напус-

ком рабочего газа, состоящего из смеси аргона и активного газа. Суммарное давление смеси газов составляет 1 Па. По мере повышения давления азота сопротивление растет вследствие захвата пленкой азота с образованием соединения  $Ta_2N$ . При дальнейшем увеличении давления азота состав пленок изменяется, пока не образуется фаза, приписываемая  $TaN$ . По мере увеличения парциального давления кислорода до относительно высокого уровня пленка по составу приближается к окиси тантала и удельное сопротивление ее быстро увеличивается. При введении окиси углерода образуются пленки карбида тантала с переменным сопротивлением. Таким образом, на основе пленок тантала можно изготовить тонкопленочную интегральную схему с проводниками из тантала, резисторами из нитрида тантала и конденсаторами тантал-окисел тантала-золото.

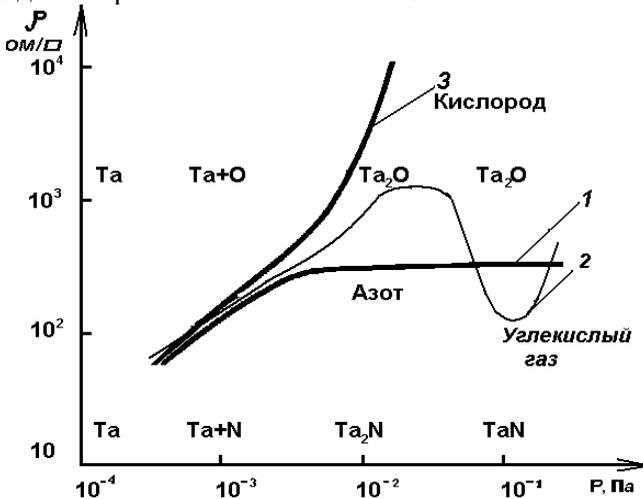


Рис. 3.16 – Зависимость удельного сопротивления пленок тантала от парциального давления активных газов: 1 – азот; 2 – углекислый газ; 3 – кислород

Ионное распыление является достаточно технологичным методом для получения пленок  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ ,  $SiO_2$  путем реактивного или высокочастотного распыления.

Магнитные пленки, служащие носителем информации, такие, как Fe-Ni, с точным содержанием компонент получают как термическим испарением в высоком вакууме, так и в чистых условиях ионным распылением. В первом случае борьба ведется с нестехиометричностью полученной пленки, во втором случае – с процессами окисления осаждаемого слоя.

Распыление с разделением камеры формирования разряда и камеры осаждения пленок служит для получения чистых пленок для нужд микроэлектроники.

Различные способы ионного и ионно-плазменного осаждения тонких пленок приведены в [8].

## 4 ЭЛЕМЕНТЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

### 4.1 Подложки пленочных ИМС

#### 4.1.1 Материалы подложек

Подложки в технологии изготовления пленочных и гибридных ИМС играют очень важную роль. Подложки являются основанием для группового формирования на них ИМС, главным элементом конструкции ИМС, выполняющим роль механической опоры, обеспечивают теплоотвод и электрическую изоляцию элементов.

**Подложка предназначена для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных ИМС, межэлементных и межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.**

Материал, геометрические размеры и состояние поверхности подложек во многом определяют качество формируемых элементов и надежность функционирования ИМС и микросборок. Различные способы формирования пленочных элементов, монтажа и сборки, а также многообразие выполняемых гибридными ИМС функций диктуют разнообразные и даже противоречивые требования к подложкам. В настоящее время нет такого материала для подложек, который в одинаковой мере удовлетворял бы этим разнообразным требованиям. Для изготовления подложек в основном используют стекло, керамику, ситалл.

**Стекло.** Для подложек используют боросиликатные и алюмосиликатные стекла. Путем листового проката этих стекол получают достаточно гладкую поверхность, не прибегая к полированию.

Применение щелочных стекол, содержащих окислы  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ , ограничено нестабильностью их свойств, поскольку при нагреве в электрическом поле наблюдается интенсивное выщелачивание. К недостаткам подложек из стекла следует отнести малую теплопроводность, что не позволяет применять их при повышенном нагреве. При интенсивном нагреве предпочтительнее кварц и кварцевое стекло. Подложки из стекла имеют аморфную структуру.

**Керамика.** Исходными материалами являются порошкообразные окислы. Смесь окислов отжигают при 1000 °С и измельчают до однородного размера зерна. Добавляют около 2 % связующего вещества, а затем прессуют или делают в виде ленты, пропуская под режущим инструментом. Ленту высушивают на воздухе для удаления растворителя. Затем из ленты вырезают подложки желаемой формы. Можно сделать отверстия или направляющие кромки. Вырезанные подложки спекают при 1500–1700 °С.

Керамики изготавливаются с различным содержанием окислов: алюминиевая керамика –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от 96 % до 99,9 %; бериллиевая керамика  $\text{BeO}$  – 99,5 %. Чем меньше в керамике содержится связующего вещества, тем прочнее керамика. Прочность связующего вещества значительно ниже прочности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  или  $\text{BeO}$ , поэтому полученное спеканием изделие при больших нагрузках разрушается по связующему веществу. Увеличение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в керамике значительно улучшает ее свойства, а именно, увеличиваются **механическая прочность, теплопроводность**, улучшаются **электрические** свойства.

После спекания керамика имеет шероховатую поверхность. Эту поверхность улучшают шлифовкой и полировкой, но это дорого. Для улучшения поверхности керамику покрывают стеклянной глазурью и еще раз отжигают. Керамические подложки имеют **поликристаллическую** структуру.

**Синтетический сапфир** – это монокристаллическая окись алюминия. Прокаленный порошок алюмоаммониевых квасцов расплавляют в кислородно-водородном пламени и выращивают монокристаллическую булю, которую разрезают на пластины и полируют.

**Ситаллы** – стеклокристаллический материал. Ситалл отличается от стекла наличием микрокристаллической фазы, занимающей от 50 до 95 % всего объема. Это резко повышает механическую прочность ситалла и улучшает его электрические свойства. Искусственную кристаллизацию стекла для получения ситалла производят путем введения в шихту катализаторов, способных образовывать зародыши кристаллизации. Если это происходит при фотохимическом процессе, то полученный материал называют фотоситаллом. Например, если в шихту ввести ионы  $\text{Ag}$  и облучить светом, то серебро восстанавливается до металла, и получаем большое число зародышей кристаллизации,

равномерно распределенных во всем объеме. Для изготовления подложек чаще всего используется марка СТ50-1.

Геометрические размеры подложек стандартизированы. Подложки из стекла имеют размеры 50x50, 48x60, 60x96, 100x100 и 96x120 мм, из керамики и ситалла – 48x60, 60x96 и 96x120, из сапфира – 24x30 мм. Толщина составляет 0,6–1 мм. Деление подложек с ИМС на части, кратные двум и трем, дает нормализованный ряд типоразмеров плат.

В последнее время для изготовления гибридных БИС и микросборок применяют гибкие подложки из полимерных материалов. Наибольшее распространение получили полиимидные пленки толщиной 40–50 мкм, которые допускают двустороннюю обработку и вакуумное нанесение тонких пленок для создания двухслойной разводки, а также травления отверстий для создания металлизированных переходов между слоями. Основными преимуществами гибких подложек являются способность изгибаться и свертываться в трех плоскостях, принимать форму корпуса сложной конструкции; а также малые толщины и масса; ударопрочность.

Наиболее перспективными для гибридных БИС и микросборок являются металлические подложки (платы), поверхность которых покрывают относительно тонким (40–60 мкм) слоем диэлектрика. Для этих целей используют алюминиевые пластины с анодированной поверхностью, стальные пластины, покрытые стеклом или полиимидным лаком, и др. Металлические подложки существенно улучшают теплоотвод от компонентов, обеспечивают необходимую жесткость конструкции гибридных ИМС и микросборок.

#### 4.1.2 Свойства подложечных материалов

**Шероховатость поверхности.** Состояние поверхности подложки оказывает существенное влияние на структуру наносимых пленок и параметры пленочных элементов. Большая шероховатость поверхности подложки, наличие на ней микронеровностей уменьшают толщину пленок, вызывают локальное изменение электрофизических свойств пленок и тем самым снижают воспроизводимость параметров пленочных элементов и их надежность.

Поэтому подложки для тонкопленочных ИМС должны иметь минимальную шероховатость, быть без пор и трещин. Так, при нанесении тонких пленок толщиной до 100 нм допустимая высота микронеровностей не должна превышать 25 нм, что соответствует 14-му классу чистоты поверхности подложек.

Толстые пленки наносят толщиной до 50 мкм, поэтому подложки для толстопленочных ИМС могут иметь микронеровности до 2 мкм, что соответствует восьмому классу чистоты (не хуже).

Шероховатость поверхности подложек зависит от материала подложек и способов их обработки (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Шероховатость подложек

Материал подложки	Стекла, сапфир	Глазурованные и полированные керамики, ситалл	Свежеотожженная керамика 99,5 % $Al_2O_3$	Керамика 96 % $Al_2O_3$
Высота неровностей, мкм	0,025	0,05	1	1,5
Класс чистоты	14	13-14	10	9

Для стекол наблюдаются случайные неровности, обусловленные нерегулярностями вытягивания. Они малы. Такой же характер носит поверхность глазурованной керамики и полированного сапфира. Высота неровностей для мелкозернистой керамики (96 %  $Al_2O_3$ ) составляет 1,5 мкм и на длине 20 мкм – два пика, а для керамики 99,5 %  $Al_2O_3$  амплитуда пиков меньше (1 мкм), но на той же длине умещается уже три пика. Керамику можно полировать и, если размеры зерен малы, обработанная поверхность может быть столь же гладкой, как поверхность стекла. Однако это сильно увеличивает стоимость подложек.

**Плоскостность** необходима для качественной работы установок совмещения. На четкость линий в фотолитографии особенно влияет волнистость поверхности. Если при экспонировании

нии поверхность фоторезиста не приведена в совершенный контакт с фотошаблоном, то свет будет попадать на периферию непрозрачных участков, и четкость будет ухудшаться. И керамикам, и стеклам присуща волнистость поверхности, причем для керамик положение еще больше осложняется из-за искривления в процессе отжига, а также при операции глазурирования.

Для подложек с большим радиусом кривизны  $R$  допустимы отклонения от плоскостности 50 мкм/см, при малом  $R$  недопустимы отклонения даже 10 мкм/см. Характерные отклонения от плоскостности для различных материалов подложек представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Отклонения от плоскостности

Материал подложки	Полированные поверхности	Стекло	Керамики, ситалл
Отклонения, мкм/см	<1	40	50

**Теплопроводность.** Материал подложки должен обладать хорошей теплопроводностью, что позволяет избежать возникновения в микросхеме местного перегрева, вызывающего изменение характеристик или даже разрушения пленок. Подложка, изготовленная из материала с высокой теплопроводностью, обеспечивает выравнивание температурного градиента по всей поверхности, а также отвод тепла от микросхем. Стекла имеют очень малую теплопроводность. Из подложечных материалов высокой теплопроводностью обладает керамика на основе бериллия. Теплопроводность подложечных материалов представлена в табл. 4.3. Теплопроводность меди взята за единицу.

Таблица 4.3 – Теплопроводность материалов

Материал подложки	Стекла, ситалл	Керамика на основе $Al_2O_3$	Керамика на основе $BeO$	Медь
Теплопроводность, отн. ед.	0,002-0,005	0,05	0,2	1

**Термическое расширение** характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Коэффициент термического расширения типичных подложечных материалов меньше, чем у металлов. Кроме того, обычно применяют многослойные металлические композиции, поэтому при подгонке ТКЛР пленки и подложки приходится искать некоторое компромиссное решение (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – ТКЛР пленок и подложек

Материал подложки	Al	Cu, Au	Ta	Стекла, ситалл	Керамики	Кварц (SiO <sub>2</sub> )
ТКЛР, 10 <sup>-6</sup> град <sup>-1</sup>	20	14	6,5	4,1–5	6	0,56

**Механическая прочность** приобретает важное значение, когда подложки надо сделать тонкими, так как это экономит материал и уменьшает вес ИМС. Обычно толщина подложек составляет десятые доли миллиметра. Толщина подложек из ситалла составляет 0,3–0,5 мм.

**Термическая стойкость.** В отношении термической стойкости материалы располагаются в том же порядке, что и в отношении температуры размягчения или плавления (табл. 4.5).

Таблица 4.5 – Температура размягчения материалов

Материал	Керамика 99,9 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> сапфир	96 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 98 % BeO	Кварц	Стекла, ситалл
T <sub>размягч.</sub> , °C	2040	1600	1580	620-750

**Химическая стойкость** существенна на всех стадиях обработки подложек. Почти все стекла содержат силикатные компоненты (SiO<sub>2</sub>), окислы щелочноземельных металлов Na<sub>2</sub>O, CaO и др. Поэтому поверхность этих подложек может ухудшаться при длительном воздействии влажной среды из-за выветривания, связанного с большим содержанием Na<sub>2</sub>O.

Все стекла из-за наличия SiO<sub>2</sub> подвержены действию плавиковой кислоты, используемой для травления тугоплавких ме-

таллов. Кроме того, может наблюдаться взаимодействие окислов щелочных металлов с пленками, приводящее к ухудшению свойств пленок. Отсюда следует, что из стекол в качестве подложек следует использовать бесщелочные стекла, например, алюмоборосиликатные стекла (С48-3, С41-1).

Наиболее химически стойки полированные керамические подложки на основе  $Al_2O_3$ ,  $BeO$  и сапфир.

**Электропроводность.** Считают, что все стекла и керамики, используемые в качестве подложечных материалов, являются хорошими изоляторами.

**Стоимость.** Если принять за единицу стоимости подложечного материала стоимость неглазурованной керамики с содержанием 99,5 %  $Al_2O_3$ , то стоимость стекол составит 0,04-0,65 керамики на основе  $BeO$  – 4, сапфира – 400.

#### 4.1.3 Очистка подложек

Пленки должны иметь прочную связь (адгезию) с подложкой. Эта связь не должна ухудшаться со временем или под воздействием электрического поля. Хорошая адгезия обеспечивается для таких материалов пленок, которые образуют переходной окисный слой с материалом подложки. Переходной слой обеспечивает отличную химическую связь с подложкой. Пленки алюминия и хрома имеют большое сродство к стеклянным и керамическим подложкам и образуют переходной слой. Пленки золота обладают плохой адгезией. Поэтому улучшать адгезию пленок из золота можно с помощью подслоя хрома или алюминия, а между хромом и золотом возникает прочная металлическая связь.

Загрязнение на подложке, имеющее толщину всего в несколько атомных слоев, может воспрепятствовать хорошему сцеплению, т.е. образованию хорошего окисного слоя и сильно ослабить адгезию. Даже мельчайшие посторонние частицы по своим размерам соизмеримы с толщиной пленки и поэтому оказывают существенное влияние на качество пленки. Загрязнения могут химически взаимодействовать с материалом пленки. Кроме того, известно, что на чистой и загрязненной подложках получают пленки различной структуры.

Поэтому при изготовлении тонкопленочных ИМС одним из важнейших условий обеспечения качества является **чистота подложки**.

**Удаление жиров.** Подложка имеет загрязнения, обусловленные операциями изготовления, контактом с человеком, пылью из воздуха и др. Для удаления жиров используют химическую очистку. Хорошие результаты при отмывке стеклянных подложек дает химическое травление их в едком натре или в едком кали с последующей обработкой в концентрированной хромовой смеси (хромпике), состоящей из раствора  $K_2Cr_2O_7$  в концентрированной серной кислоте. Более интенсивная очистка получается при обработке стеклянных подложек в кипящем растворе хромпика. Кислотные травители, взаимодействуя с загрязнениями, например, со смазками или с некоторыми окислами, превращают их в более растворимые соединения, щелочные же травители омыливают жиры и снижают их поверхностное натяжение.

Для заключительных промывок используют дистиллированную или деионизованную воду и изопропиловый спирт.

Кислотные травители воздействуют на поверхность подложки, поэтому в растворах кислот опасно обрабатывать керамику, ситалл и др. Такая обработка приводит к протравливанию поверхности с углублением рельефа, т.е. увеличивает шероховатость. Поэтому применяют для удаления жировых загрязнений органические растворители. Минеральные масла растворяются в углеводородах (трихлорэтилен, четыреххлористый углерод и др.), а растительные масла – в спирте (изопропиловый спирт).

Чаще всего используется следующая технология промывки подложек из стекла, керамики, ситалла. Для обезжиривания подложек используется состав: перекись водорода ( $H_2O_2$ ), аммиак ( $NH_4OH$ ) и вода. Подложки кипятятся в этом нейтральном растворе. Затем следует многократная промывка в дистиллированной воде.

Процесс растворения жировой пленки может быть ускорен наложением ультразвуковых колебаний.

Следует отметить, что чаще используется комбинация различных способов промывок, т.к. один способ не всегда обеспечивает удовлетворительные результаты.

Сушка подложек осуществляется с помощью сжатого очищенного воздуха или в печи при продувке очищенным Ag или N<sub>2</sub>.

Для **контроля степени очистки** подложек используются качественные и количественные методы контроля. Качественный контроль осуществляется по «черному блику», а количественный – по методу капли, царапины или путем контроля электропроводности деионизованной воды.

Свежеочищенная поверхность подложки обладает большим уровнем свободной энергии, что приводит к быстрому повторному загрязнению пылью и влагой из атмосферы, поэтому очень важно правильное хранение подложек между операциями. Оно должно быть не более суток. Даже чистая подложка, помещенная в вакуум, быстро сорбирует газы. Поэтому перед осаждением пленок подложка прогревается или подвергается очистке с помощью ионной бомбардировки.

## **4.2 Тонкопленочные резисторы**

### **4.2.1 Выбор материалов**

Основными элементами тонкопленочных микросхем являются подложка и система пассивных элементов, включающая резисторы, конденсаторы, индуктивности, проводники и контактные площадки.

Проблема создания тонкопленочных резисторов связана с технологическими вопросами получения следующих характеристик пленки резистивного материала:

- удельного сопротивления пленки, его воспроизводимости и стабильности во времени;
- удельной рассеиваемой мощности пленки;
- температурного коэффициента сопротивления (ТКС);
- эксплуатационных характеристик (спектра и уровня шумов и др.).

С учетом возможности получения данных характеристик резистивной пленки могут быть рассчитаны электрические па-

раметры и конструкция резисторов. Взаимосвязь конструктивных и технологических параметров резисторов устанавливается основным уравнением для их расчета

$$R = \frac{\rho_v \cdot l}{b \cdot d},$$

где  $R$  – сопротивление резистора, Ом;

$\rho_v$  – удельное объемное сопротивление материала резистивной пленки, Ом·м;

$l, b, d$  – соответственно длина, ширина и толщина резистора (рис. 4.1).

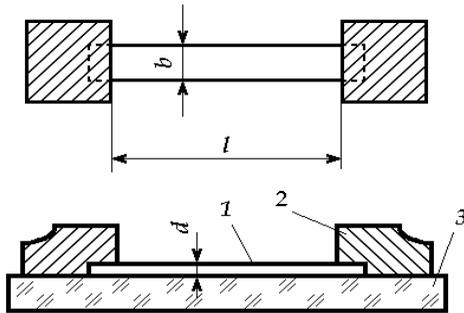


Рис. 4.1 – Тонкопленочный резистор: 1 – резистивная пленка; 2 – контактная пленка проводящего материала; 3 – подложка

При использовании одного и того же резистивного материала общей для всех резисторов микросхемы величиной, не зависящей от номинала резисторов и его размеров, является сопротивление резистивной пленки  $\rho_v$ . Проектируя тонкопленочные резисторы, предполагают также, что и толщина резистивной пленки одна и та же для всех одновременно изготавливаемых резисторов.

Это позволяет ввести понятие о  $\rho_s$  – поверхностном удельном сопротивлении резистивной пленки, величина которого определяется только удельным объемным сопротивлением материала резистивной пленки и его толщиной и численно равна сопротивлению квадратной формы с произвольным размером сто-

рон. Уравнение для сопротивления резистора при этом может быть записано как

$$R = \rho_s \frac{l}{b} = \rho_s K_\phi,$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы или число квадратов резистора.

Для получения пленочных резисторов с номиналами от единиц и долей ома до десятков и сотен мегом используются материалы, удельное сопротивление которых изменяется в широких пределах. Материалы тонкопленочных резисторов можно условно разделить на несколько групп: резистивные материалы на основе металлических сплавов и микрокомпозиций (смесей), полупроводниковые материалы и др. Данные по характеристикам резистивных материалов приведены в [5]. В качестве резистивных материалов на основе чистых металлов чаще всего используются хром и тантал с сопротивлением (100–200) Ом/€ и ТКС порядка  $(5–10) \cdot 10^{-4}$  1/град. Необходимость создания резистивных пленок с большими значениями удельного сопротивления порядка сотен и тысяч омов на квадрат заставила обратиться к новым типам материалов, в том числе и к металлическим сплавам. Пленки нихрома с толщиной 20–50 нм имеют  $\rho_s = (50–300)$  Ом/ и ТКС –  $2 \cdot 10^{-4}$  1/град. По своим свойствам к сплавам приближаются так называемые микрокомпозиции, в состав которых наряду с металлами вводятся полупроводники или диэлектрики. При использовании сплавов кремния в сочетании с некоторыми металлами образуется диэлектрическая фаза в виде окислов кремния в композиции с проводящей фазой дисилицидов металлов, многие из которых являются примесными полупроводниками с высоким удельным сопротивлением. До термостабилизации эти пленки имеют практически аморфную структуру и отрицательный ТКС, но после термообработки кристаллизуются; ТКС пленок при этом уменьшается. Структура таких сплавов однородна и обеспечивает малый уровень шумов. Увеличение процентного содержания диэлектрической фазы приводит к возрастанию удельного сопротивления микрокомпозиций с одновременным изменением величины ТКС в сторону отрицательных значений. Наиболее широко для изготовления микрокомпозиционных резисторов используются сплавы типа МЛТ.

Обычно в их состав входят в качестве основных веществ хром и кремний с добавками железа, никеля и алюминия. Для сплава МЛТ-3М удается с хорошей воспроизводимостью получать удельные сопротивления  $(200\text{--}800)\text{ Ом/}$  и ТКС –  $(60\text{--}150)\cdot 10^{-5}\text{ 1/град}$ .

Для получения резистивных пленок с  $\rho_s = 1\text{ кОм/}$  и более используют керметы, являющиеся частным случаем микрокомпозиций. В их состав входят металл и диэлектрик. Наиболее воспроизводимые результаты при высокой стабильности и низком значении ТКС в настоящее время удалось получить лишь для керметов хром (Cr) – моноокись кремния (SiO). Максимальное  $\rho_s$ , которое удалось получить для этих резисторов, составляет  $20\text{ кОм/}$ . Однако практически используются резисторы на основе Cr-SiO с  $\rho_s$  не более  $2000\text{ Ом/}$ .

В последнее время разработаны специальные сплавы, например, сплав РС-1004 для высокоомных резисторов с удельным сопротивлением  $40\text{--}50\text{ кОм/}$ . Основным недостатком этих резисторов является высокая абсолютная величина ТКС. Тем не менее, эти резисторы могут успешно применяться в высокоомных делителях напряжения. Полупроводниковые соединения PbO, SnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. являются высокоомными материалами, но мало изучены и не применяются для изготовления тонкопленочных резисторов.

#### 4.2.2 Технологические погрешности резисторов

Воспроизводимость номиналов резисторов определяется воспроизводимостью удельного поверхностного сопротивления и геометрии резистора. Для тонкопленочных резисторов обычно длина больше его ширины, поэтому воспроизводимость геометрии резистора будет определяться погрешностью получения ширины резистора. Эта погрешность будет определяться способом получения рисунка.

Для контактных масок при травлении резистивных пленок через маску шириной  $b_m$  возникает боковой подтрав  $2d$  (рис. 4.2).

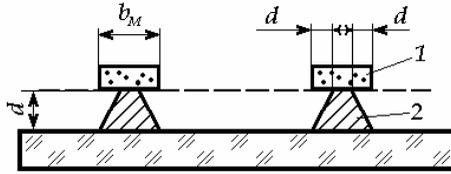


Рис. 4.2 – Процесс переноса изображения с контактной маски 1 на резистивную пленку 2

С учетом абсолютных погрешностей получим

$$b_p + \Delta b_R = (b_p + \Delta b_M) - 2(d + \Delta d), \quad (4.1)$$

где  $b_p$  – расчетная величина ширины резистора;

$\Delta b_R, \Delta b_M, \Delta d$  – соответственно абсолютные погрешности ширины резистора, маски и толщины резистивной пленки.

Преобразования приводят к следующей формуле

$$b_p \left( 1 + \frac{\Delta b_p}{b_p} \right) = b_p \left( 1 + \frac{\Delta b_M}{b_p} \right) - 2d \left( 1 + \frac{\Delta d}{d} \right),$$

отсюда

$$\frac{\Delta b_R}{b_p} = \frac{\Delta b_M}{b_p} - 2 \frac{d}{b_p} \left( 1 + \frac{\Delta d}{d} \right), \quad (4.2)$$

где  $\frac{\Delta b_R}{b_p}, \frac{\Delta b_M}{b_p}, \frac{\Delta d}{d}$  – относительные погрешности собственно ширины резистора  $\delta b_R$ , маски  $\delta b_M$  и толщины  $\delta d$ .

Абсолютная погрешность изготовления контактной фоторезистивной маски определяется ошибкой изготовления фотошаблона  $\Delta b_{фш}$ , ошибкой на операции совмещения и экспонирования  $\Delta b_{эксн}$  (параметр установки) и ошибкой  $\Delta b_{пр}$ , возникающей на операции проявления, равной удвоенной толщине слоя фоторезиста. Для подсчета полной ошибки контактной маски следует применить закон сложения ошибок

$$\Delta b_M = \sqrt{\Delta b_{фш}^2 + \Delta b_{эксн}^2 + \Delta b_{пр}^2}. \quad (4.3)$$

Погрешность по толщине  $\Delta d$  определяется воспроизводимостью процесса осаждения пленки и разбросом ее толщины по подложке и устанавливается экспериментально. Если есть необходимость, то погрешность по длине рассчитывается аналогично.

Для тонкопленочных резисторов, рисунок которых получен через свободную маску, ошибка по длине и ширине складывается из ошибки изготовления трафарета и ошибок, возникающих в процессе напыления. Ошибка трафарета зависит от способа его изготовления. В производстве наибольшее распространение получил фотохимический метод изготовления свободных масок, основанный на фотопереносе изображения с фотошаблона на металлическую заготовку маски с последующим ее травлением. Для биметаллической маски точность составляет  $\pm 10$  мкм. В процессе эксплуатации маска постепенно теряет свою точность вследствие осаждения на нее тонкопленочных слоев. Испаренное вещество одновременно осаждается на подложку и на края трафарета. В этом случае запыление рабочих окон шириной  $b$  составляет

$$\Delta b_{зан} = |2dn|,$$

где  $d$  – толщина напыляемой пленки;

$n$  – число напылений.

Допустимое число напылений зависит от размеров окон и требуемой точности.

Ошибки подпыления и затенения, возникающие в процессе напыления, поясняются рис. 4.3. Если поток частиц из испарителя в высоком вакууме считать прямолинейным, то часть участков трафарета может экранировать подложку. Эффект затенения зависит от толщины трафарета и взаимного расположения элементов системы испаритель-трафарет-подложка. Из рис. 4.3. ошибка затенения определяется

$$\Delta b_{зан} = (t + s) \cdot \operatorname{tg} \varphi = (t + s) \cdot \frac{x}{h},$$

где  $x$  – удаление элемента от центра подложки;

$h$  – кратчайшее расстояние от испарителя до подложки;

$s$  – зазор между трафаретом и подложкой;

$t$  – толщина трафарета.

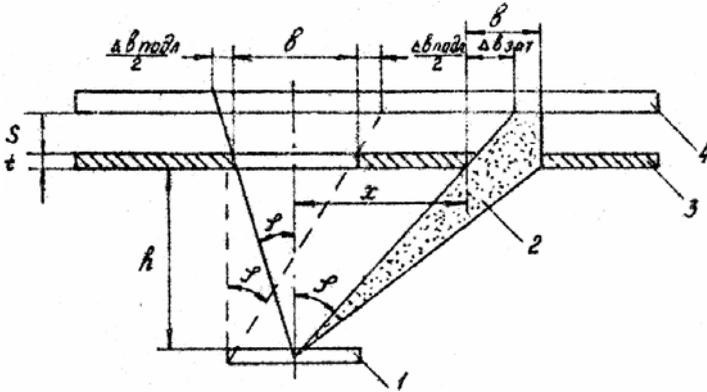


Рис. 4.3 – К расчету ошибок подпыления и затенения:  
 1 – испаритель; 2 – молекулярный поток;  
 3 – свободная маска (трафарет); 4 – подложка

Рассмотренный случай является простейшим. При сложной форме рабочих окон трафарета проекция тени может сильно отличаться от фактической формы окна. Если испаритель имеет форму нити или лодочки, то учет появления тени затруднен. Эта погрешность может быть уменьшена за счет рационального размещения прорезей в трафарете и испарителя, а также за счет введения нескольких испарителей.

При наличии зазора между трафаретом и подложкой возникает подпыление. Из рис. 4.3 для точечного испарителя

$$\frac{\Delta b_{\text{подп}}}{2} = s \cdot \operatorname{tg} \varphi = s \cdot \frac{b/2}{h+t}.$$

При  $t \ll h$

$$\Delta b_{\text{подп}} = \frac{s \cdot b}{h}.$$

Для поверхностного испарителя (рис. 4.3)

$$\Delta b_{\text{подп}} = \frac{s(L+b)}{h},$$

где  $b$  – ширина резистора;  
 $L$  – длина испарителя.

На ошибку подпыления существенное влияние оказывает давление остаточных газов в рабочей камере в процессе напыления. С увеличением этого давления ошибка подпыления очень сильно возрастает. Эффект подпыления является одной из причин, почему свободные маски не используются при катодном распылении, которое реализуется при высоких давлениях.

Полная ошибка напыления определяется

$$\Delta b_{\text{нан}} = \sqrt{\Delta b_{\text{зан}}^2 + \Delta b_{\text{зат}}^2 + \Delta b_{\text{подп}}^2}.$$

С учетом ошибки изготовления трафарета

$$\Delta b = \sqrt{\Delta b_{\text{траф}}^2 + \Delta b_{\text{нан}}^2}.$$

Погрешность по длине рассчитывается аналогично.

### 4.3 Тонкопленочные конденсаторы

#### 4.3.1 Параметры тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочный конденсатор (ТПК) конструктивно представляет собой многослойную структуру, в простейшем случае состоящую из двух металлических обкладок, разделенных слоем диэлектрика (рис. 4.4).

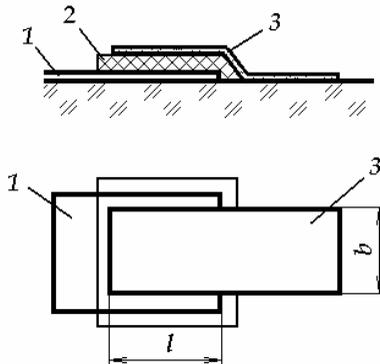


Рис. 4.4 – Тонкопленочный конденсатор: 1 – нижняя обкладка; 2 – диэлектрик; 3 – верхняя обкладка;  $l$  и  $b$  – длина и ширина площади перекрытия верхней и нижней обкладок конденсатора

Основные электрические параметры ТПК: емкость  $C$ , рабочее напряжение  $U_{\text{раб}}$ , тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) и эксплуатационные параметры определяются многочисленными факторами, в том числе материалами, способами напыления, толщиной пленок и др. Конструкция и технология изготовления конденсаторов имеют ряд особенностей. Емкость конденсатора определяется как

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon s}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot l \cdot b}{d}, \quad (4.4)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная материала;

$s$  – поперечное сечение обкладок конденсатора (активная площадь);

$l, b$  – длина и ширина обкладок;

$d$  – толщина диэлектрической пленки.

Поскольку свойства материалов, полученных в виде тонких пленок, могут значительно отличаться от свойств массивных образцов, при проектировании конденсаторов и разработке технологии их изготовления используют понятие об удельной емкости  $C_0$ , как одной из характеристик диэлектрического слоя

$$C_0 = \frac{C}{s} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d}.$$

Чем больше  $C_0$ , тем меньшую площадь занимает конденсатор на подложке. Надо выбирать материалы с большим  $\varepsilon$  или делать слишком тонкой диэлектрическую пленку. Однако применение слишком тонких пленок исключается, так как пленки менее 100–200 нм содержат большое количество дефектов.

Второй параметр, характеризующий свойства ТПК, – электрическая прочность  $E_{\text{нр}}$ , т.е. напряженность электрического поля, при которой происходит пробой конденсатора. Электрическая прочность определяется экспериментально по пробивному напряжению  $U_{\text{нр}}$  как  $E_{\text{нр}} = U_{\text{нр}} / d$ . Электрическая прочность для средних толщин для одного и того же материала, полученного известным способом, является величиной постоянной. Очевид-

но, что рабочее напряжение конденсатора должно быть меньше напряжения пробоя, т.е.

$$U_{раб} = \frac{U_{np}}{K_3} = \frac{E_{np} \cdot d}{K_3},$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса ( $K_3 = 2 - 4$ ).

Из последнего соотношения можно сформулировать условие выбора минимальной толщины диэлектрика

$$d \geq \frac{U_{раб} K_3}{E_{np}}.$$

Если из этого условия толщина диэлектрической пленки получается менее 100 нм, то надо выбирать толщину, исходя из технологических соображений, в диапазоне 100–200 нм.

Кроме диэлектрических потерь, в конденсаторе имеется еще один источник потерь, связанный с сопротивлением обоих электродов

$$tg \delta = tg \delta' + \frac{2\omega C \rho_v l}{3bd_1},$$

где  $tg \delta$  – измеряемый тангенс угла диэлектрических потерь;

$tg \delta'$  – частотно-независимый вклад диэлектрика;

$C$  – емкость конденсатора;

$\omega$  – угловая частота;

$\rho_v$  – удельное объемное сопротивление материала электродов;

$d_1$  – толщина электрода;

$l, b$  – длина и ширина площади перекрытия верхнего и нижнего электродов.

Из этого уравнения видно, что  $\rho_v, d_1$  и их соотношение сильно влияют на работу ТПК при высоких частотах. Ограничения по частоте для высокочастотных конденсаторов могут быть уменьшены увеличением толщины и проводимости металлических электродов.

Температурный коэффициент емкости характеризует изменение емкости в интервале температур от минус 65 до плюс 125 °С и стабильную работу ТПК.

### 4.3.2 Диэлектрические материалы

Рассмотренные параметры, а также эксплуатационные характеристики ТПК, такие, как надежность, временная стабильность, частотные свойства, определяются выбором материалов и способом их получения.

Рассмотрим свойства некоторых наиболее часто используемых диэлектрических материалов.

**Моноокись кремния (SiO)**, обычно получаемая термическим испарением, имеет диэлектрическую постоянную от 3,5 до 6, что соответствует изменению состава от двуоксида кремния  $\text{SiO}_2$  до чистой SiO, образует малодефектную и гладкую пленку. При температурах испарения более  $1250^\circ\text{C}$  SiO диссоциирует в испарителе с выделением свободного кремния, который может увеличивать  $\epsilon$  пленок до 10. При этом свойства пленок ухудшаются.

**Пленки окиси тантала ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )** получают ионно-плазменным распылением (реактивное, высокочастотное) или анодным окислением. Эти пленки характеризуются диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в диапазоне 16–25, и малой дефектностью для анодноокисляемых пленок. Электрическая прочность конденсаторов с использованием диэлектрика  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  сильно зависит от материалов электродов и способов их получения.

Пленки окиси алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с  $\epsilon = 8 - 10$  получают ионно-плазменным распылением, электронной бомбардировкой, анодным окислением. При испарении исходного вещества  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с помощью электронного луча пленки на подложке получаются нестехиометрического состава с дефицитом кислорода, что приводит к ухудшению свойств пленок.

При испарении окислов титана ( $\text{TiO}_2$ ) и циркония ( $\text{ZrO}_2$ ) получаются соответственно пленки с  $\epsilon = 30 - 40$  и  $\epsilon = 20 - 22$ . Электрическая прочность и другие параметры ТПК зависят от способов получения диэлектрических пленок и материала обкладок. Для плотных пленок  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  с электродами из алюминия электрическая прочность составляет  $E_{np} = 1 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ . Для изготовления конденсаторов малой емкости могут исполь-

зоваться пленки на основе боросиликатного стекла (80 %  $\text{SiO}_2$  и 20 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ ), имеющие  $\varepsilon = 4$  и  $E_{np} = 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ . Получаются такие пленки методом взрывного испарения.

### 4.3.3 Выбор материала обкладок

К материалам обкладок предъявляются следующие требования: низкое сопротивление 0,05–0,2 Ом/□, ровная и гладкая поверхность и малый коэффициент диффузии. Отказ ТПК чаще всего происходит из-за закорачивания, которое зависит как от качества диэлектрической пленки, так и от качества обкладок.

Очень зернистые пленки таких материалов, как **свинец** и **олово**, неприемлемы, т.к. их поверхность весьма шероховата. Мало пригодны также металлы с высокой температурой испарения (**хром**, **никель**, **железо**). Такие металлы приводят к большому количеству коротких замыканий, очевидно, вследствие проникновения атомов металла с большой кинетической энергией в диэлектрик при конденсации.

**Золото** и **серебро**, хотя имеют сравнительно низкую температуру испарения, также могут вызывать замыкание обкладок. Оно происходит из-за интенсивной диффузии атомов этих металлов из обкладок после осаждения (вдоль границ зерен).

Наилучший выход получается при использовании **алюминия**, который имеет низкую температуру испарения и малую подвижность атомов на поверхности, благодаря окислительным процессам. Надо обязательно исключить разбрызгивание, т.е. попадание крупных капель и прожигание диэлектрика при нанесении верхней обкладки.

Электрическая прочность ТПК на основе диэлектрической пленки  $\text{SiO}$  с различными материалами обкладок составляет:

$$\text{Al-SiO-Al} - 2 \cdot 10^6 \text{ В/см};$$

$$\text{Cu-SiO-Cu} - 0,8 \cdot 10^6 \text{ В/см};$$

$$\text{Ag-SiO-Ag} - 0,18 \cdot 10^6 \text{ В/см}.$$

Если применять свинец, олово, то  $E_{np}$  снижается в 10 – 20 раз, а количество коротких замыканий увеличивается в 10 раз. Для плотных диэлектрических пленок окиси тантала, получаемых

ионно-плазменным распылением или анодным окислением, можно в качестве материала обкладок выбирать такие металлы, как тантал, золото. Например, танталовый конденсатор делается следующим образом: сначала напыляется пленка тантала, затем она окисляется, а затем напыляется верхний электрод. Получается структура Ta-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Au, обеспечивающая хорошие параметры.

#### 4.4 Тонкопленочные индуктивности

Тонкопленочные катушки индуктивности обычно изготавливают в виде круглой или прямоугольной проводящей спирали, выполненной на поверхности диэлектрической подложки (рис. 4.5). Такая катушка индуктивности может быть охарактеризована набором параметров, среди которых в качестве основных можно выделить: индуктивность  $L$ , добротность  $Q$ , собственную емкость  $C_0$  и температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

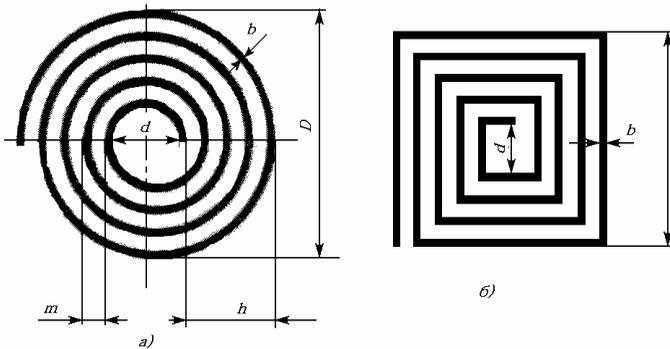


Рис. 4.5 – Тонкопленочная индуктивность: а) круглой формы; б) квадратной формы:  $b$  – ширина проводника;  $m$  – шаг проводников индуктивности;  $h$  – суммарная ширина проводников;  $d$  и  $D$  – внутренний и внешний размеры индуктивности

Строгий расчет индуктивности пленочной катушки достаточно сложен, поэтому чаще прибегают к эмпирическим соотношениям, в которые входят параметры элементов конструкции

катушки: ее форма, число и размеры витков при заданных ограничениях на используемые материалы подложек. Так, для плоской спиральной катушки, изготовленной на диэлектрическом основании, с достаточной для практических расчетов точностью при  $D > 3,5d$  и  $h \gg m$  справедливо соотношение [5]

$$L = \frac{25D_1 N^2}{1 + 3 \frac{h}{D_1}} \text{ нГ},$$

где  $D_1 = 0,5(D + d)$  – средний диаметр витка;

$N$  – число витков катушки;

$h = 0,5(D - d)$  – суммарная ширина проводников;

$m$  – шаг проводников.

Из формулы следует, что при прочих равных условиях величина индуктивности пропорциональна среднему диаметру витка спирали и квадрату числа витков. Поскольку практически размеры отдельных пленочных элементов не превосходят  $1 \text{ см}^2$ , а число витков спирали ограничено суммой межвитковых емкостей, активным сопротивлением спирали, разрешающей способностью используемого процесса нанесения пленок и получения рисунка, постольку предельная величина индуктивности пленочной катушки на диэлектрической подложке обычно мала. Тонкопленочная индуктивность на основе пленок меди, алюминия диаметром 8 мм имеет индуктивность 3,5 мкГн, добротность 50 на частоте 15 МГц. Покрытие катушки ферромагнитной пленкой увеличивает индуктивность до 100 мкГн.

Увеличение добротности катушек обычно достигается за счет выбора материалов с малым удельным сопротивлением (обычно это медь с подслоем титана или ванадия), использования достаточно толстых (до 30–40 мкм) слоев, использования изоляционных слоев с малыми потерями на рабочих частотах (стекло, ситаллы) и применения профилированных подложек с тем, чтобы витки катушки формировались на выступающих участках основания и тем самым уменьшалась межвитковая емкость.

Использование в пленочных катушках индуктивности слоев толщиной в несколько десятков микрометров определяет спе-

цифические методы их нанесения по заданному рисунку. Наиболее часто используются процессы осаждения сплошного токопроводящего покрытия, нанесения на него диэлектрического защитного слоя, окна в котором соответствуют рисунку спирали, с последующим гальваническим наращиванием слоев до необходимой толщины и снятием диэлектрического и тонкого проводящего слоев в зазорах между витками спирали.

Еще одна возможность увеличения добротности катушек индуктивности заключается в преимущественном выборе круглой формы спирали, поскольку для одного и того же номинала индуктивности длина проводника круглой спирали меньше, чем квадратной, и соответственно меньше величина активного сопротивления. Существует оптимальное соотношение внутренне-го и внешнего диаметров спирали, численно равное  $d/D = 0,4$  для круглой спирали и  $0,362$  для квадратной спирали.

При перечисленных условиях добротность тонкопленочных катушек индуктивности находится в пределах 80–150.

#### **4.5 Проводники и контактные площадки**

Необходимыми элементами любой тонкопленочной микросхемы являются пленочные проводящие слои и контактные площадки, основное назначение которых объединить пленочные и навесные компоненты в законченную схему, выполняющую определенную электрическую функцию.

Этим обусловлено все многообразие требований, предъявляемых к пленочным проводникам и контактными площадкам. Они должны с минимальными потерями подводить напряжение питания к функциональным компонентам микросхемы, с минимальными искажениями передавать сигналы, обеспечивать надежный, чаще всего невыпрямляющий и малошумящий контакт с элементами микросхемы.

Требования, предъявляемые к пленочным проводникам и контактными площадкам, в ряде случаев противоречат друг другу. Например, увеличение ширины пленочного проводника уменьшает его индуктивность, но одновременно возрастает емкость этого проводника относительно земли и расположенных в

непосредственной близости элементов микросхемы. Материалы с малым значением удельного сопротивления, применяемые для проводников и контактных площадок, как правило, имеют плохую адгезию к подложке.

Ниже рассматриваются основные критерии, определяющие выбор материала проводников и контактных площадок.

Фактором, определяющим верхнюю границу толщины проводящей пленки, является усилие отрыва или сдвига пленки. Этот параметр в первом приближении зависит от соотношения сил адгезии пленки к основанию и возникающих напряжений (например, из-за разности коэффициентов линейного расширения пленки и основания).

Если силы адгезии сконцентрированы лишь в области контакта двух разнородных слоев и с этой точки зрения не зависят от толщины пленки, то термические напряжения пропорциональны объему пленки и, следовательно, сила сцепления пленки и основания, как правило, убывает с толщиной.

Эти и многие другие факторы ограничивают диапазон толщин проводящих пленок областью 0,1–1,0 мкм.

Величина сил адгезии проводников к подложке определяется природой контактирующих материалов и условиями нанесения пленки, а именно:

- поверхностью подложки;
- степенью чистоты поверхности подложки;
- наличием подслоя и его природой;
- температурой, при которой наносится пленка, и энергией осаждающихся атомов.

Поскольку контактные площадки предназначены для присоединения навесных элементов и внешних выводов микросхемы, одним из решающих факторов, определяющих выбор материала, является его способность к пайке и сварке без нарушения ее целостности.

С точки зрения минимального электросопротивления наиболее подходящими для создания проводников и контактных площадок являются золото, серебро, медь, никель и алюминий (табл. 4.6).

**Золото** обладает высокой химической стойкостью, малым электросопротивлением, хорошо паяется и сваривается с выво-

дами навесных компонентов микросхемы. К его недостаткам, кроме высокой стоимости, следует отнести низкую адгезию к диэлектрической подложке и склонность к агрегации. Поэтому золото при создании пленочных проводников и контактных площадок чаще всего используется в комбинации с другими материалами: адгезионным подслоем хрома, нихрома, титана или выступает в качестве верхнего химически инертного защитного и технологического слоя на тантале, меди и некоторых других материалах.

**Серебро** имеет наибольшую электропроводность, коррозионно-устойчиво, допускает пайку и сварку. Высокая миграционная подвижность серебра при отсутствии надлежащих мер защиты в ряде случаев приводит к отказам микросхемы.

**Медь** – один из наиболее часто используемых материалов. Она характеризуется высокой электропроводностью, хорошо сочетается с другими материалами при создании многослойных проводников. Медь по свойствам приближается к серебру и сохраняет присущий серебру недостаток – высокую миграционную подвижность. Кроме того, медь склонна к окислению. Поэтому медь в качестве материала проводящего слоя обычно используется с адгезионным подслоем марганца, титана, хрома или нихрома и защитным покрытием из никеля, золота или припоя. Для уменьшения электромиграции меди под действием постоянных потенциалов в присутствии влаги окружающей атмосферы обязательно использование плотных и негигроскопичных диэлектрических покрытий.

**Никель** обычно не применяется в качестве основного компонента материала проводящего слоя, а используется в качестве верхнего защитного слоя на меди, алюминии и пр. Он обеспечивает надежную пайку и сварку внешних выводов микросхемы.

Таким образом, контактные площадки и проводники делаются двух- и трехслойными: адгезионный подслои – основной проводящий слой – защитный слой. В качестве материала подслоя используются нихром, хром, титан, тантал марганец, обеспечивающие адгезию основного проводящего слоя к диэлектрической подложке. Толщина пленки подслоя составляет 0,01–0,03 мкм. Толщина проводящего слоя (Au, Cu) обычно лежит в диапазоне 0,4–1,0 мкм. Защитный слой (Au, Ni, Ag) делается доста-

точно тонким, порядка 0,05–0,1 мкм. Защитный слой обычно требуется для пленок меди, так как она легко окисляется на воздухе.

Комбинации материалов для проводников и контактных площадок приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6 – Характеристики проводников и контактных площадок

Материалы	Удельное сопротивление $\rho_s$ , Ом/□
Нихром-золото	0,03–0,04
Нихром-медь-никель	0,02–0,04
Нихром-медь-серебро	0,02–0,04
Нихром-медь-золото	0,02–0,04
Нихром-алюминий-никель	0,1–0,2

**Алюминий** широко применяется для создания проводящих слоев, контактных площадок и элементов пересечений. Кроме того, в микросхемах с тонкопленочными конденсаторами алюминий используется для верхних и нижних обкладок.

Образующаяся на алюминии тонкая окисная пленка затрудняет его сварку и особенно пайку; однако ее присутствие позволяет создавать высоконадежные пленочные пересечения благодаря эффекту «самозалечивания». Большим преимуществом алюминия при создании тонкопленочных проводников и пересечений является то, что в ряде технологических процессов проводящая пленка алюминия может быть превращена в диэлектрический слой окиси алюминия и, следовательно, возможно получение безрельфных структур. К достоинствам алюминия следует также отнести и то, что он практически не меняет свои свойства при температурах до 500 °С.

Благодаря перечисленным выше свойствам алюминий находит самое широкое применение в технологии гибридно-пленочных микросхем. К недостаткам алюминия следует отнести технологические сложности получения толстых (5–10 мкм) слоев.

В последнее время используются фракционирующие сплавы, в состав которых входит наряду с медью 2 % Mn, 5 % Ni, 0,1 % Ti. Из сплава сначала испаряется легколетучий компонент (Mn), затем медь. Приповерхностная зона будет обогащена материалами с высокой температурой испарения (Ni, Ti). На основе таких слоев можно делать контактные площадки и проводники, удовлетворяющие всем поставленным требованиям.

Для микросхем на основе пленок тантала в качестве материала резисторов и для подслоя выбирают тантал с толщиной до 0,05 мкм, затем осаждают диэлектрический слой, а в качестве материала верхней обкладки и для проводящего слоя используют золото. Таким образом, проводники и контактные площадки имеют двухслойную структуру Ta-Au.

Одновременное использование различных материалов при создании одной микросхемы накладывает на их выбор ряд дополнительных ограничений. Рекомендуется учитывать возможность появления дополнительных шумов, контактной разности потенциалов в месте контакта разнородных материалов, переходного сопротивления на границе раздела слоев.

## 5 ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИМС

В настоящее время существует большое количество типовых технологических процессов изготовления тонкопленочных ИМС. В основу каждого процесса положены способ нанесения пленок и метод получения рисунка элементов ИМС.

Например, термическое испарение с осаждением пленки на подложку через свободные маски (трафареты), получение сплошных пленок путем термического испарения в вакууме или ионно-плазменным распылением с последующим формированием рисунка с помощью фотолитографии и др. Каждый из процессов имеет свои разновидности в зависимости от количества и типов пленочных элементов, от наличия внутрисхемных соединений и используемых материалов. Поэтому последовательность операций при формировании пленочных элементов различна.

Представим техмаршрут изготовления резистивно-емкостной тонкопленочной микросхемы (RC-схемы), состоящей из резисторов на основе пленок хрома и конденсаторов Al-SiO-Al. Для такой RC-схемы целесообразно проводники и контактные площадки выполнять из алюминия. На рис. 5.1–5.4 показана последовательность формирования схемы с использованием контактных масок. Первые две операции технологического процесса – нанесение резистивного слоя (Cr), проводящего слоя (Al) для внутрисхемных соединений и нижней обкладки конденсатора – выполняют в одном вакуумном цикле, в вакуумных установках, рабочие камеры которых оборудованы двумя испарителями и устройствами карусельного типа для смены нескольких подложек, а также устройствами подвода их на позиции испарения.

Процесс формирования резистивного слоя осуществляют следующим образом. Перед началом технологического цикла производят подготовку вакуумной установки путем очистки рабочей камеры и загрузки испарителей навесками из хрома и алюминия. На карусели устанавливают подложки и контрольные образцы для измерения удельного сопротивления резистивной пленки в процессе ее осаждения. После загрузки рабочую

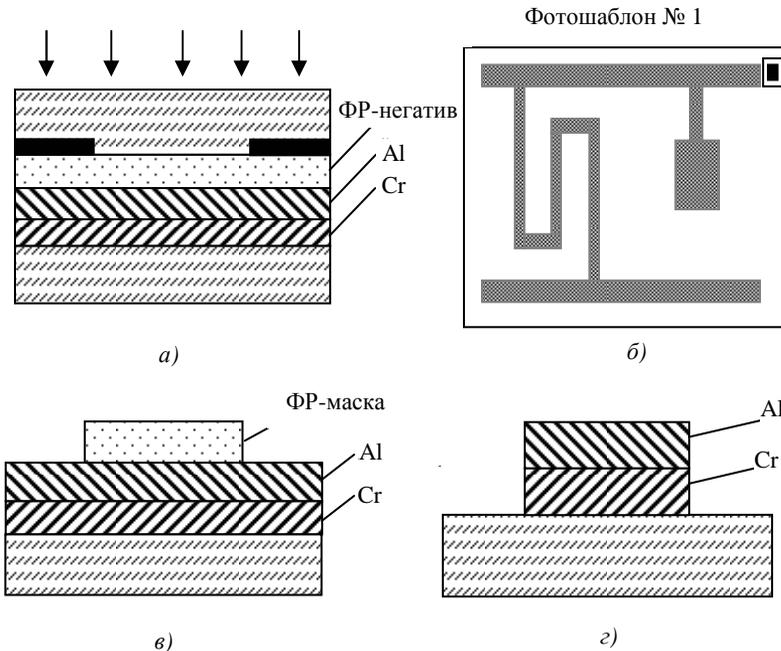


Рис. 5.1 – Формирование рисунка в слоях хрома и алюминия: экспонирование (а); фотошаблон № 1 (б); проявление фоторезиста (в); травление хрома и алюминия (г)

камеру откачивают до необходимого давления ( $10^{-2}$ – $10^{-4}$ ) Па, нагревают подложки до температуры 200–250 °С, подводят на позицию испарения хрома, разогревают его до температуры испарения и, открывая заслонку, производят напыление на подложку. При получении резистивного слоя заданной толщины, закрыв заслонку, прекращают напыление и на позицию напыления подводят следующую подложку. Таким образом, наносят резистивный слой последовательно на все подложки. Затем выключают нагрев испарителя хрома, включают испаритель алюминия и аналогично осуществляют напыление проводящего слоя алюминия на все подложки. Выключают нагрев испарителя и подложек. Подложки сначала остывают в вакууме до температуры 50–60 °С, а затем извлекаются из вакуумной установки.

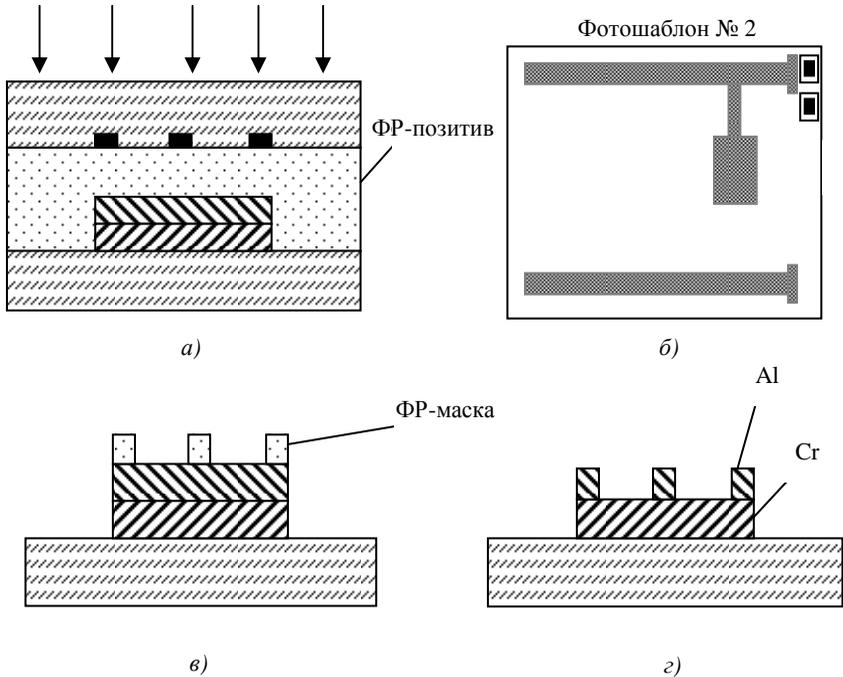


Рис. 5.2 – Формирование рисунка в слое алюминия: экспонирование (а); вид фотошаблона № 2 (б); проявление фоторезиста (в); травление алюминия (г)

Формирование рисунка в слоях хрома и алюминия осуществляется с помощью двух последовательных фотолитографий (прямые контактные маски). Для первой ФЛ используется фотошаблон, задающий совместный рисунок резистора, проводников, контактных площадок, нижней обкладки конденсатора и меток совмещения (рис. 5.1). Для одновременного травления хрома и алюминия используется универсальный травитель, который не разрушает ФР-маску. После удаления маски на подложке получается покрытие из слоев хрома и алюминия.

С помощью второй ФЛ удаляют алюминий с резистора, используя фотошаблон № 2, задающий рисунок контактных площадок, проводников, нижней обкладки конденсатора и меток совмещения (рис. 5.2). При этом выбирают селективный трaви-

тель, который травит алюминий, но не действует на хром. В результате все проводники и нижняя обкладка конденсатора получается двухслойными. Диэлектрическая пленка SiO напыляется на подложку сплошным слоем и рисунок формируется с помощью ФШ № 3, который просто совмещается с рисунком, имеющимся на подложке. Это совмещение возможно, поскольку слой SiO прозрачный и большой точности при изготовлении диэлектрика не требуется (рис. 5.3).

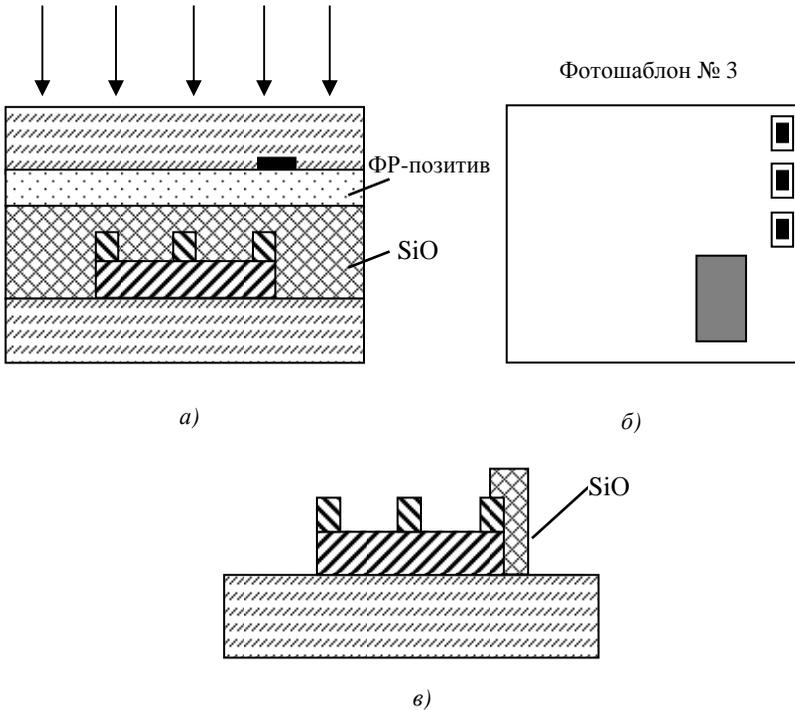


Рис. 5.3 – Формирование рисунка в слое диэлектрика: экспонирование (а); вид фотошаблона № 3 (б); травление диэлектрика (в)

Для формирования верхней обкладки конденсатора нужно использовать обратные маски, так как, если напылять Al на уже сформированную часть схемы, где уже имеется слой алюминия, то, во-первых, нельзя будет разделить травление верхнего слоя

Al от нижележащего, во-вторых, нельзя будет сделать совмещение меток на шаблоне с метками на подложке, так как алюминий является непрозрачным материалом.

Последовательность формирования верхней обкладки конденсатора и проводников с помощью обратной ФР-маски заключается в следующем (рис. 5.4). Сначала на подложку наносится позитивный фоторезист и с помощью ФШ № 4 формируется обратная ФР-маска, на который сплошным слоем сверху напыляется алюминий. Воздействуя на фоторезист, удаляют ФР-маску вместе с алюминием, лежащим на ней. На подложке остается слой алюминия, соответствующий рисунку верхней обкладки конденсатора и, возможно, части проводников и контактных площадок.

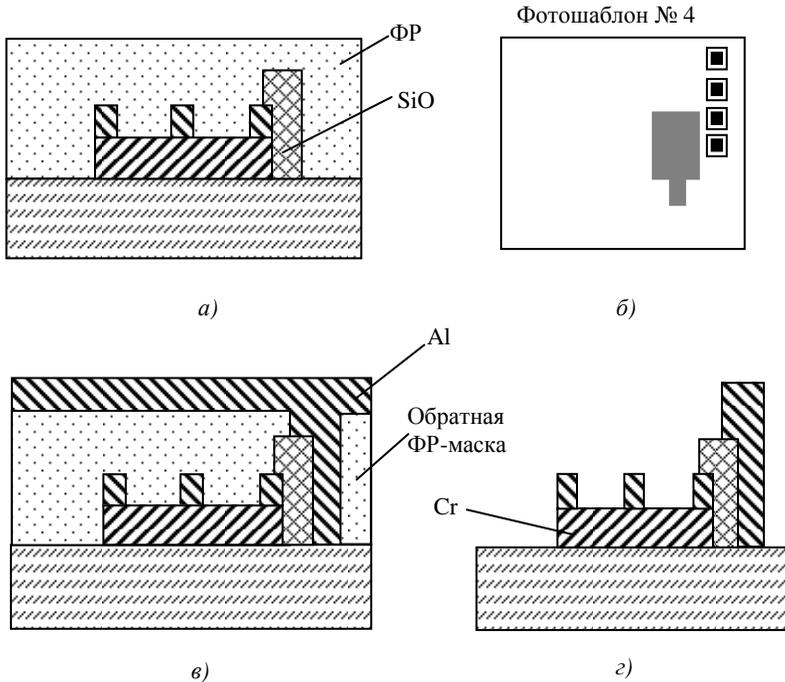


Рис. 5.4 – Формирование рисунка в слое алюминия методом обратной маски: нанесение ФР (а); вид шаблона № 4 (б); напыление алюминия (в); взрыв обратной ФР-маски (г)

Для изготовления RC-схемы можно использовать *комбинированный способ* получения рисунка, сочетающий фотолитографию и свободные маски (трафареты). Резисторы, проводники и нижняя обкладка конденсатора формируются с помощью двух последовательных фотолитографий (см. рис. 5.1–5.2).

После этого в непрерывном вакуумном цикле через соответствующие трафареты напыляют диэлектрик SiO и верхние обкладки конденсатора из алюминия.

Это возможно, если верхняя обкладка имеет достаточно большие размеры, а область диэлектрика перекрывает размеры обкладок и не влияет на емкость конденсатора.

### **Танталовая технология**

Типовые технологические процессы изготовления пассивной части гибридных ИМС по танталовой технологии основаны на катодном распылении для нанесения пленок тантала и различных способах получения пленочных конфигураций. При этом металлические пленки из тантала являются исходным материалом для формирования проводящих, резистивных и емкостных элементов. Так, применяя катодное реактивное распыление, можно получать резистивные пленки с большим диапазоном удельного сопротивления, а используя анодирование пленок тантала – диэлектрические слои окиси тантала  $Ta_2O_5$ . Следовательно, общий принцип танталовой технологии заключается в монолитности изготавливаемой пленочной структуры, что значительно облегчает ее производство.

Возможности и преимущества танталовой технологии обусловлены, прежде всего, особыми свойствами пленок тантала:

а) резисторы и конденсаторы могут быть получены на основе одного материала, что существенно упрощает технологию и снижает стоимость ИМС;

б) RC-элементы на основе пленок тантала стабильны и надежны во времени;

в) с помощью анодирования пленок тантала можно получить диэлектрик для конденсаторов, осуществить защиту резисторов и откорректировать значение сопротивления;

г) высокое поверхностное сопротивление достигается при низком температурном коэффициенте сопротивления и достаточной стабильности;

д) пленка  $Ta_2O_5$  обладает высокой электрической прочностью, высоким значением  $\epsilon$ , невосприимчивостью к влажности и высокой добротностью;

е) тантал невосприимчив к радиации.

В связи с этим по танталовой технологии можно изготавливать пассивные RC-структуры как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами любой сложности и конфигурации. На основе танталовой технологии можно получить три типа пленочных конденсаторов:

1) со структурой  $Ta - Ta_2O_5 - Au$ , для которых характерна высокая электрическая прочность;

2) со структурой  $Ta - Ta_2O_5 - Ni(Ti)Au$ , характеризующиеся пониженной чувствительностью к влаге (благодаря прослойке из Ni или Ti);

3) со структурой  $Au - Ta_2O_5 - Al$ , характеризующиеся низким сопротивлением обкладок и высокой добротностью.

Учитывая эти особенности и то, что пленки  $Ta_2O_5$  травят в щелочном травителе, а пленки тантала – в кислотном, можно получить различные варианты типового технологического процесса.

Следует отметить, что по танталовой технологии практически невозможно изготовление многослойных структур, так как при фотолитографической обработке верхнего танталового слоя будут нарушаться геометрические размеры нижних слоев тантала.

В промышленных условиях наиболее распространен следующий типовой технологический процесс изготовления пассивной гибридной ИМС по танталовой технологии. Рассмотрим формирование тонкопленочной RC-структуры по данному типовому процессу. На подложку из стекла или ситалла наносят методом катодного распыления сплошную пленку тантала. Эту операцию обычно производят на специальной установке, оборудованной транспортно-бункерным устройством для подложек и передвижения их на рабочую позицию в горизонтальном направлении. Электродная система установки состоит из плоского танталового катода и анода, в качестве последнего служат горизонтальные направляющие загрузочного устройства.



жен нерастворимый катод. Анодом служит пленка тантала, все элементы рисунка которой электрически соединены между собой алюминиевой контактной маской.

Для того чтобы алюминий не окислялся, перед анодированием не удаляют с подложки защитный рельеф из фоторезиста, полученный перед этим. При постоянной температуре электролита толщина пленки оксида зависит только от напряжения, приложенного между анодом и катодом, поэтому процесс роста пленки оксида тантала довольно просто контролируется.

Получаемая в результате электролитического анодирования пленка оксида имеет непористую аморфную структуру, обладает химической стойкостью и высокой механической прочностью. Вследствие этого оксид тантала используется в качестве диэлектрика конденсатора и защищает танталовые резисторы от коррозии.

По окончании процесса анодирования с подложек удаляют защитный рельеф из фоторезиста и снова осаждают на них методом термического испарения сплошной слой алюминия, в котором затем вытравливают рисунок верхней обкладки конденсатора и получают на подложке рисунок ИМС по танталовой технологии (рис. 5.7).

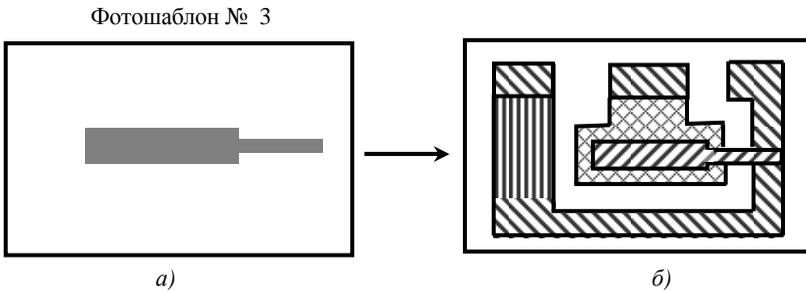


Рис. 5.7 – Формирование рисунка верхней обкладки:  
а – фотошаблон № 3; б – рисунок ИМС на подложке

Несмотря на то, что процесс катодного распыления сложнее процесса термического испарения в вакууме, благодаря технологичности и большим возможностям танталовая технология

широко используется при изготовлении высокостабильных гибридных ИМС.

### **Электронно-лучевая технология**

Данный типовой технологический процесс наиболее целесообразен для изготовления ИМС, содержащих только пленочные резисторы и соединения. Технологический процесс формирования пассивной части гибридной ИМС с использованием электронно-лучевой гравировки для получения пленочных конфигураций проводят в такой последовательности. Вначале на керамическую подложку в виде сплошных покрытий напыляют резистивный и проводящий слои, после чего проводят два фрезерования с помощью электронного луча для получения необходимой конфигурации пленочных элементов. Особенностью электронно-лучевой технологии является возможность ее автоматизации. Поскольку перемещением электронного луча по поверхности легко управлять электрическим или магнитным полем, необходимую конфигурацию можно получить по заданной программе. Такой программный способ изготовления наиболее экономичен для получения ИМС, пассивная часть которых содержит резисторы высокой точности и соединения.

## 6 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛУПРОВОДНИ- КОВЫХ ИМС

### 6.1 Структуры элементов полупроводниковых ИМС

При изготовлении полупроводниковых ИМС наибольшее распространение получила планарная технология, в основе которой лежит метод контролируемого введения примесей в локальные области полупроводниковой пластины. Планарная технология позволяет одновременно получать большинство элементов ИМС в течение единого технологического процесса. Планарная технология также характеризуется тем, что все внешние границы  $p-n$ -переходов выходят на одну плоскость, т.е. все элементы и выводы от них расположены с одной стороны полупроводниковой пластины.

Для характеристики типа применяемых в ИМС транзисторов, а также технологических методов их изготовления пользуются понятиями топологии и структуры ИМС. Топология задает размеры элементов ИМС в плане и их взаимное расположение и определяет выбор метода получения рисунка схемы. Структура ИМС показывает последовательность слоев в составе микросхемы по нормали к поверхности кристалла, различающихся материалом, толщиной и электрофизическими свойствами. По структуре ИМС устанавливается состав и последовательность технологических методов обработки пластины и определяются технологические режимы каждого метода.

В настоящее время различают два класса полупроводниковых ИМС: биполярные и МДП ИМС в зависимости от используемых транзисторов в схеме. Главным элементом биполярных ИМС является биполярный  $n-p-n^+$  транзистор. Технология всех других элементов ( $p-n-p$  транзисторов, резисторов, диодов, конденсаторов) должна «приспосабливаться» к технологии  $n-p-n^+$  транзистора. Такое «приспосабливание» означает, что для изготовления других элементов следует, по возмож-

ности, избегать дополнительных технологических операций и желательно использовать те же рабочие слои (коллекторный, базовый и эмиттерный). Отсюда используется такая терминология, как «в качестве резистора применяется базовый слой» или «рабочий слой резистора получают на этапе базовой диффузии». Таким образом, при изготовлении ИМС используется интегральная технология, которая представляет собой совокупность методов обработки, позволяющую при наличии структурного подобия различных элементов ИМС формировать их одновременно в едином технологическом процессе.

Главный самый сложный элемент биполярной ИМС  $n-p-n^+$  транзистор имеет структуру, представленную на рис. 6.1.

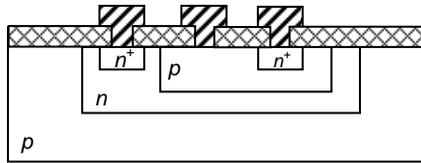


Рис. 6.1 – Структура биполярного транзистора

В качестве диода биполярной ИМС можно использовать один из двух  $p-n$ -переходов транзистора. Однако наиболее оптимальными вариантами являются  $p-n$ -переход между замкнутыми коллектором с базой и эмиттером, или просто  $p-n$ -переход эмиттер-база (рис. 6.2).

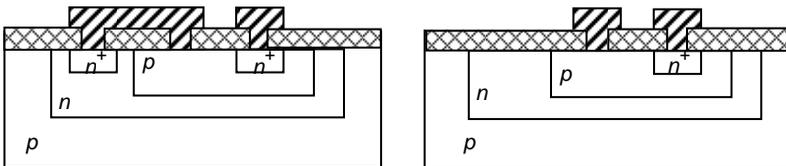


Рис. 6.2 – Структуры диодов биполярной ИМС

Резисторы биполярных ИМС чаще всего изготавливаются в базовой области. Структура резистора представлена на рис. 6.3.

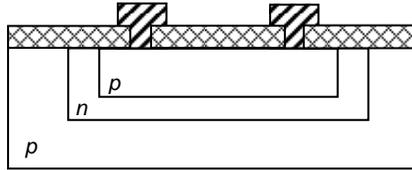


Рис. 6.3 – Структура резистора в базовой области

Поверхностное сопротивление этой диффузионной области обычно составляет 180–200 Ом/ . Сопротивление прямоугольного резистора может быть определено по формуле

$$R = \rho_s \frac{l}{b} = \rho_s \kappa_\phi,$$

где  $R$  – сопротивление резистора;

$\rho_s$  – поверхностное сопротивление;

$l$  – длина резистора;

$b$  – ширина резистора.

$\kappa_\phi$  – коэффициент формы.

Минимальная ширина резистора ограничивается возможностями метода получения рисунка. При современной технологии она составляет 10–15 мкм. Максимальная длина резистора ограничивается размерами подложки, и обычно коэффициент формы  $\kappa_\phi$  не превышает 100. Следовательно, максимальное сопротивление, которое может быть реализовано в базовом слое, не превышает 20 кОм. Для получения резисторов с сопротивлением более 20 кОм используют пинч-резисторы (рис. 6.4). Для их изготовления базовую область ограничивают сверху эмиттерной областью. Сопротивление таких резисторов возрастает в результате уменьшения площади сечения и за счет использования более слабо легированной донной части базовой области.

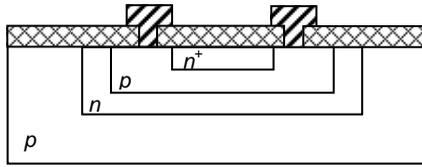


Рис. 6.4 – Структура пинч-резистора

Для реализации более высокоомных резисторов используются слои, легированные путем ионного внедрения и обладающие поверхностным сопротивлением вплоть до  $10^4$ – $10^5$  Ом/ .

Низкоомные резисторы порядка сотен Ом изготавливают в эмиттерной области. При поверхностном сопротивлении эмиттерной области  $\rho_s = 3$ – $5$  Ом/ удается реализовать резисторы сопротивлением вплоть до единиц Ом.

Роль конденсаторов в биполярных ИМС играют обратно смещенные  $p$ – $n$ -переходы. Как правило, используется емкость  $p$ – $n$ -перехода коллектор-база. При использовании  $p$ – $n$ -перехода эмиттер-база можно реализовать емкости в 5–7 раз больше, но такие конденсаторы будут иметь низкое пробивное напряжение. Кроме использования емкости обратно смещенных  $p$ – $n$ -переходов применяют МДП-конденсаторы (рис. 6.5). Нижней обкладкой такого конденсатора является высоколегированная эмиттерная область.

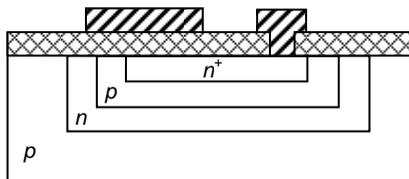


Рис. 6.5 – Структура МДП-конденсатора

Главным элементом МДП ИМС является МДП-транзистор с индуцированным  $n$ -каналом (рис. 6.6). Две легированные области исток И и сток С обратимы. Стоком является та из них, на

которую (при соответствующей полярности напряжения) поступают рабочие носители заряда. Металлический электрод, создающий эффект поля, называют затвором З. Исток обычно соединяют с основной пластиной полупроводника – подложкой. Функции пассивных элементов МДП ИМС эффективно выполняют сами МДП-транзисторы. Так, нормально открытый транзистор при замыкании стока с затвором может служить резистором. Такой резистор занимает значительно меньшую площадь по сравнению с диффузионным резистором. Конденсаторами в этих схемах являются МДП-конденсаторы.

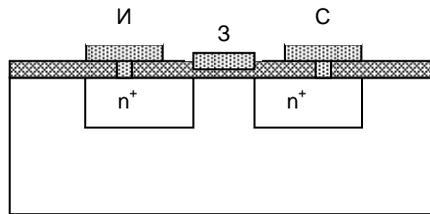


Рис. 6.6 – Структура МДП-транзистора

## 6.2 Выбор материала подложек полупроводниковых ИМС

Полупроводниковые материалы в полупроводниковых приборах и ИМС являются не только элементом конструкции, а в их объеме, приповерхностном слое и на поверхности формируются структуры, которые представляют собой или отдельные приборы, или элементы ИМС. Для этой цели, как правило, служат монокристаллические полупроводниковые пластины. Пригодность полупроводникового материала для использования при изготовлении приборов и ИМС определяется в основном параметрами, зависящими от его физических свойств: оптических, термических, термоэлектрических, зонной структуры, ширины запрещенной зоны, положения в ней примесных уровней и др. Очень важны электрические свойства полупроводниковых материалов: тип электропроводности, концентрация носителей заряда, их подвижность, удельное сопротивление, время жизни

неосновных носителей заряда и их диффузионная длина, которые зависят от технологии получения полупроводника.

В настоящее время в полупроводниковой электронике используются кремний, германий, арсенид галлия, фосфид индия и др. Наибольшее применение получил кремний.

Если обратиться к истокам твердотельной электроники, а именно к моменту создания биполярного транзистора, то развитие технологии было связано с использованием германия в качестве полупроводникового материала. Однако в некоторых случаях приборы на основе германия оказались нестабильными из-за высоких токов утечки  $p-n$ -переходов, что является следствием относительно малой ширины запрещенной зоны (0,66 эВ). Кремний, ширина запрещенной зоны которого равна 1,1 эВ, заменил германий и позволил почти полностью исключить его как материал для производства твердотельных приборов. Кремниевые приборы могут работать в более широком диапазоне температур. Кроме того, преимущество кремния состоит в том, что на его поверхности технологически просто выращивается термический окисел высокого качества, который служит хорошим изолятором, а также маской при диффузии, являющейся надежным барьером для проникновения примесей. Окись же германия гигроскопична и растворима в воде.

Небольшая величина собственного удельного сопротивления германия (47 Ом·см) препятствует созданию выпрямительных приборов с высоким пробивным напряжением. Собственное удельное сопротивление кремния составляет величину 230 кОм·см, в связи с чем этот элемент стал основой не только высоковольтных выпрямительных приборов, но и некоторых видов приборов, работающих в качестве датчиков, чувствительных в инфракрасной области спектра. И, наконец, в экономическом отношении применение кремния в электронике более выгодно, чем использование германия, так как стоимость кремния высокого уровня чистоты в 10 раз ниже стоимости германия.

В последнее время происходит стремительное развитие технологии полупроводниковых приборов и ИМС на основе соединений  $A^3B^5$ . Это обусловлено высокой подвижностью носителей заряда, характерной для арсенида галлия и других соеди-

нений  $A^3B^5$ . Если у кремния подвижность электронов составляет  $1450 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , то у арсенида галлия ( $GaAs$ ) она –  $8800 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , фосфида индия ( $InP$ ) – 4600. Ширина запрещенной зоны этих соединений также выше, чем у кремния ( $Si$  – 1,1 эВ,  $GaAs$  – 1,43 эВ,  $InP$  – 1,34 эВ). Однако широкое применение этих материалов в настоящее время ограничивается сложностью технологии как при выращивании слитков, так и на операциях легирования, нанесения диэлектрика и т.д.

Кремниевые пластины для изготовления полупроводниковых приборов и ИМС выпускаются промышленностью трех видов: однослойные пластины  $p$ - и  $n$ -типов, двухслойные  $p$ - и  $n$ -типа с эпитаксиальным  $n$ -слоем, покрытые оксидом или нитридом кремния, двухслойные  $p$ -типа с эпитаксиальным  $n$ -слоем и скрытым  $n^+$ -слоем. В маркировке однослойных пластин указывается материал пластины, тип проводимости, легирующий элемент и удельное сопротивление [10]. Например, КДБ-10 означает кремний (К) дырочной электропроводности (Д), легированный бором (Б), с удельным сопротивлением 10 Ом·см. Двухслойные пластины маркируются дробью с числовым коэффициентом, например,  $80 \frac{10KЭФ-0,1}{200КДБ-1}$ . Числовой ко-

эффициент перед дробью означает диаметр пластины (80 мм), первая цифра в числителе соответствует толщине эпитаксиальной пленки (10 мкм), а в знаменателе – толщине пластины  $p$ -типа (200 мкм). Остальные буквы и цифры имеют те же значения, что и для однослойных пластин. Двухслойные пластины со скрытым слоем маркируются, например, следующим образом:

$$100 \frac{5KЭФ-0,2/2KЭМ5}{300КДБ-10},$$

где  $2KЭМ5$  – характеристика скрытого слоя кремния (К) электронной электропроводности (Э), легированного мышьяком (М), толщиной 2 мкм с поверхностным сопротивлением 5 Ом/ .

### **6.3 Технологические особенности изготовления полупроводниковых ИМС**

Специфической особенностью изготовления полупроводниковых ИМС является интегрально-групповой метод производства. Суть его заключается в том, что за один технологический цикл обрабатывается большая группа пластин, на каждой из которых создается до нескольких тысяч идентичных схем. Тем самым достигается основная цель интегрально-групповых методов производства – повышение качества и процента выхода годных схем, а, следовательно, снижение их стоимости.

В зависимости от структуры ИМС и конструкции корпуса общее число операций техпроцесса может достигать 200. Процесс охватывает разнообразные по физическим принципам, методам контроля и технологическому оснащению методы обработки. Все операции по производству ИМС можно разделить на три группы:

- 1) заготовительные процессы – получение и обработка монокристаллических подложек, изготовление корпусов;
- 2) обрабатывающие процессы – объединяют операции, необходимые для формирования структур интегральных микросхем: литография, окисление, эпитаксия, легирование и т.д.;
- 3) сборочные операции – резка, монтаж, разварка выводов, контроль.

Для получения рисунка элементов ИМС микронных размеров используют фотолитографию, а субмикронных размеров – электролитографию, рентгенолитографию и ионолитографию. С помощью литографии создают контактные маски для диффузии, травления, окисления, которые обеспечивают получение элементов любой конфигурации.

## 7 ЛЕГИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

### 7.1 Легирование полупроводников диффузией

Основой полупроводниковой технологии является создание  $p-n$ -переходов путем легирования. Сущность легирования состоит во внедрении легирующей примеси в кристаллическую решетку полупроводника и образование области с противоположным типом проводимости. Эта область ограничивается  $p-n$ -переходом. Количество вводимой примеси должно быть достаточным для компенсации ранее введенной примеси и создания ее избытка.

Легирование можно осуществлять путем термической диффузии примеси в полупроводник, нагретый до высокой температуры, и внедрением ионов примеси с высокой энергией (ионное легирование). В настоящее время наиболее распространенным является метод диффузии.

Диффузией называют перенос вещества, обусловленный хаотическим тепловым движением атомов, возникающий при наличии градиента концентрации данного вещества и направленный в сторону убывания этой концентрации. Ввиду конечной скорости диффузии концентрация введенной примеси убывает в направлении от поверхности, через которую происходит диффузия, вглубь. Переход образуется на глубине  $x_{pn}$ , где концентрация введенной примеси оказывается равной концентрации исходной примеси  $N_{исх}$  (рис. 7.1).

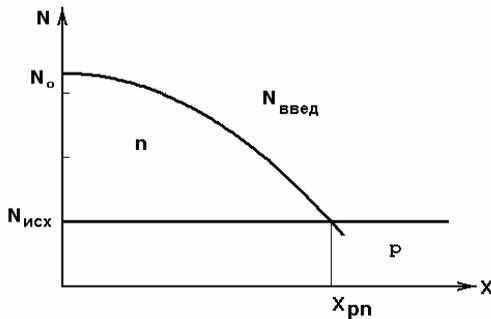


Рис. 7.1 – Распределение примеси в полупроводнике при термической диффузии

Для получения слоев дырочного типа проводимости в качестве легирующей примеси используют элементы III группы: бор, индий, галлий, алюминий, а для получения слоев электронного типа проводимости применяют элементы V группы: фосфор, мышьяк, сурьму. Выбор легирующего элемента среди названных производится с учетом скорости диффузии и предельной растворимости примеси (табл. 7.1). Предпочтение отдается веществам, имеющим высокие предельную растворимость и скорость диффузии. Как видно из рисунка 7.2, максимальной предельной растворимостью примесных элементов в кремнии обладают мышьяк, бор и фосфор. Кроме того, бор и фосфор имеют высокую скорость диффузии. Поэтому из всех предложенных элементов наиболее широкое применение получили именно бор и фосфор. Однако при создании мелких эмиттеров (глубина залегания  $p-n$ -перехода эмиттер-база меньше 2 мкм) и скрытых слоев большая скорость диффузии нежелательна. В первом случае это приводит к слишком малому технологически

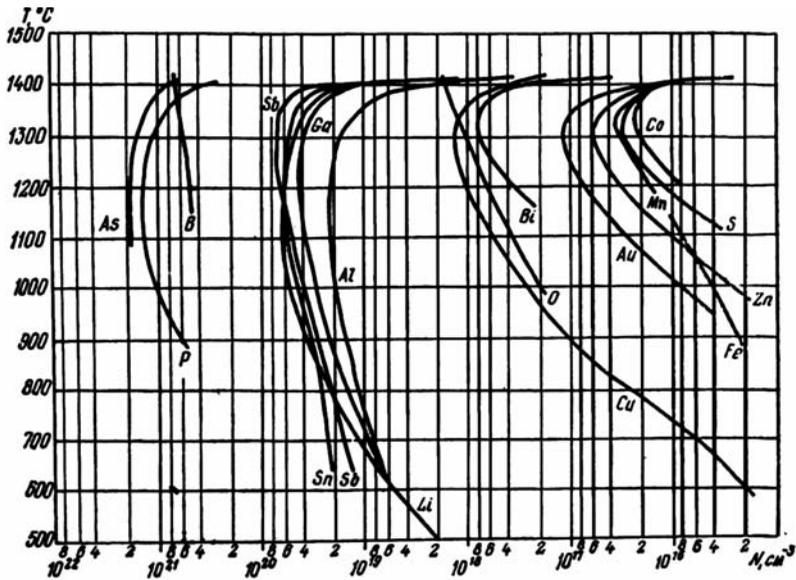


Рис. 7.2 – Зависимость предельной растворимости примесных элементов в кремнии от температуры

не управляемому времени диффузии, а во втором случае – к размытию границы скрытый слой – эпитаксиальная пленка. В этом случае используют элементы, имеющие малую скорость диффузии, такие, как мышьяк и сурьму.

Скорость процесса диффузии определяется коэффициентом диффузии  $D$ , равным числу атомов, проходящих через площадку в  $1 \text{ см}^2$  за 1 с. Коэффициент диффузии  $D$  зависит от температуры, энергии связи примесных атомов в решетке, концентрации вакансий и других факторов. Температурная зависимость коэффициента диффузии  $D$  определяется уравнением Аррениуса и имеет вид

$$D = D_0 \exp(-E_a / kT), \quad (7.1)$$

где  $D_0$  – кажущийся коэффициент диффузии, численно равный коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре;

$E_a$  – энергия активации, характеризующая энергию, необходимую для перехода атома примеси в соседний узел решетки.

Свойства элементов, используемых в качестве легирующих примесей кремния, приведены в табл. 7.1. Однако, используя уравнение Аррениуса, невозможно произвести точный расчет коэффициента диффузии, поскольку он не учитывает влияния вакансий и других дефектов решетки, а также влияние концентрации исходной и диффундирующей примесей.

Таблица 7.1 – Свойства различных элементов как легирующих примесей кремния

Элемент	Энергия активации, эВ	Кажущийся коэффициент диффузии, $\text{см}^2\text{с}^{-1}$	Коэффициент сегрегации	Предельная растворимость при $T=1473 \text{ К}$ , $\text{см}^{-3}$
Бор	3,7	11,5	0,3	$5 \cdot 10^{20}$
Галлий	3,5	3,3	20	$4 \cdot 10^{19}$
Индий	3,9	16	10000	$10^{19}$
Фосфор	4,4	1400	10	$1,2 \cdot 10^{21}$
Мышьяк	3,6	0,44	10	$1,7 \cdot 10^{21}$
Сурьма	3,9	4	10	$6 \cdot 10^{20}$

Математическое описание диффузионных процессов предложено Фиком в виде двух законов, основанных на уравнениях теплопроводности. Первый закон Фика характеризует скорость проникновения атомов одного вещества в другое при постоянном во времени потоке этих атомов и неизменном градиенте их концентраций

$$I = -D \frac{dN}{dx}, \quad (7.2)$$

где  $I$  – плотность потока вещества, проходящего через единицу площади в единицу времени,  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;

$\frac{dN}{dx}$  – градиент концентрации примеси в направлении диффузии.

Второй закон Фика определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной направлению диффузии

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2}. \quad (7.3)$$

Решение уравнений Фика при различных граничных и начальных условиях позволяет определить профиль распределения примеси при конкретных параметрах процесса диффузии. При создании диффузионных профилей в элементах интегральных схем осуществляют диффузию из неограниченного источника примеси и из ограниченного источника в полубесконечный полупроводник.

Диффузия из неограниченного источника предполагает такое состояние системы, когда количество примеси, уходящей из приповерхностного слоя полупроводника в его объем, равно количеству примеси, поступающей в приповерхностный слой. Это возможно, когда концентрация примеси источника заметно не изменяется в процессе диффузии. Граничные условия для этого случая могут быть записаны

$$\begin{aligned} N(x > 0, t = 0) &= 0 \\ N(x = 0, t \geq 0) &= N_0 \\ N(x \rightarrow \infty, t > 0) &= 0, \end{aligned} \quad (7.4)$$

где  $x$  – расстояние от поверхности;

$x = 0$  – координата поверхности, через которую происходит диффузия;

$N_0$  – поверхностная концентрация примеси, поддерживаемая постоянной в течение всего процесса;

$N(x, t)$  – концентрация примеси на любой глубине в любое время;

$t$  – время диффузии.

Диффузия из неограниченного источника является реальным случаем в производстве ИС и представляет первый этап диффузии, задачей которого является введение в кристалл определенного количества примеси. В результате образуется тонкий приповерхностный слой, насыщенный примесью. В производстве этот этап называется загонкой примеси.

Распределение концентрации примеси по глубине, полученное при решении уравнения (7.3) при граничных условиях (7.4), имеет вид

$$N = N_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (7.5)$$

где  $N_0$  – концентрация примеси на поверхности пластины;

$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$  – функция ошибок,  $\operatorname{erfc}$  означает дополнение (до единицы) функции ошибок

$$\operatorname{erfc} y = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-y^2) dy,$$

$D$  – коэффициент диффузии при температуре загонки;

$t$  – время загонки.

Дозу легирования  $Q$ , т.е. число атомов примеси, введенное в кристалл на этапе загонки за время диффузии через площадку в  $1 \text{ см}^2$ , можно получить, используя первый закон Фика (7.2), подставляя вместо  $N$  его значения из уравнения (7.5)

$$\begin{aligned} I_{x=0} &= -D \left( \frac{dN}{dx} \right)_{x=0} = DN_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{Dt}} \exp \left[ -\frac{x^2}{4Dt} \right]_{x=0} = \\ &= N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Интегрируя полученное выражение по времени, определим дозу легирования

$$Q = \int_0^t Idt = \int_0^t N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} t^{-1/2} dt = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} = 1,13N_0 \sqrt{Dt}. \quad (7.7)$$

Для уменьшения температурного воздействия (уменьшения влияния фактора  $Dt$ ) поверхностную концентрацию на этапе загонки выбирают максимально возможной, т.е. соответствующей предельной растворимости примеси при данной температуре. Температурная зависимость предельной растворимости для разных веществ представлена на рис. 7.2. Заменяв  $N_0$  на величину предельной растворимости  $N_p$ , уравнение (7.7) примет вид

$$Q = 1,13N_p \sqrt{Dt}. \quad (7.8)$$

Учитывая закон распределения примеси в полупроводнике на этапе загонки, можно представить профили распределения примеси в полупроводнике при разных временах загонки (рис. 7.3).

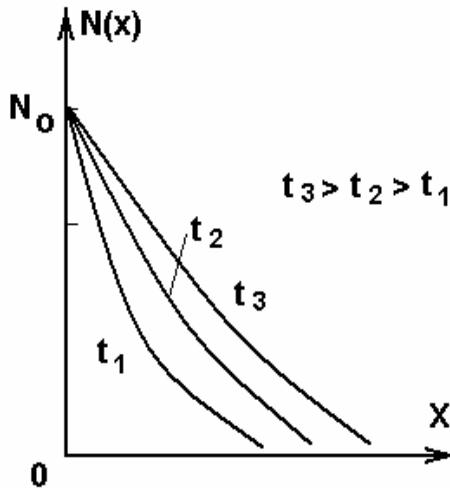


Рис. 7.3 – Профиль распределения примеси на этапе загонки

Диффузия из ограниченного источника представляет собой второй этап диффузии – этап разгонки. На этапе разгонки примесь, введенная при загонке, распределяется вглубь полупроводника. При этом поверхностная концентрация примеси с течением времени убывает. Граничные условия для решения уравнения Фика на этапе разгонки имеют вид

$$\begin{aligned} N(t=0, x=0) &= N_p; \\ N(t > 0, x \rightarrow \infty) &= 0, \end{aligned} \quad (7.9)$$

а профиль распределения примеси при этом описывается уравнением Гаусса

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (7.10)$$

где  $N_0$  – концентрация примеси на поверхности диффузионной области, полученная в результате разгонки примеси в течение времени разгонки  $t$ ;

$D$  – коэффициент диффузии при температуре разгонки.

Данное выражение описывает истинное распределение примеси тем точнее, чем тоньше слой, из которого происходит диффузия. Оно получено в предположении, что поступление примеси в кристалл извне и испарение из кристалла практически отсутствуют. На практике этап разгонки заключается в нагреве пластин в окислительной среде. Образующаяся окисная пленка предохраняет введенную примесь от испарения. Распределение примеси по глубине представлено следующими зависимостями, представленными на (рис. 7.4).

По распределению Гаусса можно определить глубину залегания  $p$ – $n$ -перехода, положив концентрацию введенной примеси  $N$  при  $x = x_{pn}$  равной концентрации исходной примеси  $N_{ucx}$  на этой же глубине  $x_{pn}$

$$x_{pn} = 2\sqrt{Dt} \left( \ln \frac{N_0}{N_{ucx}} \right)^{1/2}. \quad (7.11)$$

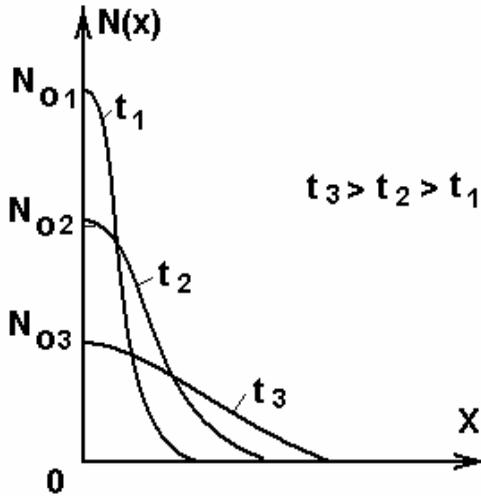


Рис. 7.4 – Профили распределения примеси на этапе разгонки

Решающими технологическими факторами процесса диффузии являются: время диффузии, температура, растворимость примеси, свойства источника диффузанта, условия на поверхности и т.д. Точность поддержания этих параметров определяет стабильность и качество диффузионных структур, а, следовательно, и элементов ИМС.

## 7.2 Расчет режимов диффузии

При формировании диффузионных  $p-n$ -переходов диффузия, как правило, проводится в две стадии за исключением диффузии донорных примесей ( $P, As, Sb$ ) на глубину меньше 2 мкм. В этом случае диффузию проводят в одну стадию. Задачей расчета является определение температуры и времени диффузии на каждом этапе. Исходными данными для расчета являются поверхностная концентрация  $N_0$  или поверхностное сопротивление  $\rho_s$  диффузионной области и глубина залегания  $p-n$ -перехода  $x_{pn}$ .

Основное уравнение, используемое при расчете режимов диффузии, – это равенство концентраций введенной и исходной примесей на глубине залегания  $p$  –  $n$ -перехода

$$N_{введ}(x=x_{pn}) = N_{исх}(x=x_{pn}), \quad (7.12)$$

которое расписывается соответствующим образом для конкретной рассчитываемой структуры.

### ***Расчет режимов двухстадийной диффузии***

Поскольку исходными данными для расчета являются конечные параметры структуры ( $x_{pn}$  и  $N_0$  или  $\rho_s$ ), то расчет начинают со второй стадии диффузии. На этапе разгонки профиль распределения примеси описывается функцией Гаусса и левая часть уравнения (7.12) будет иметь вид

$$N_{введ}(x=x_{pn}) = N_0 \exp\left(-\frac{x_{pn}^2}{4D_2 t_2}\right), \quad (7.13)$$

где  $D_2$  – коэффициент диффузии при температуре разгонки;

$t_2$  – время разгонки.

Поверхностная концентрация примеси  $N_0$  задается либо ее величиной, либо значением поверхностного сопротивления  $\rho_s$ . Для определения поверхностной концентрации по  $\rho_s$  пользуются кривыми зависимости концентрации от средней проводимости  $\bar{\sigma}$  (рис. 7.5 и рис. 7.6) [10]. Величина средней проводимости

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\rho_s(x_{pn} - x)}, \quad (7.14)$$

где  $x$  – текущая координата по глубине, на которой измерено  $\rho_s$ . Так как средняя проводимость обычно рассчитывается на поверхности, то концентрация определяется по кривой, соответствующей отношению  $x/x_{pn} = 0$ .

Значение правой части уравнения (7.12) зависит от метода легирования области, в которую внедряется примесь, и от характера распределения исходной примеси. Если вводимая при-

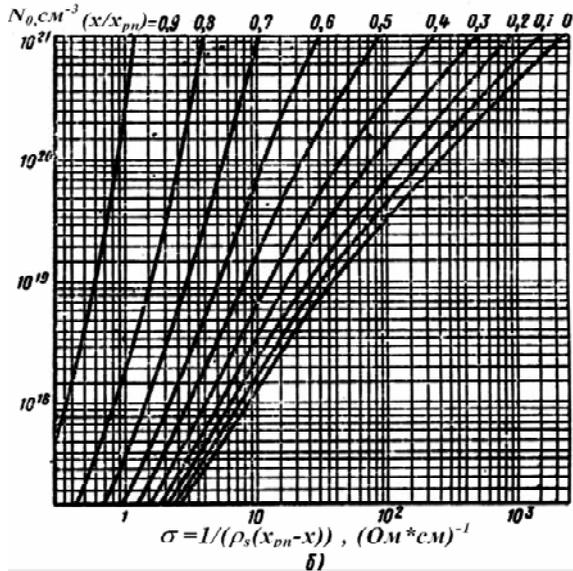
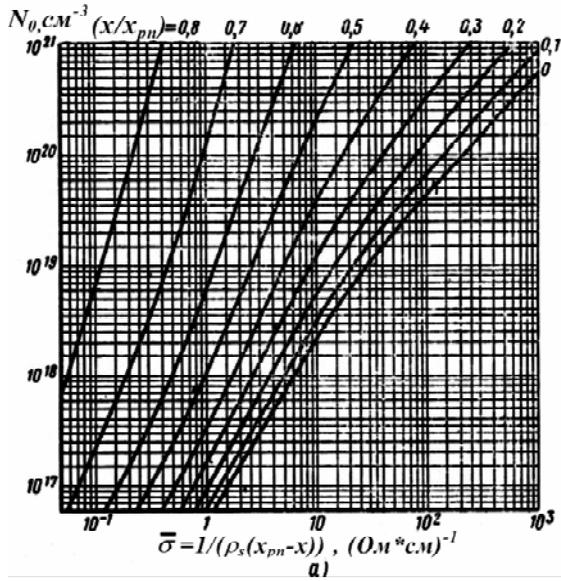
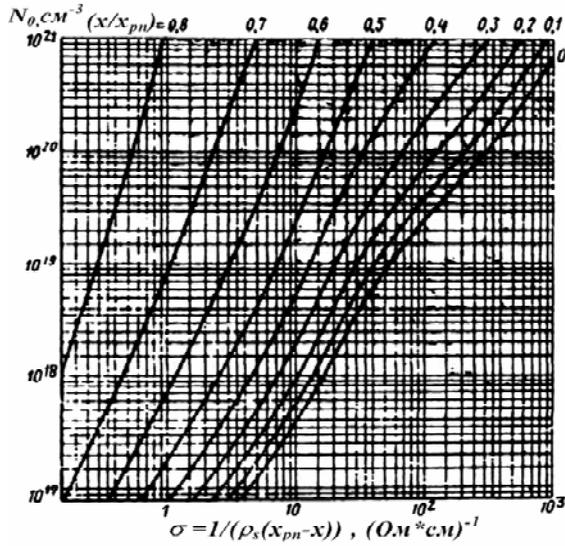
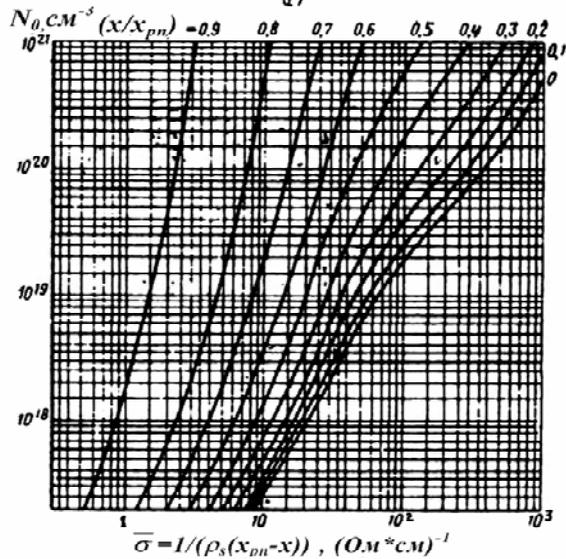


Рис. 7.5 – Зависимость  $N_0(1/\rho_s x_{pn})$  для слоев  $n$  Si с гауссовым распределением примеси: а –  $N_{исх} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; б –  $N_{исх} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$



а)



б)

Рис .7.6 – Зависимость  $N_0(1/\rho_s x_{pn})$  для слоев  $p$  Si с гауссовым распределением примеси: а –  $N_{исх} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; б –  $N_{исх} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

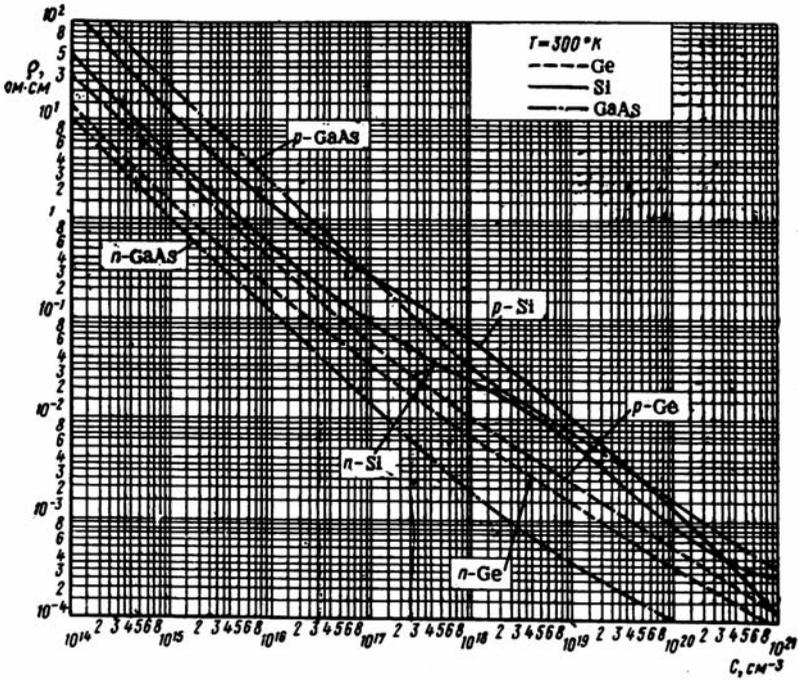


Рис. 7.7 – Зависимость удельного сопротивления от концентрации примеси для *Ge*, *Si* и *GaAs*

месь внедряется в монокристаллическую однослойную или двухслойную с эпитаксиальной пленкой подложку, исходная примесь в которых распределена равномерно, то  $N_{\text{исх}}$  определяется по кривым зависимости удельного сопротивления от концентрации примеси (рис. 7.7). Значение удельного сопротивления подложки либо задается, либо определяется из маркировки подложки (см. подраздел 6.2). Если же примесь внедряется в область, ранее легированную методом диффузии, то значение концентрации  $N_{\text{исх}}$  рассчитывается по уравнению, описывающему закон распределения примеси в ранее легированной области при  $x$  равном глубине залегания  $p-n$ -перехода рассчитываемой области.

Из уравнений (7.12) и (7.13) можно определить время разгонки  $t_2$

$$t_2 = \frac{x_{pn}^2}{4D_2 \ln\left(\frac{N_0}{N_{ucx}}\right)}.$$

Выбрав температуру разгонки в рекомендованном диапазоне 1000–1250 °С [2], определяется коэффициент диффузии  $D_2$  по уравнению (7.1), а затем вычисляется время разгонки  $t_2$ . При известных  $D_2$  и  $t_2$  по уравнению (7.8) определяется количество примеси  $Q_2$ , которое вводится для получения заданной поверхностной концентрации  $N_0$

$$Q_2 = N_0 \sqrt{\pi D_2 t_2}.$$

Однако истинное количество примеси  $Q_1$ , которое надо ввести, будет зависеть от процесса перераспределения примеси между кремнием и пленкой SiO<sub>2</sub>, выращенной на этапе разгонки

$$Q_1 = \frac{Q_2}{m}, \quad (7.15)$$

где  $m$  – коэффициент сегрегации (см. табл. 7.1).

Требуемое количество примеси должно быть введено на этапе загонки, и оно равно

$$Q_1 = 1,13 N_p \sqrt{D_1 t_1}. \quad (7.16)$$

Величина предельной растворимости примеси  $N_p$  определяется по кривым, представленным на рис. 7.2. Приравняв (7.15) и (7.16), получаем выражение для времени загонки  $t_1$

$$t_1 = \frac{\pi N_0^2 x_{pn}^2}{5,1 m^2 N_p^2 D_1 \ln\left(\frac{N_0}{N_{ucx}}\right)}. \quad (7.17)$$

Подставляя температуру загонки  $T$  в пределах 800–1000 °С, рассчитываем  $D_1$  и далее время загонки  $t_1$ . Во избежание жесткого контроля времени загонки его следует принимать не менее 20 мин, снижая соответственно температуру процесса.

### Расчет режимов одностадийной диффузии

При расчете режимов одностадийной диффузии выбор времени и температуры диффузии так же, как и в случае двухстадийной диффузии, определяется из условия, что на глубине залегания  $p-n$ -перехода концентрация введенной примеси равна концентрации исходной примеси. Поскольку распределение примеси при одностадийной диффузии (из неограниченного источника) подчиняется закону интеграла функции ошибок, то левая часть уравнения (7.12) будет иметь вид

$$N_{\text{введ}}(x=x_{pn}) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x_{pn}}{2\sqrt{D_1 t_1}}, \quad (7.22)$$

где  $N_0$  – заданная поверхностная концентрация примеси.

Если же задано поверхностное сопротивление  $\rho_s$ , то величина  $N_0$  определяется по графикам зависимости концентрации от средней проводимости слоя  $\bar{\sigma}$  (рис. 7.8. и 7.9) для  $\operatorname{erfc}$  – распределения по вышеизложенной методике. Правая часть уравнения (7.12) расписывается, как и в случае двухстадийной диффузии. Значения функции  $\operatorname{erfc} z$  приведены в табл. 7.2.

Однако при расчете времени диффузии следует учитывать, что при высоких уровнях легирования, которые имеют место в эмиттерной области биполярных транзисторов и в областях истока и стока МДП-транзисторов, коэффициент диффузии помимо температуры зависит еще от концентрации [11]. Как показали эксперименты, можно принять, что среднее значение коэффициента диффузии в этом случае описывается выражением

$$D = 1,5D_0 \exp(-E_a / kT). \quad (7.23)$$

Используя диапазон температур от 800 до 1100 °С, рассчитывается время диффузии.

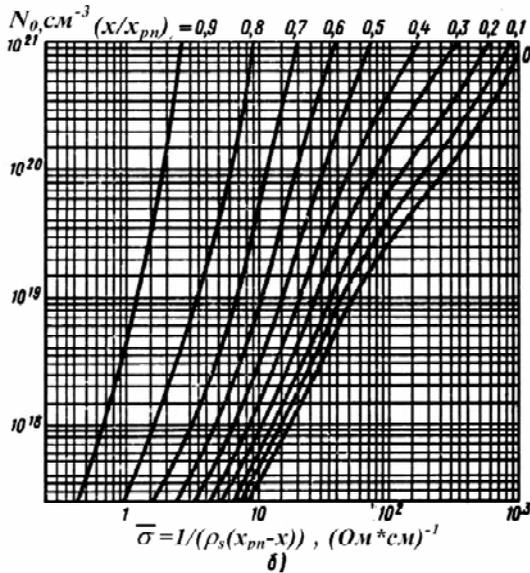
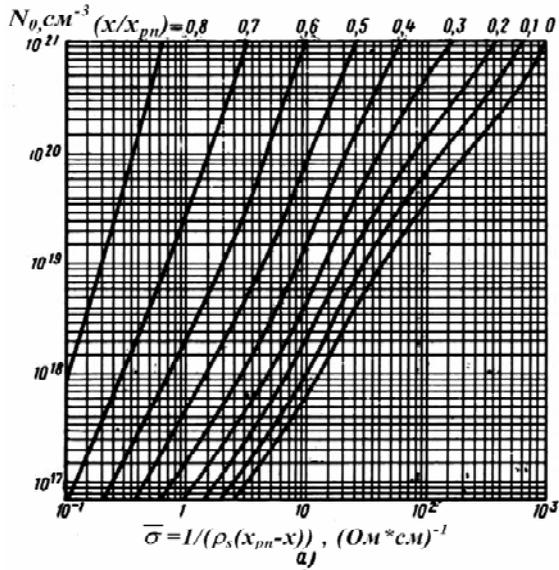


Рис. 7.8 – Зависимость  $N_0(1/\rho_s x_{pn})$  для слоев  $n$  Si с  $\text{erfc}$  распределением примеси: а –  $N_{\text{усх}} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; б –  $N_{\text{усх}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

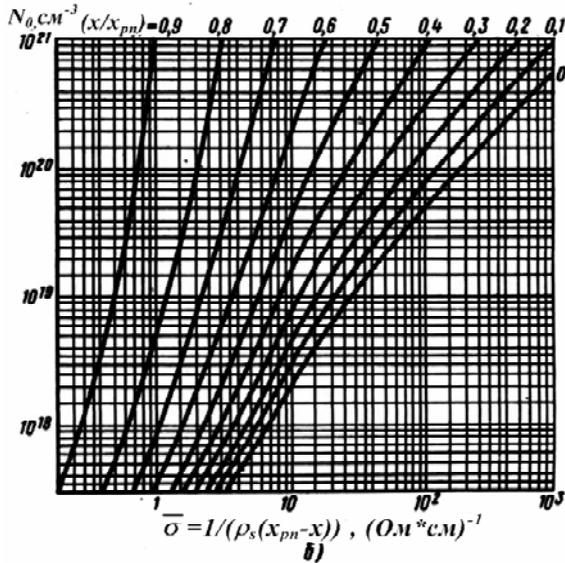
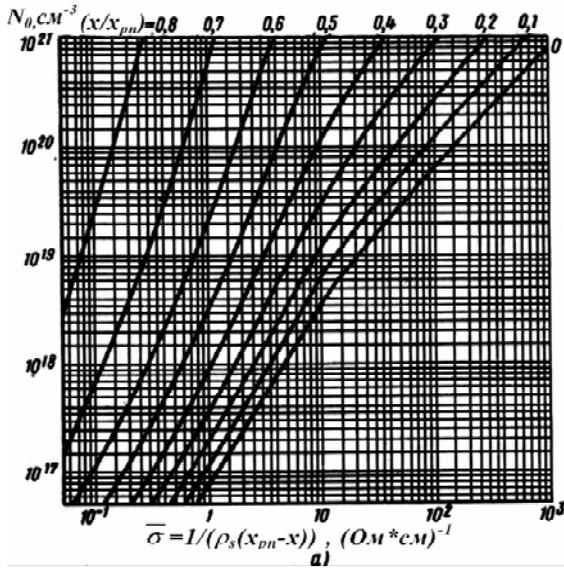


Рис. 7.9 – Зависимость  $N_0(1/\rho_s x_{pn})$  для слоев  $p$  Si с  $\text{erfc}$  распределением примеси: а –  $N_{\text{усх}} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; б –  $N_{\text{усх}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Таблица 7.2 – Значения функции  $erfc z$ 

$z$	$erfc z$	$z$	$erfc z$
0	1,00000	2,00	0,00468
0,10	0,88754	2,10	0,00298
0,20	0,77730	2,20	0,00186
0,30	0,67137	2,30	0,00114
0,40	0,57161	2,40	0,000689
0,50	0,47950	2,50	0,000407
0,60	0,39614	2,60	0,000236
0,70	0,32220	2,70	0,000134
0,80	0,25790	2,80	0,000075
0,90	0,20309	2,90	0,000041
1,00	0,15730	3,00	0,00002209
1,10	0,11980	3,10	0,00001165
1,20	0,08969	3,20	0,00000603
1,30	0,06599	3,30	0,00000306
1,40	0,04772	3,40	0,00000152
1,50	0,03390	3,50	0,000000743
1,60	0,02365	3,60	0,000000356
1,70	0,01621	3,70	0,000000167
1,80	0,01091	3,80	0,000000077
1,90	0,00721	3,90	0,000000035

### 7.3 Расчет профилей распределения примеси

Параметры элементов интегральных микросхем определяются характером распределения примеси, который зависит от структуры элемента и технологии его получения. Рассмотрим в качестве примера расчет профилей распределения примеси в транзисторе биполярной интегральной схемы, изготовленной по эпитаксиально-планарной технологии.

Для транзистора, структура которого представлена на рис. 7.10, результирующий профиль распределения будет равен

$$N_{рез}(x) = N_{к}(x) - N_{б}(x) + N_{э}(x), \quad (7.24)$$

где  $N_{к}(x)$  – профиль распределения примеси в коллекторе;

$N_{б}(x)$  – профиль распределения примеси в базе;

$N_3(x)$  – профиль распределения примеси в эмиттере.

Поскольку в данной структуре коллектор изготовлен на основе эпитаксиальной пленки, которая равномерно легирована по глубине, то концентрация примеси в коллекторе равна концентрации эпитаксиальной пленки  $N_{ЭП}$  и не зависит от  $x$

$$N_{\kappa}(x) = N_{ЭП} = const. \quad (7.25)$$

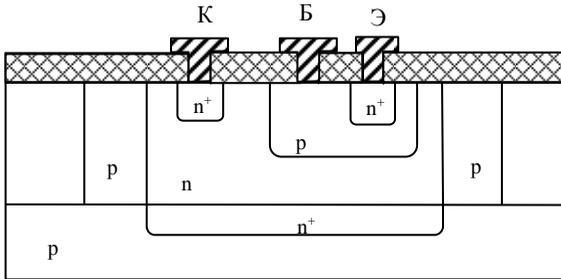


Рис. 7.10 – Структура биполярного транзистора

Профиль распределения примеси в базе подчиняется закону Гаусса, так как база обычно легируется в две стадии

$$N_6(x) = N_{06} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{62}t_{62}}\right), \quad (7.26)$$

где  $N_{06}$  – поверхностная концентрация в базовом слое;

$D_{62}$  – коэффициент диффузии примеси при температуре разгонки базы;

$t_{62}$  – время разгонки при диффузии базы.

При построении профиля распределения примеси в эмиттере учитывается, что эмиттер чаще всего получают одностадийной диффузией. Поэтому распределение примеси подчиняется закону интеграла функции ошибок

$$N_3(x) = N_{03} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_3 t_3}},$$

где  $N_{03}$  – поверхностная концентрация в эмиттерной области;

$D_3$  – коэффициент диффузии при температуре диффузии эмиттера;

$t_3$  – время диффузии.

#### **7.4 Технология получения диффузионных $p-n$ -переходов**

При изготовлении полупроводниковых ИМС локальную диффузию примеси проводят с использованием маски из оксида кремния, окна в которой получены методом фотолитографии. Как уже отмечалось, диффузию чаще всего проводят в две стадии. Вначале на поверхности пластины создают относительно тонкий диффузионный слой с высокой концентрацией примеси, а затем пластину нагревают в атмосфере кислорода, не содержащей примесь, в результате происходит перераспределение примеси из приповерхностного слоя в пластину. На поверхности пластины протекает реакция кремния с кислородом с образованием пленки  $SiO_2$ , которая препятствует обратной диффузии примеси.

Для получения легированных областей использовать чистые легирующие элементы обычно трудно: бор тугоплавкий и при температуре диффузии имеет ничтожно малую упругость пара, фосфор при нагреве легко воспламеняется, мышьяк высокотоксичен. Поэтому в качестве источников примеси применяют различные соединения (ангидриды, галогениды, гидриды) легирующего элемента, обладающие достаточной летучестью и позволяющие обеспечить нужную концентрацию примеси. Такие соединения получили название **диффузантов**.

В зависимости от состояния при температуре 20 °С различают твердые, жидкие и газообразные диффузанты. В зону диффузии, где располагают кремниевые пластины, диффузант вводят в газообразном или (твердые и жидкие) в парообразном состоянии. Источники твердых и жидких диффузантов должны содержать регулируемые нагреватели для создания нужного давления пара.

Общим недостатком твердых диффузантов ( $B_2O_3, P_2O_5$ ) является трудность регулирования давления паров и, как следствие, пониженная воспроизводимость результатов диффузии. Кроме того, для их испарения требуется высокая и стабильная температура, что усложняет и удорожает оборудование. Обычно используют двухзонные диффузионные печи с камерой источника и камерой диффузии, каждая из которых имеет автономную систему нагрева и регулирования температуры.

При работе с жидкими диффузантами ( $BBr_3, PCl_3$  и др.), обладающими высокой упругостью пара при невысоких температурах, применяют более простые, однозонные печи. Для транспортировки паров диффузанта в зону диффузии (реактор) используют аргон и другие газы, не взаимодействующие с кремнием и практически не диффундирующие в него.

Наиболее технологичны газообразные диффузаны ( $B_2H_6, PH_3$  и др.), регулирование концентрации которых достигается наиболее простыми средствами. Источником в этом случае является баллон со сжатым газом (обычно гидридом). Результаты диффузии характеризуются высокой воспроизводимостью. Недостатком гидридов, ограничивающим их применение, является высокая токсичность, что требует более тщательной герметизации элементов установки, сбора продуктов реакции на выходе установки, контроля производственной атмосферы. Предельно допустимые концентрации в помещениях следующие ( $mg/m^3$ ): диборана – 0,5, фосфина – 0,1, арсина ( $AsH_3$ ) – 0,3 и стибина ( $SbH_3$ ) – 0,05.

На рис. 7.12 представлена схема однозонной диффузионной печи с источником жидкого диффузанта. Зона диффузии располагается в кварцевой трубе, снабженной резистивным нагревателем. Длина трубы должна быть такой, чтобы можно было создать рабочую зону (зону загрузки) длиной 40–60 см и поддерживать в ней температуру до 1250 °С с точностью  $\pm 0,25$ –0,5 °С, а также чтобы имелись нерабочие зоны по обе стороны от зоны загрузки с достаточно малым градиентом температуры. Диаметр трубы должен примерно вдвое превышать диаметр обрабатываемых пластин. Кварцевые трубы сохраняют прочность до

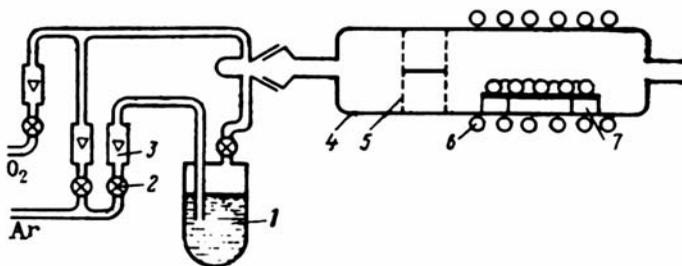


Рис. 7.12 – Схема однозонной диффузионной печи:  
 1 – источник жидкого диффузанта; 2 – кран; 3 – ротаметр;  
 4 – кварцевая труба; 5 – газосмеситель; 6 – нагреватель;  
 7 – кварцевая кассета с пластинами

1250 °С. При более высоких температурах предпочтительнее использовать трубы из корунда ( $Al_2O_3$ ).

Операционный цикл двухстадийной диффузии включает в себя следующие переходы:

- 1) «промывка» реактора аргоном с расходом до 150 дм<sup>3</sup>/час;
- 2) вывод реактора на заданный температурный режим;
- 3) загрузка кассеты с пластинами и прогрев ее в течение 10 мин с подачей аргона для удаления десорбирующихся газов;
- 4) подача аргона с парогазовой смесью (диффузانت, кислород);
- 5) выдержка при постоянной температуре в течение контролируемого времени (собственно этап загонки);
- 6) прекращение подачи смеси;
- 7) вывод реактора на заданный температурный режим разгонки;
- 8) подача аргона с кислородом;
- 9) выдержка при постоянной температуре в течение контролируемого времени разгонки;
- 10) прекращение подачи смеси и извлечение кассеты с подложками.

Весьма важную роль в диффузионном процессе играет окисляющая среда. Добавление небольшого количества кислорода в парогазовую смесь на этапе загонки (п.4) приводит к об-

разованию тонкой пленки  $SiO_2$  на поверхности пластины, что предохраняет поверхность кремния от эрозии. Проведение этапа разгонки в окисляющей среде (п.8) предотвращает, как уже указывалось, выход примеси, введенной на этапе загонки (создание конечного источника), за счет образования толстой пленки  $SiO_2$ .

## 7.5 Контроль параметров диффузионных слоев

Так как диффузия является одним из основных технологических процессов при изготовлении полупроводниковых ИМС, то после каждой операции диффузии производится контроль пластин. Контролируемыми параметрами являются глубина залегания  $p-n$ -перехода  $x_{pn}$  и поверхностное сопротивление  $\rho_s$  (поверхностная концентрация  $N_0$ ). Поскольку значение этих параметров не зависит от площади диффузии, измерять их можно на пластине – «свидетеле», которую одновременно с рабочими пластинами вводят в зону диффузии.

Величину  $x_{pn}$  определяют методом сферического шлифа (рис. 7.13).

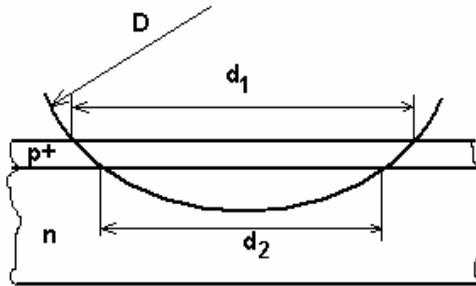


Рис. 7.13 – Измерение сферического шлифа

На поверхности пластины вышлифовывается лунка с помощью вращающегося шарика диаметром  $D$  на глубину больше глубины залегания  $p-n$ -перехода. Для четкого выявления  $p-n$ -перехода применяют химическое окрашивание шлифа.

При обработке шлифа в растворе 20 ч  $HF$  + 100 ч  $CuSO_4$   $n$ -области покрываются медью, а при обработке в плавиковой кислоте  $HF$  с добавлением 0,1 %  $HNO_3$   $p$ -области темнеют. Измеряя с помощью инструментального микроскопа геометрические параметры шлифа  $d_1$  и  $d_2$ , рассчитывают глубину залегания  $p-n$ -перехода по следующему выражению

$$x_{pn} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{4D}.$$

Поверхностное сопротивление слоя  $\rho_s$  может быть измерено с помощью мостовой схемы (рис. 7.14) четырехзондовым методом.

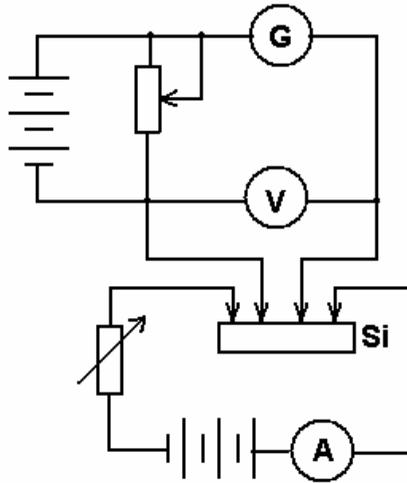


Рис. 7.14 – Схема измерения удельного поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов четырехзондовым методом

Установив ноль гальванометра  $G$ , определяют величину напряжения  $U$  и протекающего в схеме тока  $I$ . Величина поверхностного сопротивления  $\rho_s$  определяется по формуле

$$\rho_s = 4,53 \frac{U}{I}. \quad (7.36)$$

Эта формула справедлива при расстоянии между зондами  $S$  много больше глубины залегания  $p-n$ -перехода и при диаметре пластины много больше  $S$ . Обычно величина  $S$  выбирается порядка 1 мм.

Между поверхностным сопротивлением слоя  $\rho_s$  и поверхностной концентрацией  $N_0$  существует жесткая связь. Зная  $\rho_s$ , по методике, приведенной в подразделе 7.2, можно определить  $N_0$ , воспользовавшись кривыми на рис. 7.5, 7.6, 7.8 и 7.9.

## 7.6 Ионное легирование полупроводников

Сущность ионной имплантации (ионного легирования) заключается во внедрении ионов примеси вглубь твердого тела [15]. Примесь загоняется не за счет диффузии при высокой температуре, а за счет энергии ионизированных молекул примеси. Схема установки показана на рис. 7.15.

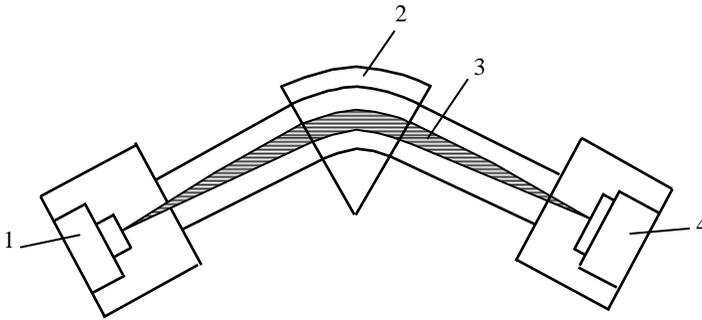


Рис. 7.15 – Схема установки ионной имплантации:  
1 – ионный источник; 2 – электромагнитный сепаратор;  
3 – траектории ионов; 4 – подложка

Ионный источник служит для ионизации молекул примеси и формирования ионного пучка. Ионы из ионного источника извлекаются под действием ускоряющего потенциала  $U$ . В сепараторе ионы движутся в постоянном магнитном поле. Вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости

чертежа. Сила Лоренца искривляет траектории движения ионов по радиусу  $R$ :

$$R = \frac{mv}{qB},$$

где  $\frac{m}{q}$  – отношение массы иона к его заряду;

$v$  – скорость иона;

$B$  – величина магнитного поля.

В свою очередь скорость иона определяется

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Таким образом, по радиусу  $R$  проходят только ионы примеси определенного сорта ( $m/q$ ) и с постоянной энергией. Такие ионы облучают мишень (подложку из кремния). Параметры установок ионной имплантации: энергии ионов составляют 50–300 кэВ, а дозы облучения  $Q$  – от  $10^{13}$  до  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

В результате торможения ионов в материале мишени они останавливаются на определенных глубинах, изменяя первоначальные свойства вещества. В полупроводниковой технологии ионная имплантация обладает рядом преимуществ по сравнению с термическим диффузионным методом введения примесей. Внедряя ионы III и V групп в монокристалл Si, можно получить  $p$ - $n$  и  $n$ - $p$  переходы в любом месте на любой площади. Сначала на кремниевой пластине формируется защитная маска с помощью фотолитографии, затем осуществляется локальная имплантация примесей в полупроводник (рис. 7.16). В качестве маски чаще всего используются слои SiO<sub>2</sub> с толщиной, большей, чем пробег ионов в SiO<sub>2</sub>.

Для аморфных тел распределение внедренной примеси по глубине приблизительно гауссово и поэтому может быть охарактеризовано средним проецированным пробегом  $\bar{R}_p$  и среднеквадратичным отклонением  $\Delta R_p^{-2}$ . Распределение внедренной примеси по глубине определяется с помощью уравнения

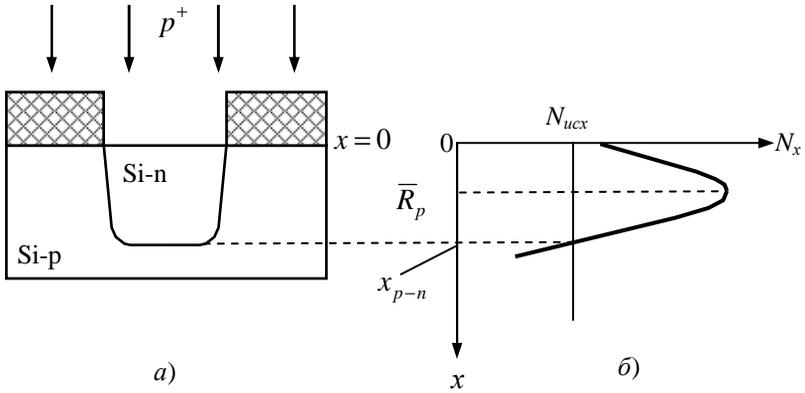


Рис. 7.16 – Пример ионной имплантации фосфора в кремний  $p$ -типа проводимости (а) и образование  $p$ - $n$ -перехода (б)

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p}} \cdot \exp \left[ -\frac{\left( x - \bar{R}_p \right)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2} \right], \quad (7.37)$$

где  $x$  – расстояние от поверхности вглубь полупроводника в направлении падения ионов. Максимальная концентрация внедренной примеси равна  $N_{\max} = \frac{Q}{\left( \sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p} \right)}$  и располагается на

глубине  $\bar{R}_p$ . Концентрация спадает и уменьшается в 2, 10 и 100 раз по отношению к  $N_{\max}$  соответственно на глубинах  $x_2 = \bar{R}_p \pm 1,2\Delta\bar{R}_p$ ;  $x_{10} = \bar{R}_p \pm 2\Delta\bar{R}_p$ ;  $x_{100} = \bar{R}_p \pm 3\Delta\bar{R}_p$ .

Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода определяется из уравнения (7.37) для  $N(x)$  при  $x = x_{p-n}$  и концентрации  $N(x)$ , равной исходной концентрации  $N_{uxx}$  в той области полупроводника, куда ведется имплантация. Решая это уравнение, получим

$$x_{p-n} = \bar{R}_p \pm \Delta \bar{R}_p \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \cdot \frac{Q}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta \bar{R}_p \cdot N_{\text{исх}}}}}. \quad (7.38)$$

Глубиной залегания  $p$ - $n$ -перехода можно управлять, изменяя энергию ионов  $E_0$  (изменение  $\bar{R}_p$  и  $\Delta \bar{R}_p$ ), дозу облучения  $Q$  и исходную концентрацию примеси в той области полупроводника, куда ведется имплантация. При ионной имплантации в полупроводнике возникают радиационные дефекты, представляющие собой пару Френкеля: свободный атом-вакансия и атом в междоузлии. В процессе имплантации идет накопление радиационных дефектов, которые приводят к разупорядочению кристаллической решетки полупроводника.

Для того, чтобы отжечь вносимые имплантацией радиационные нарушения, необходима последующая термообработка. Отжиг необходим для активации внедренной примеси и восстановления кристаллической структуры полупроводника. Необходимая для этого температура, например, для кремния может достигать до 1000 °С. Следует различать низкотемпературный и высокотемпературный отжиги. Низкотемпературный отжиг – это отжиг при таких температурах, когда процессом термической диффузии можно пренебречь. При высокотемпературном отжиге (обычно длительность отжига составляет от 10 мин до 1 часа) может происходить термическая диффузия. Влияние отжига на распределение внедренной примеси рассмотрено в [15] и описывается уравнением

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot (\Delta \bar{R}_p^2 + 2Dt)^{1/2}} \cdot \exp \left[ -\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2 \cdot \Delta \bar{R}_p^2 + 4Dt} \right], \quad (7.39)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии примеси, соответствующей по значению коэффициенту диффузии при традиционном диффузионном процессе;

$t$  – время диффузии.

Высокотемпературный отжиг можно использовать для увеличения глубины залегания  $p$ - $n$ -переходов. Низкотемпературный отжиг применяют при получении мелких  $p$ - $n$ -переходов и

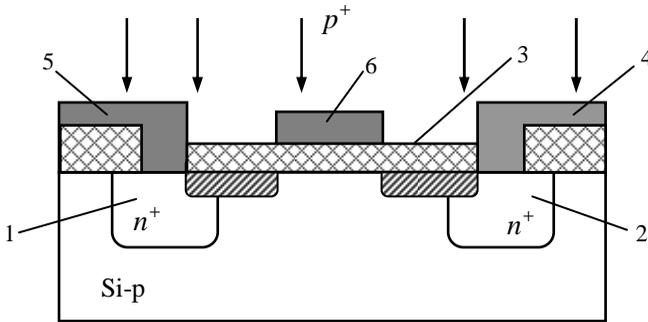


Рис. 7.17 – Структура МДП-транзистора: 1, 2 – области истока и стока; 3 – подзатворный диэлектрик; 4, 5 – электроды; 6 – затвор

распределение примеси в этом случае описывается уравнением (7.37).

Одно из первых практических применений технологии ионной имплантации связано с МДП-транзисторами. Структура МДП-транзистора показана на рис. 7.17. Техмаршрут изготовления МДП-транзисторов с применением ионной имплантации следующий.

Области истока и стока получены диффузией. После окисления и фотолитографии вскрывают окно для выращивания подзатворного диэлектрика. Затем проводят фотолитографию и вскрывают окна под контакты к областям истока и стока. Нанеся слой алюминия и выполнив фотолитографию, создают электроды стока, истока и затвор. Следующим этапом является создание самосогласованного затвора путем имплантации фосфора. Затвор играет роль маски, которая обеспечивает его самосовмещение, необходимое для точного примыкания области затвора к контактам истока и стока. В результате самосовмещения снижается паразитная емкость между затвором и стоком, что улучшает характеристики транзистора.

Ионная имплантация на операции самосовмещения осуществляется через тонкий слой подзатворного диэлектрика, например,  $\text{SiO}_2$ . Поэтому для построения профиля распределения внедренной примеси следует воспользоваться методикой, изложенной в [15].

При формировании СБИС на биполярных транзисторах база и эмиттер формируют с помощью ионной имплантации. Для получения резкого  $p-n$ -перехода эмиттер легируют ионами мышьяка, а базу – ионами бора. Коллектор получают или в эпитаксиальном слое или за счет диффузии соответствующей примеси.

В качестве резисторов для СБИС используются легированные слои с высокой однородностью поверхностного сопротивления. Получить поверхностно однородный слой с малой концентрацией примесей методом диффузии довольно трудно. Речь идет о величине сопротивления выше  $200 \text{ Ом/}$  . Если, например, необходимо получить сопротивление  $20 \text{ кОм}$  в виде слоя с сопротивлением  $200 \text{ Ом/}$  , то потребуется площадь кристалла порядка  $10^{-2} \text{ мм}^2$ , что гораздо больше, чем площадь, занимаемая диодами и транзисторами. Если же использовать ионное легирование, то можно довольно легко получить высокоомные слои. В результате легирования кремния ионами фосфора  $P^+$  получают сопротивление в  $n$ -слое, а ионами бора  $B^+$  – сопротивление в  $p$ -слое. Легирование производится через пленку  $\text{SiO}_2$  толщиной порядка  $0,1 \text{ мкм}$ . После легирования производится отжиг пластин в атмосфере азота. Изменением дозы облучения и температуры отжига управляют поверхностным сопротивлением резистивного слоя от  $10 \text{ Ом/}$  до  $100 \text{ кОм/}$  . Эта технология изготовления резисторов совместима с технологией изготовления биполярных транзисторов. Формирование резисторов часто производят одновременно с формированием базовой области. Конфигурация задается с помощью фотолитографии. На месте удаленного слоя  $\text{SiO}_2$  выращивают новый окисел толщиной  $0,1 \text{ мкм}$ , через который внедряют ионы бора. Далее получают контакты к легированной области. Распределение концентрации примеси в легированной области рассчитывается без отжига по уравнению (7.37), а с отжигом – по уравнению (7.39).

Достоинство ионного легирования заключается в возможности использования любых примесей, в том числе малой растворимостью и низким коэффициентом диффузии. Такая примесь загоняется принудительно в полупроводник за счет энергии ионов. Низкая температура процесса (не более  $100\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$ )

позволяет легировать сложные полупроводниковые материалы (*InAs*, *GaAs*). Можно получать равномерное распределение примеси за счет легирования с разными энергиями и дозами. Ионное легирование позволяет получать очень тонкие слои малых размеров, так как мало боковое рассеяние ионов по сравнению с боковой диффузией.

Недостатком ионного легирования является появление радиационных дефектов, которые требуют отжига. Отжиг необходим для активации внедренной примеси и восстановления кристаллической структуры полупроводника.

## 8 ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ

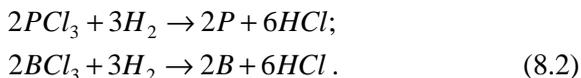
### 8.1 Эпитаксия химическим осаждением из газовой фазы

Эпитаксия при производстве полупроводниковых приборов и ИМС – это ориентированное наращивание на монокристаллической подложке монокристаллической пленки определенного типа проводимости. Этот технологический прием получил широкое применение как для изготовления дискретных приборов, так и биполярных и МДП ИМС. При использовании его в эпитаксиально-планарных структурах тонкий эпитаксиальный слой (2–10 мкм) содержит элементы ИМС, а подложка толщиной порядка 200 мкм играет конструкционную роль.

В отличие от диффузионного или ионного легирования полупроводника, при которых  $p-n$ -переход образуется в результате перекомпенсации влияния исходной примеси и образования области с более высокой концентрацией примеси, эпитаксия дает возможность получать слои с широким диапазоном удельных сопротивлений, не зависящих от сопротивления подложки. Из трех известных методов эпитаксии (молекулярно-лучевая эпитаксия, кристаллизация из жидкой фазы, химическое осаждение из газовой фазы) при получении эпитаксиальных пленок кремния наиболее подходящим является последний метод. Для обеспечения совершенства структуры эпитаксиальных пленок метод химического осаждения из газовой фазы позволяет иметь высокую подвижность осаждаемых атомов на подложке. Это обеспечивается высокой температурой подложки, протеканием химической реакции на подложке с выделением одиночных атомов полупроводника и удалением примесей и структурных несовершенств подложки ее газовым травлением перед началом эпитаксии. Наращивание эпитаксиальных слоев кремния осуществляется в результате водородного восстановления тетрахлорида кремния или термического разложения силана. Наиболее распространена реакция



которая при температуре 1000 °С протекает с удовлетворительной скоростью. Для получения легированных слоев *n*- или *p*-типа в парогазовую смесь вводят легирующие добавки. При этом используют реакции



Протекание гетерогенных химических реакций (8.1) и (8.2) на подложке обусловлено следующими сложными явлениями: 1) насыщение газа – носителя реагирующими компонентами ( $SiCl_4, PCl_3, BCl_3$ ), смешение его с водородом в необходимых пропорциях и перенос их к поверхности подложки; 2) адсорбция реагентов на подложках; 3) собственно химическая реакция на поверхности; 4) поверхностная диффузия осажденных атомов; 5) десорбция продуктов реакции; 6) удаление их с потоком газаносителя и непрореагировавшими остатками газовой смеси. Каталитические свойства поверхности полупроводникового кристалла – подложки благоприятствуют осаждению пленки в первую очередь на этой поверхности, а не на стенках реактора, особенно если стенки поддерживаются в ненагретом состоянии. Общая скорость процесса осаждения определяется одной или несколькими наиболее медленно идущими стадиями. При протекании гетерогенных процессов можно выделить две области: кинетическую и диффузионную. В кинетической области лимитирующими являются вторая-пятая стадии, идущие на поверхности. Скорость осаждения в этом случае сильно зависит от температуры. В диффузионной области лимитирующими являются первая и шестая стадии, определяемые процессами массопереноса реагентов в газовой фазе. Поэтому скорость осаждения в этой области сильно зависит от скорости потока газа, коэффициентов диффузии, геометрических размеров реактора и почти не зависит от температуры [13].

При выборе условий эпитаксиального наращивания необходимо иметь расчетные соотношения, связывающие скорость осаждения с задаваемыми или выбираемыми параметрами реактора и процесса. К числу таких параметров относятся геометри-

ческая форма реактора, скорость потока газовой смеси в реакторе, концентрация используемых реагентов и температура подложек.

Исходной предпосылкой для анализа условий роста эпитаксиальных слоев является изучение термодинамики и кинетики химических реакций. При проведении термодинамических расчетов определяется изменение свободной энергии реакций  $\Delta G$ . По знаку и абсолютной величине  $\Delta G$  судят о протекании реакции в прямом или обратном направлении.

### *Технология выращивания эпитаксиальных пленок*

Для реализации метода химического осаждения из газовой фазы используются реакторы с непрерывной подачей рабочей смеси через него (метод открытой трубы) (рис. 8.4) [2].

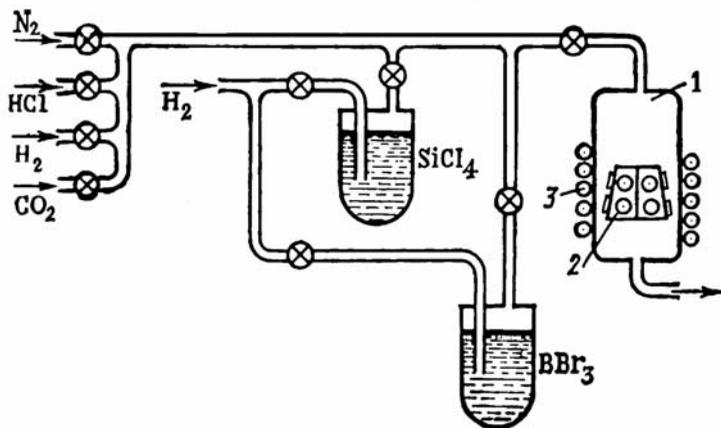


Рис. 8.4 – Схема установки с вертикальным реактором и индукционным нагревом для эпитаксиального наращивания пленки:

1 – реактор; 2 – держатель пластин; 3 – индуктор

В представленной на рисунке установке для выделения кремния и легирующей примеси (бора) используется реакция восстановления, причем источники кремния ( $SiCl_4$ ) и примеси

( $BBr_3$ ) – жидкие. Устройство газораспределения (на схеме не показано) обеспечивает подачу газов, необходимых для выполнения полного цикла обработки: водорода, выполняющего роль реагента, а также газа-носителя для транспортировки паров  $SiCl_4$  и  $BBr_3$ ; азота, применяемого для продувки системы; хлористого водорода для травления пластин; углекислого газа для получения пленки  $SiO_2$  на поверхности эпитаксиальной пленки. Каждый из газов подается из баллона по отдельной магистрали, содержащей фильтр, регулятор давления, запорный вентиль, манометр, ротаметр (для измерения расхода газа) и клапан с электромагнитным управлением.

Основные реагенты в поток газа-носителя подаются в основном барботажным методом и испарением с поверхности. При барботировании (см. рис. 8.4) газ-носитель пропускают через жидкость для насыщения ее парами. В источниках испарительного типа газ проходит над поверхностью жидкости и захватывает ее пары. Источники размещены в термостатах, позволяющих поддерживать температуру с точностью  $\pm 1$  °С. Поскольку расход водорода значителен, во избежание выброса испаряемой жидкости по магистрали в сторону камеры реактора в источник подают лишь 2–5 % всего количества водорода, а на выходе из источника (в общей магистрали) концентрированная смесь разбавляется основным потоком.

Реакторы могут быть вертикальными и горизонтальными. В вертикальных реакторах, имеющих осевую симметрию конструкции, легче получить симметрию температурного и газодинамического полей, что при многоместной обработке обеспечивает воспроизводимость результатов.

Температура, необходимая для гетерогенной реакции, создается непосредственно на поверхности пирамидального держателя пластин, в то время как стенки реактора остаются относительно холодными. Это достигается за счет индукционного или резистивного нагрева держателя и водяного охлаждения стенок реактора. Через медную трубку индуктора также пропускают воду. Пирамиду-пластинодержатель выполняют из высокочистых сортов графита, покрытого (во избежание загрязнения реактора) карбидом кремния. Для создания идентичных условий оса-

ждения грани пирамиды имеют наклон  $5-7^\circ$ . Предусматривается также возможность вращения пирамиды. Контроль температуры пластин осуществляется фотопирометром, установленным вне реактора. Реактор представляет собой кварцевую трубу, на выходе которой отходы реакции собираются специальным устройством (скруббером), где сжигаются в водородном пламени.

Поскольку подготовленная к эпитаксии поверхность пластины в период хранения и транспортировки способна адсорбировать атмосферные газы, в том числе кислород и влагу с образованием тонких пленок окисла, цикл обработки должен предусматривать удаление поверхностного слоя в реакторе непосредственно перед наращиванием. С этой целью поверхность обрабатывают водородом при высокой температуре (при этом происходит восстановление кремния из окисла), а затем хлористым водородом для стравливания нарушенного слоя. Содержание  $HCl$  в  $H_2$  составляет 1–2 об.%, при этом достигается скорость травления  $\sim 0,5$  мкм/мин.

Собственно наращивание начинается с момента подачи в реактор смеси  $H_2$  и  $SiCl_4$ , а также смеси  $H_2$  и  $BBr_3$ . Скорость роста пленки лежит в пределах от десятых долей до нескольких микрометров в минуту. Степень легирования (концентрация примеси растущей пленки) зависит от соотношения  $BBr_3$  и  $SiCl_4$  в парогазовой смеси.

Полностью цикл работы установки эпитаксиального наращивания состоит из следующих этапов:

- 1) загрузка пластин и герметизация реактора;
- 2) продувка реактора азотом, затем водородом для вытеснения атмосферного воздуха;
- 3) нагрев и выдержка в атмосфере водорода (восстановление окислов);
- 4) газовое травление с помощью  $HCl$  на глубину 1–2 мкм (удаление нарушенного и загрязненного слоя). По окончании – продувка водородом;
- 5) снижение температуры до рабочего значения, подача смеси  $H_2$ ,  $SiCl_4$  и  $BBr_3$  (наращивание слоя). По окончании – продувка водородом;

б) подача смеси  $CO_2$ ,  $SiCl_4$ ,  $H_2$  и осаждение окисной пленки  $SiO_2$  (гидролиз тетрахлорида кремния). Продувка водородом;

7) охлаждение в потоке водорода (плавное снижение мощности ВЧ-генератора);

8) продувка азотом, разгерметизация, выгрузка.

Для обеспечения главного условия выращивания эпитаксиальных пленок – высокой подвижности атомов на подложке и равномерного их легирования следует строго поддерживать температуру подложек, концентрацию реагентов, скорость потока газа. Температура подложек поддерживается в диапазоне 800–1350 °С с точностью  $\pm 5^\circ$ . Скорость потока газа в реакторе эпитаксиального наращивания должна быть достаточно высокой с тем, чтобы по ходу движения газа не происходило значительного обеднения газовой смеси и снижения скорости осаждения. Оптимальная скорость потока при реакции восстановления  $SiCl_4$  – 10–50 см/с, а при реакции разложения  $SiH_4$  30–50 см/с. Для обеспечения условий протекания реакции на подложке, а не в объеме реактора концентрация  $SiCl_4$  в потоке газа-носителя не должна превышать 0,5–1 %, а концентрация силана поддерживается равной 0,05–0,1 %. При этих условиях обеспечивается скорость роста эпитаксиальной пленки от 0,2 до 2 мкм/мин. Внедрение автоматической системы управления установками эпитаксиального наращивания обеспечивает выход годных эпитаксиальных структур по толщине и удельному сопротивлению с технологическим разбросом  $\pm 5$  %.

### ***Контроль эпитаксиальных слоев***

Основными параметрами, определяющими пригодность эпитаксиальных слоев для изготовления интегральных схем, являются тип проводимости, удельное сопротивление, толщина, распределение примесей и плотность дефектов.

Для определения толщины эпитаксиальных слоев применяют широко известные методы косоугольного и сферического шлифования, а также метод интерференции инфракрасных лучей (ИК-лучей).

Метод интерференции ИК-лучей основан на их отражении от поверхности эпитаксиального слоя и подложки. Отражение инфракрасных лучей в диапазоне длин волн 10–30 мкм происходит не только от поверхности эпитаксиального слоя, но и от границы раздела слой-подложка вследствие различия оптических констант (показателей преломления) слоя и подложки, содержащих различную концентрацию примесей. По картине интерференции отраженных лучей судят о толщине эпитаксиального слоя. Хорошие данные получаются, если сопротивление эпитаксиального слоя выше 0,1 Ом·см, а сопротивление подложки ниже 0,02 Ом·см. С увеличением концентрации примеси в слое возрастает поглощение ИК-лучей, с уменьшением концентрации примеси в подложке растет пропускание ею ИК-лучей, что ведет к уменьшению отражения на границе.

Разность хода лучей  $\delta$ , отраженных от эпитаксиального слоя и подложки, определяется толщиной слоя  $h$ , показателем его преломления  $n$  и углом преломления  $\varphi$

$$\delta = 2nh \cos \varphi .$$

Наблюдая интерференционную картину и измеряя разность хода лучей, вычисляют толщину пленки. Неоднородность слоя по толщине приводит к ухудшению контрастности интерференционной картины.

Плотность дефектов эпитаксиальных слоев определяется выявлением их с помощью специальных химических травителей. Так как дефекты упаковки зарождаются преимущественно на границе подложка – эпитаксиальный слой и образуют правильные тетраэдры, то высота этих тетраэдров равна толщине эпитаксиального слоя. При ориентации подложки по плоскости (111) основанием тетраэдров является равносторонний треугольник. Плотность дефектов определяется простым подсчетом их на единице поверхности слоя.

Удельное сопротивление эпитаксиальных слоев, если они образуют с подложкой  $p-n$ -переходы, измеряется широко известными четырехзондовым или двухзондовым методами. Для контроля эпитаксиальных слоев, образующих с подложкой контакты типа  $n-n^+$  и  $p-p^+$ , применяют трехзондовый метод.

Измерение распределения концентрации примеси в эпитаксиальных слоях проводят путем последовательного удаления тонких слоев и определения проводимости с помощью четырехзондового метода для слоев противоположного с подложкой типа проводимости или метода вольт-фарадной характеристики для слоев одного с подложкой типа проводимости.

## 8.2 Молекулярно-лучевая эпитаксия

Молекулярно-лучевая эпитаксия как процесс ориентированного роста из молекулярных пучков возникла в результате значительного усовершенствования широко известного способа нанесения пленок испарением в вакууме. Использование особо чистых источников материалов, сверхвысокий вакуум, оснащение аппаратуры гибкими системами управления и контроля технологического процесса в сочетании с диагностическими модулями позволило перейти к прецизионной эпитаксии на уровне монослоев полупроводников, диэлектриков и металлов.

Для обеспечения высокой подвижности атомов на подложке при конденсации атомов или молекул из пара на относительно холодные подложки в сверхвысоком вакууме приходится решать задачи:

- обеспечения химически чистой структурно упорядоченной поверхности подложки;
- обеспечения процесса зарождения роста пленок по «двухмерному механизму»;
- обеспечения процесса управления основным и примесным составом осаждаемых слоев;
- обеспечения процесса гибкой обратной связи между технологическими и диагностическими модулями.

В основе молекулярно-лучевой эпитаксии фактически лежит известный из тонкопленочной технологии метод вакуум-термического испарения и конденсации. В условиях осаждения соединений и твердых растворов формально реализуется метод трех и более температур (рис. 8.5).

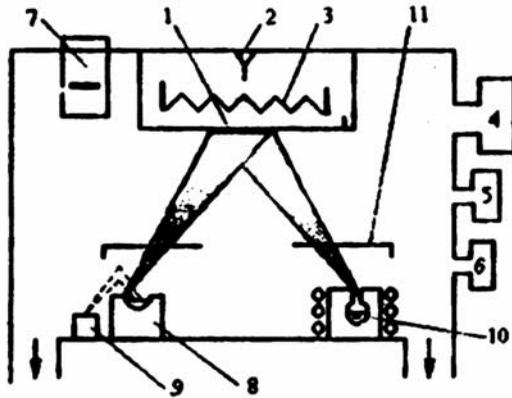


Рис. 8.5 – Схема установки МЛЭ. 1 – подложка; 2 – термопара; 3 – нагреватель; 4 – масс-спектрометр; 5 – оже-спектрометр; 6 – вакуумметр; 7 – кварцевый резонатор; 8 – молекулярные источники осаждаемого вещества; 9 – электронная пушка; 10 – источник легирующей примеси; 11 – заслонки

Регулировка потоков осаждаемого материала осуществляется, в первую очередь, выбором температуры источника испаряемого элемента, а также температурой подложки, на которой устанавливается подвижное равновесие между процессами «адсорбции-десорбции», происходящими одновременно с миграцией частиц по поверхности твердого тела и протеканием химических реакций. Наличие фазовых диаграмм состояния ростовой поверхности является желательным условием для правильного выбора режимов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии.

Кинетика процесса образования эпитаксиальной пленки определяется процессами адсорбции и конденсации. Когда испаряемые частицы (атом или молекула) ударяются о поверхность твердого тела, происходит энергообмен в результате взаимодействия частиц с атомами поверхности, благодаря которому частицы могут отразиться от подложки или перейти в термическое равновесие с поверхностью и конденсироваться на ней. Кроме того, возможен вариант пребывания этих частиц в адсорбированном состоянии, после чего они вновь испаряются с поверхности.

Вероятность протекания этих процессов является функцией среднего времени жизни адсорбированного атома на поверхности  $\tau_a$ , которое может быть определено по формуле

$$\tau_a = \nu_a^{-1} \exp\left(\frac{E_o}{kT_n}\right), \quad (8.30)$$

где  $\nu$  – частота колебаний адсорбированного атома около положения равновесия,  $\text{с}^{-1}$ ;

$E_o$  – энергия десорбции (энергия испарения атома с поверхности подложки), Дж;

$kT_n$  – величина, соответствующая средней кинетической энергии атомов вещества в адсорбированном состоянии.

Возможность образования пленки на подложке определяется также соотношением плотности потока конденсирующихся молекул и температуры подложки. С ростом температуры подложки увеличивается число испаренных с ее поверхности частиц, а при температуре выше некоторой критической наблюдается полное их испарение. Критическая температура зависит от природы конденсируемого вещества, физико-химических свойств подложки, степени ее чистоты и возрастает с увеличением интенсивности потока паров. Уменьшение плотности потока частиц при фиксированной температуре также может привести к полному их испарению. Таким образом, возможно введение понятия критической плотности потока, ниже которой при фиксированной температуре подложки конденсация не происходит. Зависимость критической плотности потока  $Q_{кр}$  от температуры подложки в соответствии с теорией Френкеля имеет вид

$$Q_{кр} = \frac{\nu}{4\pi R_a^2} \exp\left(-\frac{E_{dec} + \Delta E}{kT_n}\right), \quad (8.31)$$

где  $\nu$  – частота колебаний адсорбированного атома;

$R_a$  – радиус действия адсорбированного атома;

$E_{dec}$  – энергия десорбции;

$\Delta E$  – энергия связи атомов в центре конденсации;

$T$  – температура подложки.

Для реализации условий, при которых возможно получить эпитаксиальные пленки из молекулярных пучков, используются сверхвысоковакуумные установки, содержащие электроразрядные и сорбционные насосы с исходным вакуумом  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  Па. В процессе роста пленки поддерживается вакуум  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  Па.

Подготовку подложек осуществляют при термической и ионной очистке. Для формирования молекулярных потоков используют метод трех температур (см. рис. 8.5). Один источник создает поток основного вещества (например,  $Si$ ), а второй обеспечивает поступление легирующей примеси на подложку, подложка нагревается до температуры 400–800 °С. Для выращивания эпитаксиальной пленки требуемого качества необходим тщательный контроль структуры и чистоты как подложки, так и формируемого слоя. С этой целью установки молекулярно-лучевой эпитаксии снабжаются сложными, весьма информативными устройствами контроля (электронный оже-спектрометр, вторичный ионный масс-спектрометрический анализатор). Кристаллографический анализ подложек и растущих слоев производят методом дифракции электронов. Выполнение требований к условиям роста и контроля позволяет получать эпитаксиальные пленки со скоростью роста 0,01–0,03 мкм/мин. Низкая температура подложки практически исключает эффект автолегирования, что повышает качество структур.

## 9 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

### 9.1 Диэлектрические слои для полупроводниковых ИМС

Диэлектрические пленки широко используются в технологии интегральных микросхем для различных целей:

- маскирование при диффузии и ионном легировании, окислении и травлении;
- изоляция приборов в схеме, контактов и межсоединений;
- в качестве подзатворного диэлектрика в МДП ИС;
- пассивация поверхности интегральных структур.

Для получения диэлектрических слоев диоксида кремния  $SiO_2$ , наиболее широко применяемого в полупроводниковых ИМС, используют методы:

- термического окисления;
- пиролитического осаждения;
- плазменного и электролитического анодирования;
- ионного распыления.

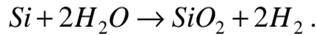
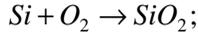
Второй диэлектрик, используемый в полупроводниковой технологии, нитрид кремния  $Si_3N_4$  получают пиролитическим осаждением и ионным распылением. Так как наиболее широкое применение нашел диоксид кремния, полученный термическим окислением, рассмотрим физико-химические основы этого метода.

### 9.2 Термическое окисление кремния

#### *Механизм роста окисла и кинетика окисления*

Особенности роста пленки и кинетики окисления кремния определяются структурой и свойствами пленки  $SiO_2$ . Окисел обладает открытой пространственно-полимерной структурой с прочными связями  $\equiv Si-O-Si \equiv$ . Это один из лучших диэлектриков с шириной запрещенной зоны более 8 эВ. Рост окисла

происходит в атмосфере сухого кислорода или паров воды согласно реакциям



При этом происходит перераспределение валентных электронов между кремнием и кислородом и образуется ковалентная связь между атомами. Рост окисла сопровождается перемещением границы двух фаз  $Si - SiO_2$  в глубь полупроводника. Однако происходящее при этом расширение объема приводит к тому, что внешняя поверхность  $SiO_2$  не совпадает с первоначальной поверхностью кремния (рис. 9.1).

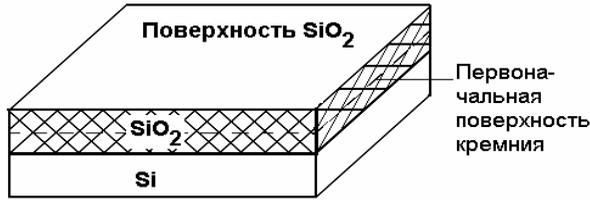


Рис. 9.1 – Рост оксида кремния

Если учесть значение плотности и молекулярной массы  $Si$  и  $SiO_2$ , то рост пленки  $SiO_2$  толщиной  $x$  происходит за счет кремния толщиной  $0,44 x$ , т.е. можно считать, что толщина окисла примерно в два раза больше толщины поглощаемого им кремния.

Слой окисла толщиной 2–8 нм образуется на поверхности кремния уже при комнатной температуре, но малая толщина окисла и низкое качество не позволяют его использовать в технологии ИС. Высококачественный окисел может быть получен лишь при термическом окислении кремния при температуре 700–1200 °С. Принятая в настоящее время модель окисления основана на диффузии окисляющих частиц через растущий окисел и их взаимодействии с кремнием на границе двух фаз  $Si - SiO_2$ .

### *Модель окисления*

Кинетика процесса окисления описывается моделью Дила и Гроува [14]. Она применима для температурного диапазона 700–1300 °С, парциальных давлений  $O_2$   $(0,2-1,0) \cdot 10^5$  Па (возможно, и для более высоких значений) и толщины окисных пленок 0,03–2 мкм в атмосфере, состоящей из кислорода и (или) паров воды. Процесс окисления состоит из двух этапов – массопереноса окислителя в растущем окисле и протекания химической реакции кремния с окислителем (кислородом или парами воды).

В соответствии с моделью Дила и Гроува процесс окисления описывается параболическим или линейным законом. При большом времени окисления имеет место следующий закон:

$$x^2 = Bt, \quad (9.1)$$

где  $x$  – толщина окисла;

$B$  – параболическая константа скорости окисления;

$t$  – время окисления.

При коротком времени окисления справедлив линейный закон

$$x = \frac{B}{A}(t + \tau), \quad (9.2)$$

где  $B/A$  – линейная константа скорости окисления;

$\tau$  – величина, соответствующая сдвигу по временной оси, которая учитывает наличие первоначального окисла толщиной  $x_0$ .

Уравнения (9.1) и (9.2) соответствуют случаям протекания реакции окисления с диффузионным и кинетическим контролем.

Достаточно простая модель окисления Дила и Гроува обеспечивает хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными данными для окисления во влажном и сухом кислороде. Эксперименты проводились при окислении в очищенном сухом кислороде (содержание паров воды меньше  $5 \cdot 10^{-4}$  %) и во влажном кислороде (парциальное давление паров воды  $85 \cdot 10^3$  Па). Учитывая основные уравнения, описывающие процесс роста окисла (9.1) и (9.2), Дил и Гроув получили значения констант  $A$  и  $B$

для процессов окисления в сухом и влажном кислороде, приведенные в табл. 9.1 и 9.2 [14]. При окислении во влажном кислороде не наблюдается сдвига по временной оси, т.е. при  $t = 0$  толщина окисла  $x_0 = 0$  и, соответственно,  $\tau = 0$ .

Таблица 9.1 – Константы скорости окисления кремния в сухом кислороде

Температура окисления, °С	$A$ , мкм	Параболическая константа скорости окисления $B$ , мкм <sup>2</sup> /ч	Линейная константа скорости окисления $B/A$ , мкм/ч	$\tau$ , ч
1200	0,040	0,045	1,12	0,027
1110	0,090	0,027	0,30	0,076
1000	0,165	0,0117	0,071	0,37
920	0,235	0,0049	0,0208	1,40
800	0,370	0,0011	0,0030	9,0
700	...	...	0,00026	81,0

Таблица 9.2 – Константы скорости окисления кремния во влажном кислороде

Температура окисления, °С	$A$ , мкм	Параболическая константа скорости окисления $B$ , мкм <sup>2</sup> /ч	Линейная константа скорости окисления $B/A$ , мкм/ч	$\tau$ , ч
1200	0,05	0,720	14,40	0
1100	0,11	0,510	4,64	0
1000	0,226	0,287	1,27	0
920	0,50	0,203	0,406	0

При окислении в сухом кислороде при  $t = 0$  толщина окисла  $x_0$  примерно равна 0,025 мкм, поэтому при расчетах следует учитывать величину  $\tau$ .

Технология выращивания термического окисла и технологические параметры, влияющие на процесс роста окисла.

Выбор метода окисления определяется необходимой толщиной и свойствами окисла. Относительно тонкие пленки с хорошими диэлектрическими свойствами и минимальным зарядом на границе диэлектрик-полупроводник обычно выращиваются в сухом кислороде. При формировании толстых окисных пленок ( $>0,5$  мкм) используют окисления во влажном кислороде при атмосферном и повышенном давлениях. Общим недостатком окисления в парах воды является низкая плотность пленок, которая ухудшает их защитные свойства. Низкая плотность (около  $2 \text{ г/см}^3$ ) связана с их пористостью из-за наличия водорода и гидроксильных групп  $OH$ . Компромиссным решением является окисление во влажном кислороде, когда энергия активации меняется от  $2,24 \cdot 10^{-19}$  Дж (для сухого кислорода) до  $1,28 \cdot 10^{-19}$  Дж (для водяного пара). При этом скорость роста окисла меняется в широком диапазоне и при достаточно больших скоростях достигается плотность пленок  $2,18\text{--}2,2 \text{ г/см}^3$ .

Кроме того, практика показала, что можно получить качественные пленки при удовлетворительной производительности процесса, если чередовать этапы окисления в сухом и влажном кислороде. При такой комбинированной технологии в начале процесса в течение 15 минут наращивается тонкий окисел в сухом кислороде. Затем 1 ч 45 мин кремний окисляется во влажном кислороде. И, наконец, в течение 1 часа подложки выдерживаются в сухом кислороде. При этом происходит уплотнение оксида кремния.

Метод окисления реализуется в кварцевых или кремниевых диффузионных трубах в атмосфере сухого или влажного кислорода при температуре  $(800\text{--}1200)^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ . При окислении в сухом кислороде используется очищенный осушенный кислород с содержанием паров воды меньше  $5 \cdot 10^{-4} \%$ . При окислении во влажном кислороде кислород барботируется через подогретую

до 95 °С воду, при этом парциальное давление паров воды составляет  $85 \cdot 10^3$  Па [14].

Основным технологическим параметром, влияющим на процесс термического окисления, является температура окисления. В модели Дила-Гроува параболическая константа скорости  $B$  имеет размерность коэффициента диффузии ( $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ) и определяет процесс массопереноса окислителя через растущую пленку. Этот процесс подчиняется статистике Больцмана и, следовательно, температурная зависимость  $B$  описывается уравнением Аррениуса. Причем энергии активации для константы  $B$  при окислении в сухом кислороде и в парах воды соответственно равны  $1,93 \cdot 10^{-19}$  и  $1,14 \cdot 10^{-19}$  Дж. Эти значения сравнимы с величинами энергии активации для коэффициентов диффузии кислорода и паров воды в кварцевом стекле (равными соответственно  $1,87 \cdot 10^{-19}$  и  $1,28 \cdot 10^{-19}$  Дж). Кварцевое стекло имеет структуру, аналогичную структуре термического окисла. Более поздними экспериментами, однако, было установлено, что эти значения энергии справедливы лишь при температурах окисления выше 1000 °С.

Несмотря на то, что коэффициент диффузии паров воды значительно меньше коэффициента диффузии кислорода, параболическая константа  $B$  в парах воды больше, чем в сухом кислороде, так как равновесная концентрация молекул кислорода  $C^*$  меньше, чем равновесная концентрация молекул воды. При температуре 1000 °С  $C^*_{\text{O}_2} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а  $C^*_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В результате скорость роста окисла во влажном кислороде много больше скорости роста в сухом кислороде.

Кроме температуры окисления, скорость роста окисла зависит от парциального давления окислителя, т.к. величины  $B$  и  $B/A$  зависят от концентрации окислителя в газовой фазе  $C^*$ , которая, согласно закону Генри, непосредственно определяется парциальным давлением

$$C^* = Hp, \quad (9.3)$$

где  $p$  – парциальное давление окислителя в газовой фазе вблизи поверхности окисла;

$H$  – постоянная Генри, зависящая от давления и температуры.

Расчеты показывают нижеприведенную зависимость  $C^*$  от давления (табл. 9.3).

Таблица 9.3 – Значения концентрации окисляющих частиц при разных давлениях

$P$ , Па	$C_{O_2}^*$ , см <sup>-3</sup>	$C_{H_2O}^*$ , см <sup>-3</sup>
$1,0 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^{16}$	$3,0 \cdot 10^{19}$
$5,0 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$9,0 \cdot 10^{19}$
$1,0 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^{17}$	$2,0 \cdot 10^{20}$
$2,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^{17}$	$3,0 \cdot 10^{20}$
$2,5 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^{17}$	$3,4 \cdot 10^{20}$

Таким образом, при увеличении давления можно снизить температуру окисления при обеспечении той же скорости роста окисла.

Процесс роста окисла также определяется неконтролируемыми примесями, которые находятся в окружающей атмосфере. Наиболее важными являются пары воды и ионы натрия, проникающие через стенки кварцевых труб.

Как указывалось выше, содержание воды в сухом кислороде не превышает обычно  $10^{-4}$  %, тогда как за счет неконтролируемой диффузии воды через стенки труб ее содержание повышается примерно на порядок (до  $1,5 \cdot 10^{-3}$  %). Это приводит к увеличению скорости роста на 20 %.

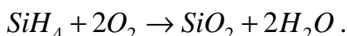
Содержание ионов натрия в окружающей атмосфере составляет  $10^{16}$ – $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, а учитывая, что коэффициент диффузии ионов натрия в кварцевом стекле  $10^{-6}$  см<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>, то кварц фактически прозрачен для натрия. Увеличение концентрации  $Na^+$  приводит к росту скорости окисления, а кроме того,  $Na^+$ , изменяя структуру окисла, ускоряет диффузию и увеличивает концентрацию молекулярного кислорода в окисле, что существенно ухудшает свойства диэлектрика. Появление заряженных ионов натрия, имеющих высокую подвижность в оксиде кремния даже

при низких температурах (менее 100 °С), вызывает в последующем нестабильность характеристик интегральных структур, особенно в МДП-транзисторах и схемах на их основе. Для уменьшения влияния  $Na^+$ , улучшения диэлектрических свойств и снижения плотности положительного заряда в окисел вводят галогены, чаще всего хлор, который переводит некоторые примеси на поверхности кремния в летучие соединения, способствует снижению концентрации дефектов упаковки. Хлор вводят в реактор в виде газообразного  $HCl$ . Концентрация хлора обычно не превышает 1–4 %, при этом скорость окисления увеличивается, константы линейного и параболического роста с увеличением давления хлора возрастают по линейному закону, однако этот рост быстро насыщается.

### 9.3 Химическое осаждение диэлектрических пленок

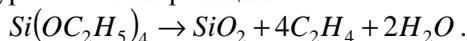
Осаждение диэлектрических пленок на поверхность кремниевой пластины взамен их окисления позволяет, во-первых, уменьшить температурное воздействие на пластину и, во-вторых, использовать широкий круг материалов, которые обладают наилучшими диэлектрическими и защитными свойствами. Иногда (например, при получении межслойной изоляции или пассивирующих покрытий) метод термического окисления вообще неприменим.

Для получения пленок оксида кремния широко используют реакцию окисления силана



Процесс протекает при температурах 200–350 °С. Реагенты ( $SiH_4$  и  $O_2$ ) поступают в реактор сильно разбавленные аргонном, что позволяет строго контролировать процесс. Скорость роста составляет 0,1 мкм/мин.

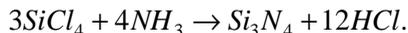
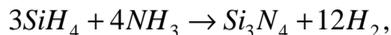
Наряду с окислением силана широко используют реакцию термического разложения кремнийорганических соединений, в частности, тетраэтоксисилана  $Si(OC_2H_5)_4$ . Процесс протекает при температуре 750 °С по реакции



Скорость осаждения оксида кремния при этом составляет 0,03 мкм/мин. Во избежание загрязнения пленки продуктами разложения процесс лучше проводить не в потоке газа-носителя, а в вакууме при давлении порядка 10 Па.

Помимо оксида кремния в полупроводниковых ИС используют нитрид кремния  $Si_3N_4$ . Благодаря высокой плотности этого диэлектрика легирующие примеси ( $B, P, As$ ) имеют в нем малый коэффициент диффузии, что позволяет использовать его в качестве маскирующего слоя уже при толщине 0,2 мкм. Высокое значение диэлектрической постоянной ( $\epsilon = 6-8$ ) и практически полная непроницаемость для ионов щелочных металлов обусловили применение нитрида кремния в качестве дополнительного слоя для подзатворного оксида в МДП-структурах. Кроме того, нитрид кремния служит надежной маской при локальном окислении кремния.

Для получения нитрида кремния используют следующие реакции



Первая реакция протекает при температуре 650–950 °С, а вторая – при температуре 1000–1200 °С. Для получения пленок используют установки эпитаксиального наращивания или однозонные диффузионные печи. Скорость роста пленок нитрида кремния составляет 0,01–0,02 мкм/мин.

## 10 МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

**Металлизация** – процесс создания внутрисхемных соединений. В планарных структурах ИМС внутрисхемные соединения выполняют с помощью тонких металлических пленок, которые наносят на изолирующий слой оксида кремния. Так как эти пленки используют в качестве проводников внутрисхемной коммутации, они должны обеспечивать невыпрямляющий контакт с полупроводником, иметь хорошую адгезию с кремнием и оксидом кремния и низкое удельное сопротивление, давать возможность присоединения выводов ИМС. Для осуществления металлизации можно применять золото, никель, хром, алюминий, системы  $Cr - Au$ ,  $Ti - Au$ ,  $Mo - Au$ ,  $Ti - Pt - Au$  и т.д.

В кремниевых ИМС для создания металлизации наибольшее применение нашел алюминий, так как он обладает следующими положительными качествами:

а) позволяет изготавливать структуры с металлизацией одним металлом, что упрощает технологию;

б) имеет высокую проводимость, близкую к проводимости объемного материала, и хорошую адгезию к кремнию и оксиду кремния;

в) испаряется в вакууме;

г) пленки алюминия хорошо обрабатываются при проведении фотолитографии для получения нужной конфигурации проводников, они легко поддаются травлению, которое не действует на  $Si$  и  $SiO_2$ ;

д) вступает в реакцию с оксидом кремния  $SiO_2$ , который частично остается на контактных площадках;

е) образует низкоомные контакты с кремнием  $n^+$ -типа и  $p$ -типа;

ж) не образует хрупких химических соединений  $AlSi$ ;

з) имеет проводимость, почти не уменьшающуюся за счет кремния, находящегося в нем в виде твердого раствора;

и) допускает присоединение золотой и алюминиевой проволоки;

- к) выдерживает циклические изменения температуры (достаточно пластичен);
- л) стоек к окислению в атмосфере;
- м) является хорошим материалом для схем, стойких к радиации;
- н) имеет невысокую стоимость.

После создания структур в объеме полупроводниковой пластины ее покрывают слоем  $SiO_2$ . Методом фотолитографии в тех местах слоев  $SiO_2$ , где должны быть контакты с кремнием, вскрывают окна соответствующих размеров. Затем методом термического испарения в вакууме наносят на пластину сплошную пленку алюминия толщиной около 1 мкм (в других случаях толщина пленки может быть от 0,5 до 2 мкм). При многослойной металлизации первый слой металла наносят более тонким, чем последующий слой диэлектрика и второй слой металла. Алюминий испаряют из резистивных испарителей при давлении в камере  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Па. Осаждение ведется на подложки, нагретые до 200 °С. Пленка алюминия имеет удельное сопротивление около  $3 \cdot 10^{-6}$  Ом·см, т.е. на 10–20 % больше его сопротивление в объеме ( $1,7 \cdot 10^{-6}$  Ом·см).

Необходимый рисунок проводников и контактных площадок создают методом фотолитографии. Ширина проводников и промежутков между ними 10–13 мкм. Однако уже доступно создание проводящих полосок шириной 2,5 мкм и возможно изготовление полосок алюминия шириной чуть более 1 мкм.

После нанесения рисунка пластину подвергают термообработке для получения низкоомных контактов с кремнием. В обычном случае пластину нагревают до 550 °С и выдерживают несколько минут. Жидкая фаза при этом не образуется, так как эта температура лежит ниже температуры эвтектической точки. В результате этой операции происходит восстановление алюминием  $SiO_2$ , имеющегося на границе раздела после воздействия окружающей среды, и кремний растворяется в алюминии. Более высокая температура (выше температуры эвтектической точки 576 °С) приводит к появлению жидкой фазы на границе раздела, где оба материала растворяются в соответствующей пропорции. При повышении температуры может наступить момент, когда

весь алюминий (пленка  $Al$  тонкая) будет растворен в кремнии. После отжига образуется рекристаллизационный слой на поверхности раздела с концентрацией алюминия около  $5 \cdot 10^{18}$  атом/см<sup>3</sup>, а так как алюминий является для кремния акцепторной примесью, то полученный рекристаллизационный слой будет обладать электропроводностью  $p$ -типа.

Таким образом, при образовании контакта к  $p$ -области кремния примесь  $Al$  только увеличит концентрацию этой примеси; при образовании контакта к  $n$ -области кремния, если ее концентрация будет меньше  $5 \cdot 10^{18}$  атом/см<sup>3</sup>, диффундирующий в кремний  $Al$  сменит электропроводность кремния на  $p$ -тип, в данном месте образуется  $p-n$ -переход, т.е. выпрямляющий контакт. Эмиттерные области транзисторов типа  $n-p-n^+$  в ИМС имеют концентрацию примесей обычно около  $10^{21}$  атом/см<sup>3</sup>, что значительно больше  $5 \cdot 10^{18}$  атом/см<sup>3</sup>, поэтому контакт к этой области будет невыпрямляющим. В месте контакта к коллекторной области, где концентрация примеси  $n$ -типа может быть ниже  $5 \cdot 10^{18}$  атом/см<sup>3</sup>, необходимо создавать локальный участок с электропроводностью  $n^+$ -типа. Операция сплавления должна выполняться при строгом соблюдении технологического режима, в противном случае могут появляться разрывы токоведущих дорожек из алюминия.

Для металлизации кристаллов полупроводниковых ИМС используют также магнетронное распыление металлов и сплавов и соединения кремния с металлами – силицидов алюминия, титана, тантала, платины, молибдена, вольфрама и др. Для этих целей широко используют и сильнолегированные слои поликристаллического кремния.

## 11 ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС

### 11.1 Классификация процессов

В основу классификации процессов изготовления полупроводниковых ИМС положен тип и способ формирования транзисторных структур в кристалле. В связи с этим различают биполярную и МДП-технологии.

Типовой технологический процесс изготовления полупроводниковой ИМС на биполярных транзисторах сводится к формированию в пластине кремния транзисторных структур  $n-p-n^+$  типа (с одинаковым распределением концентрации примесей и различными размерами в плане) в количестве, необходимом для реализации всех активных и пассивных элементов, обеспечению изоляции между элементами и созданию внутрисхемных соединений. Для классификации технологических процессов изготовления биполярных интегральных схем используют два принципа: способ формирования транзисторной структуры и метод изоляции элементов [6].

Важной проблемой при проектировании и изготовлении биполярных ИМС и особенно больших интегральных схем (БИС) является обеспечение надежной изоляции элементов при одновременной максимальной плотности их размещения. Выбор метода электрической изоляции во многом определяет порядок технологического процесса в производстве ИМС.

Для обеспечения надежной работы *биполярной ИМС* каждый элемент схемы должен быть изолирован. В технологии для решения этой проблемы применяют следующие виды изоляции:

- изоляция  $p-n$ -переходом;
- полная диэлектрическая изоляция;
- комбинированная изоляция, одновременно использующая изоляцию  $p-n$ -переходом и диэлектриком.

Изоляция  $p-n$ -переходом образуется путем проведения диффузионных процессов. При этом каждый элемент ИМС отделяется от остального объема пластины замкнутым  $p-n$ -

переходом. Изоляция элементов достигается за счет подачи на  $p-n$ -переходы обратного смещения. Этот вид изоляции используется в диффузионно-планарной (рис. 11.1) и эпитаксиально-планарной (рис. 11.2) структурах. Для получения обратного смещения в области подложки, разделяющей элементы, формируется омический контакт, связанный с наиболее низким потенциалом источника питания, а к изолирующим областям резисторов с помощью контактов подводится высокий потенциал.

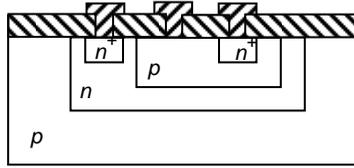


Рис. 11.1 – Диффузионно-планарная структура с изоляцией элементов  $p-n$ -переходом

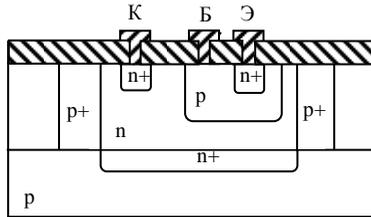


Рис. 11.2 – Эпитаксиально-планарная структура

Замкнутый  $p-n$ -переход в эпитаксиально-планарной структуре получают с помощью разделительной диффузии акцепторной примеси на всю толщину эпитаксиальной пленки. Изоляция  $p-n$ -переходом осуществляется технологически прос-то, но такие переходы обладают заметными токами утечки и емкостями. В результате уменьшается быстродействие схемы. Кроме того, учитывая боковую диффузию, расстояние между элементами приходится делать значительным, что уменьшает плотность размещения элементов.

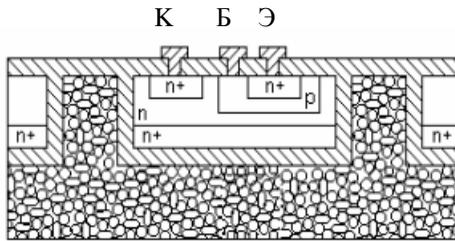


Рис. 11.3 – Структура с диэлектрической изоляцией:

- 1 – монокристаллический кремний  $n$ -типа;
- 2 – оксид кремния; 3 – поликристаллический кремний

Наилучшую электрическую развязку элементов обеспечивает структура с диэлектрической изоляцией (рис. 11.3). В такой структуре каждый элемент размещен в своеобразном «кармане», который представляет собой область монокристаллического кремния, ограниченную слоем оксида кремния. При этом расстояние между элементами может быть уменьшено до 8–10 мкм.

Однако структуры с диэлектрической изоляцией характеризуются высокой трудоемкостью, главным образом из-за необходимости механического шлифования и полирования подложек. Нарушение монолитности подложки (наличие толстого слоя поликристаллического кремния) вызывает внутренние механические напряжения, которые приводят к короблению подложки после снятия монокристаллического кремния. Коробление пластины затрудняет или делает невозможным использование фотолитографии для получения рисунка.

Все указанные недостатки обусловили поиск комбинированных методов изоляции элементов ИМС, по возможности исключающих недостатки первых двух. Разработаны два вида комбинированной изоляции – изопланарная и полипланарная изоляции. В этих случаях изоляция элементов в схеме осуществляется диэлектриком, а изоляция от подложки  $p-n$ -переходом. Изопланарная изоляция обеспечивает изоляцию донной части коллектора от подложки  $p-n$ -переходом, а боковые части толстым слоем диэлектрика  $SiO_2$  (рис. 11.4).

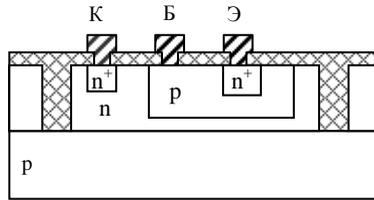


Рис. 11.4 – Структура с изопланарной изоляцией

Технологическим недостатком изопланарной структуры является необходимость длительного окисления для образования разделительных областей  $SiO_2$ , что может вызвать нежелательное перераспределение примеси из скрытого слоя в эпитаксиальный коллектор. Для сокращения времени, затрачиваемого на окисление, уменьшают толщину эпитаксиального слоя и соответственно базы и эмиттера. На практике изопланарный процесс возможно осуществить при толщине эпитаксиального слоя не более 3–4 мкм.

Другой вид комбинированной изоляции используется в полипланарных структурах. Исходной пластиной является подложка с предварительно сформированными  $n^+$ - и  $n$ -эпитаксиальными слоями, ориентированными в плоскости (100). Ориентация пластины определяет возможность анизотропного травления, в результате которого образуются канавки V-образной формы с соотношением ширины канавки  $b$  и ее глубины  $H$ , равной  $H/b=1,41$  (рис. 11.5).

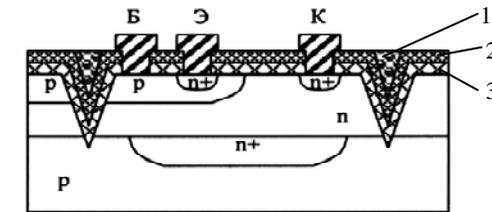


Рис. 11.5 – Структура с полипланарной изоляцией:  
1 – поликристаллический кремний; 2 – нитрид кремния;  
3 – оксид кремния

Специфическим недостатком описанной структуры является необходимость применять пластины с ориентацией в плоскости (100), которые не являются наилучшими с точки зрения электрических характеристик транзистора, но удовлетворяют требованиям анизотропного травления. Технологическим недостатком данного вида изоляции является введение в процесс трудоемкой операции полировки.

Анализ рассмотренных методов изоляции структур на биполярных транзисторах позволяет сделать вывод, что развитие привело к созданию совершенной изоляции, возможности более компактного размещения элементов ИМС и, в конечном счете, к улучшению электрических характеристик, в частности, к повышению быстродействия.

Для технологии изготовления *МДП ИМС* характерны некоторые особенности, обусловленные конструкцией и структурой ИМС на МДП-транзисторах [6]:

а) весь процесс изготовления сводится к формированию МДП-транзисторов и соединений между ними, поскольку МДП-структуры используют не только в качестве транзисторов, но и как резисторы и конденсаторы, т.е. практически все схемные функции реализуются на одних МДП-структурах;

б) в технологических процессах отсутствуют операции по изоляции структур, так как в МДП ИМС они не требуются из-за самоизоляции элементов;

в) внутрисхемные соединения выполняются не только с помощью алюминиевых металлических слоев, но и высоколегированных диффузионных слоев кремния и материала затвора (молибдена, поликристаллического кремния), значительно упрощая задачу многослойной разводки;

г) сравнительно легко в одном кристалле можно создавать МДП-транзисторы с различным типом электропроводности канала, что позволяет изготавливать МДП ИМС с большими функциональными возможностями на комплементарных структурах (КМДП ИМС);

д) отдельные технологические операции, особенно совмещение фотошаблонов при фотолитографии, диффузия, окисление и др., требуют прецизионного их проведения, поскольку

размеры МДП-транзисторов значительно меньше биполярных, поэтому МДП ИМС можно формировать с высокой плотностью размещения элементов.

Для классификации типовых технологических процессов создания МДП ИМС используют различные признаки: тип электропроводности и вид МДП-структур, тип подложки, материал затвора и подзатворного диэлектрика, способы формирования основных областей МДП-структуры, технологические способы устранения возникающих при изготовлении проблем. Различают  $p$ -канальную,  $n$ -канальную и КМДП технологии.

## **11.2 Изготовление биполярных ИМС с изоляцией $p-n$ -переходом**

Изоляция обратно смещенным  $p-n$ -переходом используется в диффузионно-планарных и эпитаксиально-планарных структурах. Последовательность формирования кристалла полупроводниковой ИМС на примере самого сложного элемента транзистора по диффузионно-планарной технологии представлена на рис. 11.6.

Вначале составляют партию пластин с одинаковыми геометрическими размерами и заданным удельным сопротивлением, обычно состоящую из 10–20 штук. В отечественной промышленности используют пластины кремния диаметром 60–102 мм и толщиной 0,2–0,4 мм, с удельным сопротивлением 1–10 Ом·см. Пластины подвергают очистке путем химической обработки поверхности с последующим ее травлением и промывкой в деионизованной или дистиллированной воде (этот процесс повторяют перед каждой последующей операцией). Затем осуществляют процесс окисления поверхности пластин (создание маскирующего оксида) в однозонной диффузионной печи в атмосфере сухого или влажного кислорода или паров воды при температуре ~1150 °С (рис. 11.6, а). После процесса фотолитографии с определенных участков поверхности пластины селективно удаляют слой оксида – формируют окна в маскирующем слое под коллекторную диффузию. В тех участках, с которых был удален оксид, путем диффузии фосфора в две стадии формируют кол-

литорные области всех транзисторов и изолирующие области для резисторов (рис. 11.6, б). Первую стадию проводят при более низкой температуре  $\sim 1100^\circ\text{C}$  в течение 30–40 мин, вторую – при более высокой температуре (около  $1200^\circ\text{C}$ ) в атмосфере сухого кислорода в течение времени, необходимого для проникновения фосфора на глубину залегания  $p$ – $n$ -перехода коллектор-подложка. Распределение примеси в коллекторных областях подчиняется закону Гаусса.

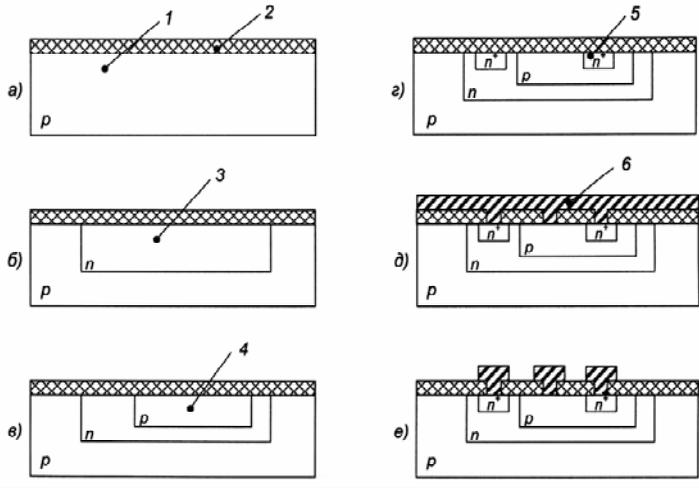


Рис. 11.6 – Последовательность формирования кристалла полупроводниковой ИМС по диффузионно-планарной технологии: 1 – подложка  $p$ -типа; 2 – оксид кремния; 3 – коллекторная область  $n$ -типа; 4 – базовая область  $p$ -типа; 5 – эмиттерная область  $n^+$ -типа; 6 – металлизация

Для создания базовых областей транзисторов, резисторов и диодов в коллекторные области  $n$ -типа проводят диффузию акцепторных примесей. Для этого в оксидном слое путем фотолитографии создают окна с размерами, необходимыми для реализации элементов с требуемыми номиналами. Базовую диффузию проводят в две стадии. В качестве примеси используют бор.

Первая стадия (загонка) осуществляется при температуре 900–1000 °С (в зависимости от применяемого источника диффузанта) и начинается в среде аргона и кислорода, а заканчивается в инертной среде – подается один аргон без диффузанта. Загонку осуществляют также ионным легированием. После этого путем травления в азотной или фтористой кислоте с поверхности пластин удаляют боросиликатное стекло.

Вторая стадия (разгонка) проводится при более высокой температуре (1150 °С) в окислительной среде, в результате чего происходит перераспределение бора на определенную глубину. При этом создаются базовые области глубиной 2,5–3,5 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 150–300 Ом/□, а на поверхности пластин – слой оксида кремния (рис. 11.6, в).

Затем формируют эмиттерные области  $n^+$ -типа, которые служат эмиттерами транзисторов, катодами диодов, обкладками конденсаторов, омическими контактами к коллекторным областям, а иногда и внутрисхемными соединениями. Для этого пластины подвергают фотолитографии, за счет чего получают окна в оксидном слое под эмиттерные и контактные области к кремнию  $n$ -типа. Формирование эмиттерных областей  $n^+$ -типа осуществляется диффузией фосфора в одну стадию. Диффузия фосфора проводится на глубину 0,8–2,0 мкм, при этом создаются высоколегированные области  $n^+$ -типа, удельное поверхностное сопротивление которых составляет единицы ом на квадрат (рис. 11.6, г). Распределение примеси в этих областях подчиняется функции  $erfc$ .

Заканчивается процесс получения полупроводниковых структур ИМС созданием внутрисхемных соединений и формированием защитного покрытия. Для этого вначале с поверхности пластины удаляют фосфоросиликатное стекло, а затем поверхность пластин окисляют для получения защитного оксида толщиной около 1 мкм. Этот слой оксида является также маскирующим при создании омических контактов металл-полупроводник. С этой целью методом фотолитографии вскрывают окна в слое оксида под омические контакты, поверхность пластин тщательно очищают, а затем термическим испарением в вакууме на поверхность пластин наносят слой алюминия толщиной 1,0–1,5 мкм (рис. 11.6, д). Алюминий наносят равномерно на

всю поверхность пластины как на слой оксида, так и на участки, обработанные путем травления при фотолитографии. Затем поверхность алюминия подвергают фотогравировке с помощью шестой фотолитографии, чтобы получить внутрисхемные соединения необходимой конфигурации и контактные площадки; термообработка пластин дает хорошие контакты. На заключительном этапе наносят защитный слой оксида кремния и фотолитографией в нем вскрывают окна к контактным площадкам. На этом этапе заканчивается процесс формирования кристаллов ИМС. Структура готового кристалла ИМС показана на рис. 11.6, е (защитный слой не показан).

В производственных условиях после каждого этапа формирования ИМС осуществляют контроль. Так, после фотолитографии, очистки, окисления пластины подвергают 100 %-ному контролю визуально. Диффузионные области контролируют после фотолитографии путем измерения удельного поверхностного сопротивления или снятия вольтамперной характеристики на образцах-свидетелях либо по тестовым ячейкам. Пластины с готовыми микросхемами контролируют на функционирование с помощью зондовых установок. Забракованные микросхемы метят магнитной краской. После такого контроля пластины поступают на разделение на кристаллы, разбраковку, годные из них – на сборку.

При изоляции обратнo-смещенным  $p-n$ -переходом в эпитаксиально-планарных структурах изолирующие области создаются путем проведения разделительной диффузии на всю глубину эпитаксиального слоя. Транзисторные структуры формируются локальной диффузией в эпитаксиальном слое  $n$ -типа. Последовательность формирования структуры на примере транзистора со скрытым слоем представлена на рис. 11.7.

Партию пластин  $p$ -типа очищают, а затем окисляют по комбинированной технологии для получения маски для формирования скрытого слоя (рис. 11.7, а). Быстродействие транзистора, его частотные свойства тем лучше, чем меньше величины сопротивления тела коллектора и емкости перехода коллектор-база. Если снижать сопротивление коллектора повышением степени его легирования, то уменьшается напряжение пробоя коллекторного  $p-n$ -перехода.

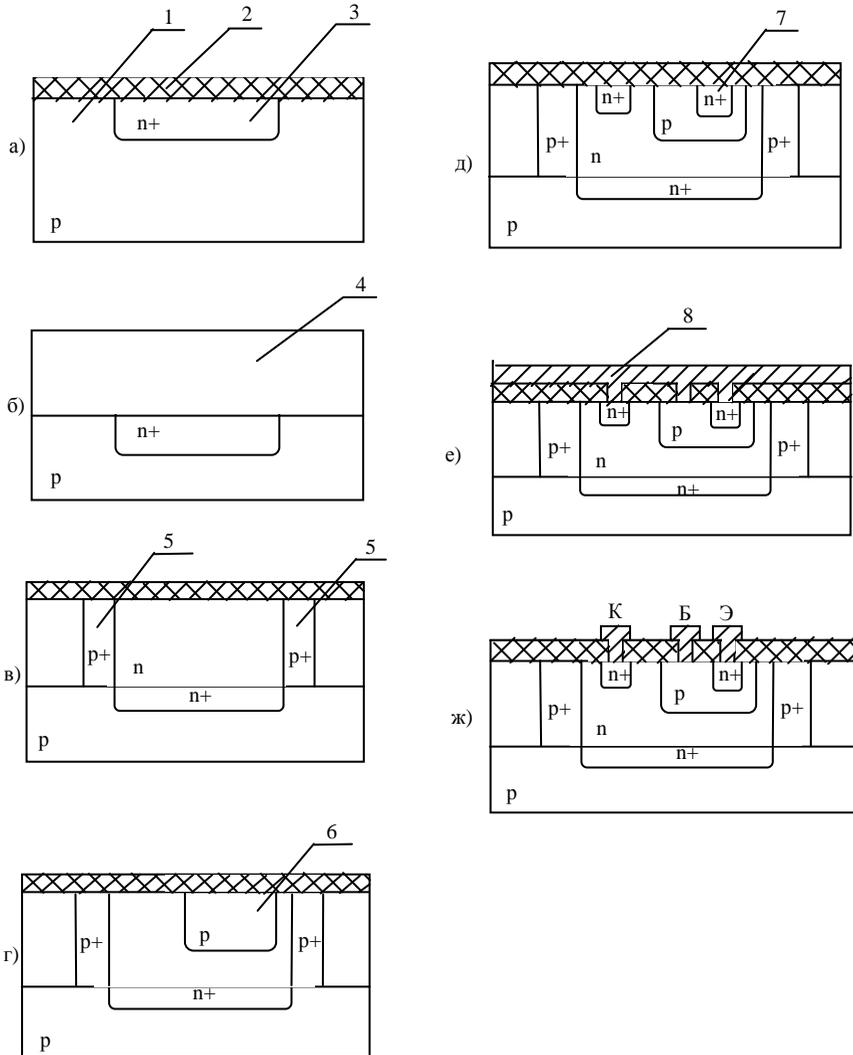


Рис. 11.7 – Последовательность формирования кристалла полупроводниковой ИМС по эпитаксиально-планарной технологии: 1 – подложка; 2 – оксид кремния; 3 – скрытый слой  $n$ -типа; 4 – эпитаксиальный слой  $n$ -типа; 5 – разделительная область  $p^+$ -типа; 6 – базовая область  $p$ -типа; 7 – эмиттерная область  $n^+$ -типа; 8 – металлизация

Чтобы решить эту проблему, под коллектором формируют высоколегированный скрытый  $n^+$ -слой. В качестве легирующей примеси используют мышьяк или сурьму – элементы с низкой скоростью диффузии, что позволяет уменьшить влияние эффекта автолегирования. Диффузию *As* или *Sb* проводят в две стадии (рис. 11.7, а). После этого удаляют оксид кремния со всей поверхности, очищают пластины и осуществляют эпитаксиальное наращивание слоя кремния  $n$ -типа (рис. 11.7, б). Эпитаксию чаще всего проводят путем восстановления четыреххлористого кремния  $SiCl_4$  водородом при температуре 1000–1200 °С. При этом получают слой кремния толщиной 5–10 мкм с удельным сопротивлением 0,1–1,0 Ом·см. На поверхности пластины с эпитаксиальным слоем повторным термическим окислением создают слой оксида кремния толщиной 0,5–1,0 мкм. С помощью процесса второй фотолитографии с определенных участков поверхности пластины селективно удаляют слой оксида – формируют окна в маскирующем слое под разделительную диффузию. В тех участках, с которых был удален оксид, путем диффузии бора в две стадии формируют изолирующие области  $p$ -типа. Первую стадию проводят при более низкой температуре (примерно 1000 °С) в течение нескольких десятков минут, а вторую стадию – при температуре 1150–1250 °С в атмосфере сухого кислорода в течение времени, необходимого для проникновения бора на всю глубину эпитаксиального слоя (рис. 11.7, в). Тем самым создают коллекторные области  $n$ -типа, изолированные областями  $p$ -типа, причем распределение примеси в коллекторных областях равномерное, а в изолирующих областях  $p$ -типа оно подчиняется закону Гаусса. Далее в термическом окисле, полученном на второй стадии разделительной диффузии, методом фотолитографии вскрывают окна под базовую диффузию бора, которую, как уже указывалось выше, проводят в две стадии (рис. 11.7, г). Затем формируют эмиттерные области (рис. 11.7, д), металлизированные соединения (рис. 11.7, е) и защитный слой. Готовая эпитаксиально-планарная структура без защитного слоя представлена на рис. 11.7, ж.

### 11.3 Изготовление биполярных ИМС с диэлектрической изоляцией

Технология изготовления биполярных ИМС с диэлектрической изоляцией предусматривает формирование кристаллов, в которых каждый элемент (транзисторная  $n-p-n^+$  структура) изолирован полностью слоем диэлектрика. Для создания изолирующих областей используют оксид и нитрид кремния, поликристаллический кремний, стекло и т.д. Рассмотрим технологию, основанную на получении изолированных областей из сло-

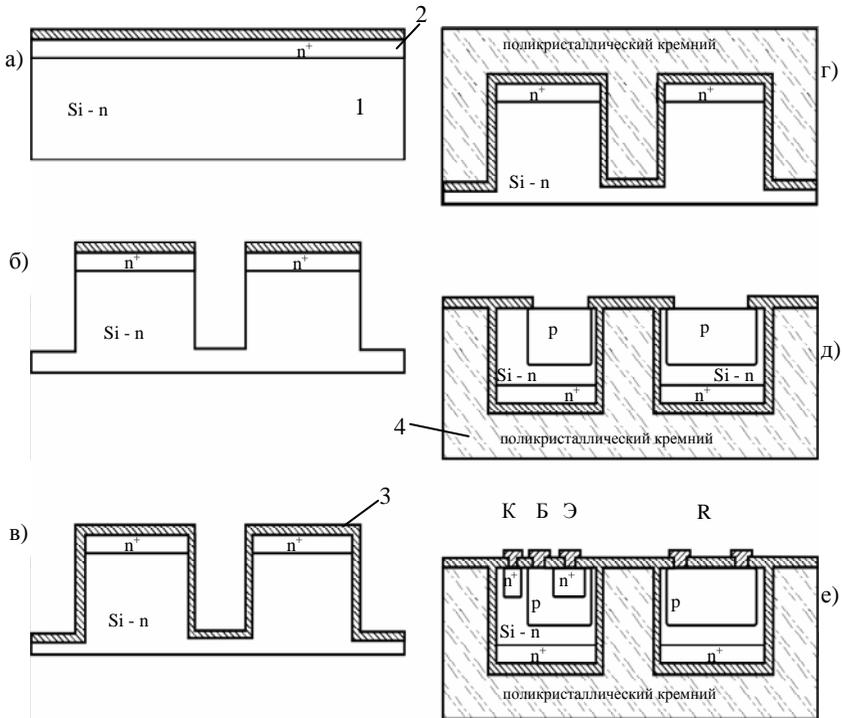


Рис. 11.8 – Последовательность формирования биполярной ИМС с диэлектрической изоляцией: 1 – исходная пластина кремния  $n$ -типа;

2 – диффузионный скрытый слой  $n^+$ -типа; 3 – оксид кремния;

4 – поликристаллический кремний

ев оксида (нитрида) кремния и поликристаллического кремния. Последовательность формирования биполярной ИМС с диэлектрической изоляцией представлена на рис. 11.8.

Вначале составляют партию кремниевых пластин  $n$ -типа с удельным сопротивлением 0,2–10,0 Ом·см и подвергают их очистке. Затем по всей площади пластины методом двухстадийной диффузии сурьмы или мышьяка образуют высоколегированный скрытый  $n^+$ -слой с глубиной залегания  $p$ – $n$ -перехода 2–3 мкм. Термически пластины окисляют со стороны скрытого слоя (рис. 11.8, а). Методом фотолитографии в маске из оксида кремния вскрывают окна под изолирующие области, через которые травят кремний на глубину 8–15 мкм (рис. 11.8, б). Для получения на рельефной поверхности пластины слоя оксида толщиной 1 мкм пластины вновь термически окисляют (рис. 11.8, в). На поверхность кремния со стороны окисленных канавок осаждают поликристаллический кремний толщиной 0,2–0,25 мкм путем разложения силана  $SiH_4$  при температуре подложек 600–650 °С (рис. 11.8, г).

После этого с противоположной поверхности пластины (со стороны кремния  $n$ -типа) сошлифовывают слой монокристаллического кремния  $n$ -типа до оксидного слоя. Таким образом, получают области кремния  $n$ -типа со скрытыми  $n^+$ -слоями, изолированные друг от друга слоем  $SiO_2$ . В этих областях методами окисления, фотолитографии, диффузии, напыления формируют базовые области (рис. 11.8, д), эмиттерные и металлизацию (рис. 11.8, е).

Данный технологический процесс позволяет получить хорошую изоляцию между элементами как по постоянному, так и по переменному току. По такой технологии целесообразно изготавливать микромощные и быстродействующие цифровые и высокочастотные аналоговые ИМС. Но стоимость технологического процесса высока по сравнению с процессами изоляции  $p$ – $n$ -переходами.

## 11.4 Изготовление биполярных ИМС с комбинированной изоляцией

В основу изготовления полупроводниковых биполярных ИМС с комбинированной изоляцией положены процессы, обеспечивающие формирование элементов с изоляцией  $p-n$ -переходами их горизонтальных участков и диэлектриком – вертикальных боковых областей. Основные технологии для получения комбинированной изоляции:

- изопланарная технология;
- полипланарная технология.

**Изопланарная технология** в качестве исходных пластин использует подложки  $p$ -типа с тонким (2–3 мкм) эпитаксиальным слоем  $n$ -типа. Последовательность формирования биполярной ИМС по изопланарной технологии представлена на рис. 11.9.

Методом химического осаждения на пластины наносят пленку нитрида кремния в результате реакции между силаном  $SiH_4$  и аммиаком  $NH_3$  при температуре 900 °С (рис. 11.9 а). В пленке нитрида кремния  $Si_3N_4$  фотолитографией вскрывают окна под изолирующие области, через которые травят кремний на глубину, равную примерно половине толщины эпитаксиальной пленки  $H$  (рис. 11.9, б). Протравленные изолирующие области термически окисляют на всю толщину эпитаксиальной пленки (рис. 11.9, в). Поскольку, как уже указывалось, для получения оксида кремния толщиной  $H$  требуется 0,44  $H$  кремния, то в результате окисления получается гладкий рельеф. Пленка нитрида кремния  $Si_3N_4$  является надежной маской при окислении. Далее нитрид кремния стравливают, а пластины вновь окисляют для получения маски для диффузии (рис. 11.9, г). Фотолитографией вскрывают окна под базовую диффузию бора, которую проводят в две стадии (рис. 11.9, д). После этого фотолитографией, диффузией и напылением последовательно формируют эмиттерные области, окна под контакты и металлизацию (рис. 11.9, е).

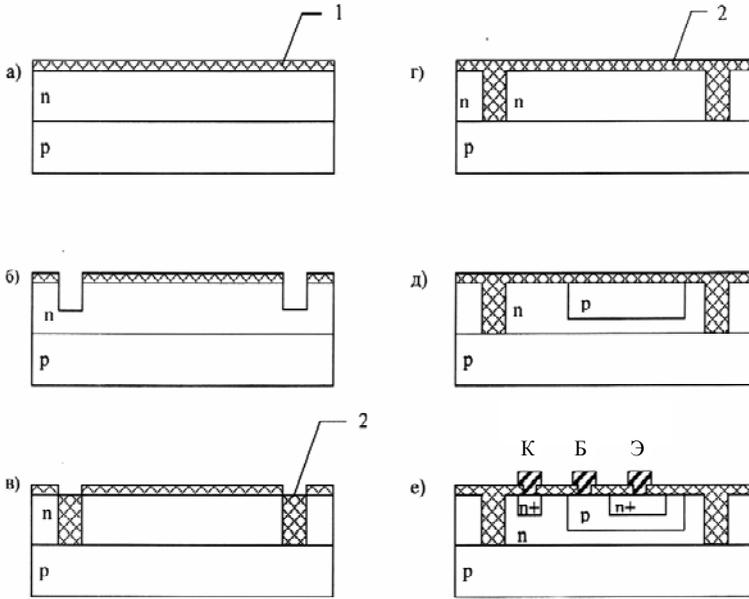


Рис. 11.9 – Последовательность формирования биполярной ИМС по изопланарной технологии: 1 – нитрид кремния; 2 – оксид кремния

Изопланарная технология позволяет создавать тонкие базовые области и небольшие коллекторные области с оксидными боковыми стенками и тем самым обеспечивает получение транзисторных структур малых размеров и высокого быстродействия.

**Полипланарная технология** использует вертикальное анизотропное травление кремния с ориентацией (100), что позволяет формировать в эпитаксиальном слое V-образные разделительные области для межэлементной изоляции. Последовательность формирования биполярных ИМС по полипланарной технологии представлена на рис. 11.10.

Используют партию двухслойных пластин  $p$ -типа с эпитаксиальным слоем  $n$ -типа и скрытым слоем  $n^+$ -типа. Методом локальной диффузии бора в две стадии создают базовые области (рис. 11.10, а). С помощью фотолитографии удаляют слой оксида для создания изоляции. Через окна в оксиде в кремнии вы-

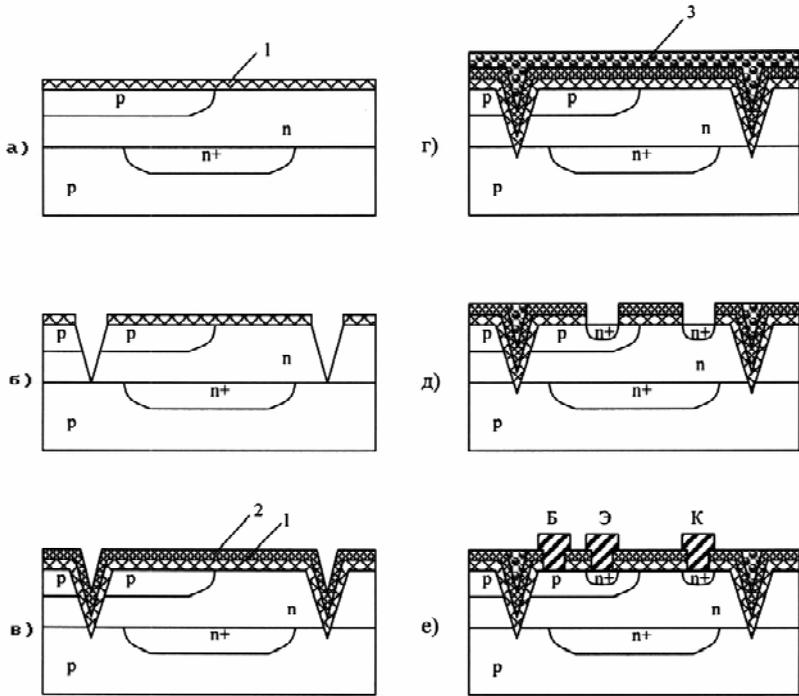


Рис. 11.10 – Последовательность формирования биполярной ИМС по полипланарной технологии: 1 – оксид кремния; 2 – нитрид кремния; 3 – поликристаллический кремний

травливают V-образные канавки на всю толщину эпитаксиальной пленки (рис. 11.10, б), которые покрывают термически выращенным оксидом кремния и химически осажденным нитридом кремния (рис. 11.10, в). Для повышения механической прочности канавки зарастивают поликристаллическим кремнием (рис. 11.10, г), лишнюю часть которого удаляют полированием до слоя нитрида кремния. Далее формируют эмиттерные области (рис. 11.10, д) и металлизацию (рис. 11.10, е), как по обычной технологии.

Полипланарная технология обеспечивает создание ИМС, которые по удельной плотности размещения элементов и электрическим характеристикам аналогичны ИМС, изготовленным

по изопланарной технологии, но имеют меньшую площадь изоляции. Однако эти процессы более трудоемки.

### 11.5 Изготовление МДП ИС

Существенное повышение плотности размещения элементов и упрощение технологии имеет место в МДП ИМС. Это обусловлено, прежде всего, тем, что при изготовлении МДП ИМС на транзисторах с каналами одного типа проводимости не требуется дополнительных мер изоляции. Действительно, области истоков и стоков всегда ограничены  $p-n$ -переходами, смещенными в обратном направлении, а перенос основных носителей заряда происходит в тонком приповерхностном слое полупроводника между истоком и стоком. Однако широко используются структуры, содержащие МДП-транзисторы обоих типов, которые позволяют на 2–3 порядка по сравнению с  $n$ - или  $p$ -МДП-структурами снизить мощность, потребляемую устройством в статическом режиме. Такие структуры получили название структур на дополняющих МДП-транзисторах или комплементарных МДП-структурах. Для создания транзисторов с каналами разного типа проводимости необходимо создавать две области монокристаллического кремния  $n$ - и  $p$ -типов.

Для МДП ИС на транзисторах с каналами одного типа проводимости разработаны  $n$ -канальная и  $p$ -канальная технологии. На рис. 11.11 приведена последовательность изготовления МДП ИС по  $p$ -канальной технологии.

В качестве исходного материала используются кремниевые пластины  $n$ -типа с удельным сопротивлением 2,5–10,0 Ом·см. После очистки поверхности пластин термическим окислением получают маскирующий окисел  $SiO_2$  (рис. 11.11 а), в котором методом фотолитографии формируют окна под области истока и стока. Затем проводят двухстадийную диффузию бора, создавая высоколегированные области глубиной 1–2 мкм (рис. 11.11 б). Далее проводят фотолитографию под тонкий диэлектрик (под затвором) и тщательно очищают поверхность. Затем в сухом кислороде наращивают оксид кремния толщиной 0,1–0,12 мкм

(рис. 11.11 в). Методом фотолитографии вскрывают окна под контакты к истоку и стоку и напыляют пленку алюминия термическим испарением (рис. 11.11 г), в которой формируют рисунок межсоединений (рис. 11.11 д).

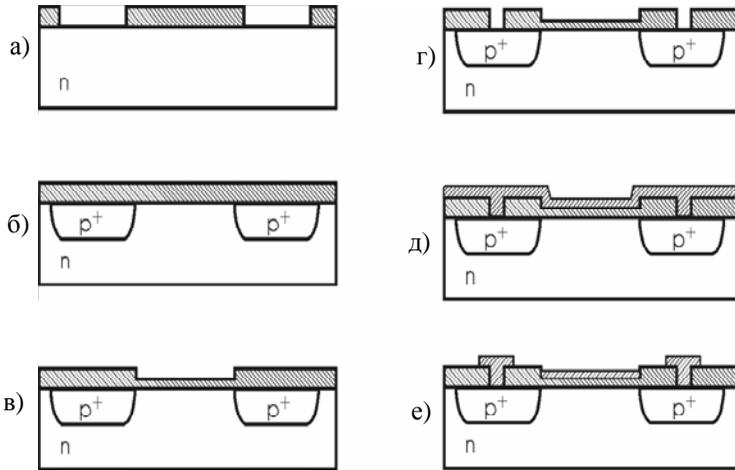


Рис. 11.11 – Последовательность изготовления МДП ИС по  $p$ -канальной технологии

По такой же схеме осуществляется  $n$ -канальная технология с той лишь разницей, что используются пластины  $p$ -типа, а для формирования областей истока и стока проводят диффузию фосфора.

Для изготовления МДП ИС на комплементарных транзисторах для получения двух монокристаллических областей  $n$ - и  $p$ -типа создают «карман»  $p$ -типа в кремнии  $n$ -типа с помощью локальной диффузии. На рис. 11.12 приведена технологическая схема изготовления КМДП ИС.

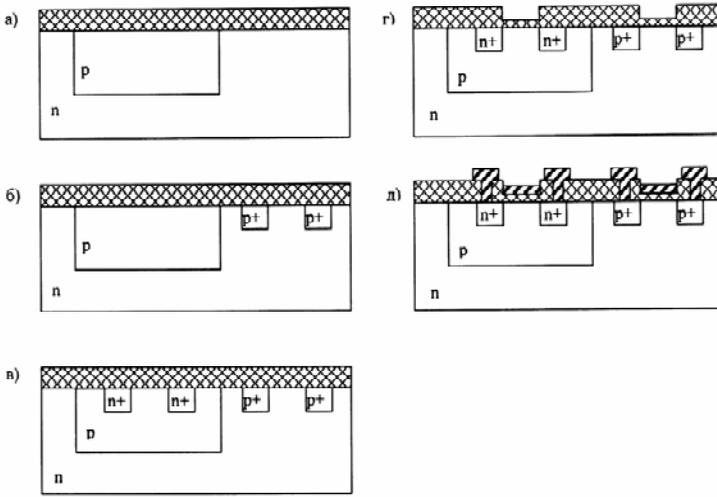


Рис. 11.12 – Последовательность формирования КМДП ИС

Партию пластин *n*-типа очищают и окисляют для получения маскирующего окисла для диффузии «кармана». В две стадии проводят диффузию бора на необходимую глубину для получения диффузионного «кармана» *p*-типа с низкой ( $10^{17}$  см<sup>-3</sup>) концентрацией (рис. 11.12, а). Затем проводят фотолитографию и диффузию, поочередно формируя области истока и стока *p*-канальных и *n*-канальных транзисторов. Диффузию бора проводят в две стадии (рис. 11.12, б), а диффузию фосфора в одну стадию (рис. 11.12, в). Затем проводят фотолитографию под тонкий диэлектрик, окисление в сухом кислороде (рис. 11.12, г), фотолитографию контактных окон и металлизацию (рис. 11.12, д).

Сравнительно простая технология изготовления МДП ИС имеет ряд технологических проблем, которые сказываются на качестве ИМС и стабильности их параметров.

1. Наличие в оксиде под затвором положительных и отрицательных зарядов, обусловленных кислородными вакансиями, ионами щелочных металлов или водорода, приводит к неста-

бильности параметров МДП-транзисторов в случае приложения к структуре электрического поля вследствие дрейфа зарядов.

2. При определенных значениях потенциалов на шинах металлизированной разводки возможны образования паразитных МДП-транзисторов, что приводит к образованию каналов проводимости под слоем оксида, расположенным под шиной разводки, и тем самым к возникновению токов утечки между диффузионными областями. Кроме того, для МДП ИМС опасным является короткое замыкание металла затвора или разводки на подложку, особенно на высоколегированные области истока и стока, вследствие «проколов» оксидного слоя.

3. Существенной проблемой изготовления МДП ИМС является совмещение затвора с областями истока и стока. Так, отсутствие перекрытия канала металлом затвора приводит к неработоспособности МДП-транзистора, а слишком большое перекрытие (расположение металла затвора над диффузионными областями) – к образованию больших емкостей затвор-исток и затвор-сток, что снижает быстродействие ИМС.

Для решения этих проблем разработаны различные технологические приемы. Так, для стабилизации параметров ИМС на МДП-транзисторах применяют специальные методы обработки (очистки) поверхности кремния перед созданием оксида под затвор, наносят фосфоро-силикатное стекло на поверхность оксида под затвором, а также производят низкотемпературный отжиг кристаллов в восстановительной среде.

Эффективным методом очистки поверхности пластин перед окислением является обработка в плавиковой кислоте с последующим длительным кипячением в воде для удаления фтора, который включается в решетку кремния и приводит к образованию дополнительного заряда. Фосфоро-силикатное стекло, создаваемое при нагреве окисленной пластины в парах при температуре около 1000 °С, геттерирует ионы натрия из оксида и является хорошим барьером против проникновения примесей из металла в оксид. Важен при этом режим создания оксида, требующий подачи окислителя (кислорода) в строго контролируемом дозированном количестве и предварительно очищенном состоянии при температуре, близкой к температуре процесса окисления.

С целью предотвращения образования паразитных МДП-транзисторов под шинами разводки металлизацию выполняют по слою оксида с относительно большой толщиной (порядка 1,5 мкм), который получают при первичном окислении. Процесс изготовления МДП ИМС с использованием толстого оксида называют *МТОП-технологией* (*металл-толстый оксид-полупроводник*). Последовательность изготовления МДП ИС с использованием толстого оксида представлена на рис. 11.13.

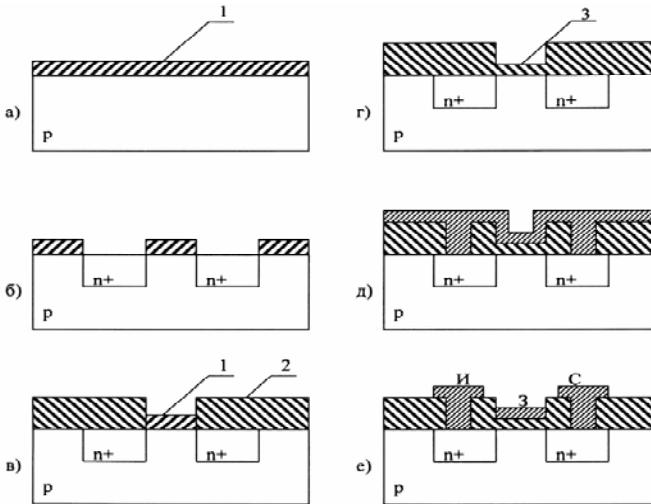


Рис. 11.13 – Последовательность изготовления МДП ИС с толстым оксидом: 1 – нитрид кремния; 2 – толстый оксид кремния; 3 – тонкий оксид кремния (подзатворный диэлектрик)

Партия пластин  $p$ -типа очищается и методом химического осаждения из газовой фазы на пластину осаждается маскирующий слой нитрида кремния (рис. 11.13, а). После фотолитографии через окна в нитриде кремния проводится диффузия фосфора в одну стадию – формируются области истока и стока (рис. 11.13, б). Следующей фотолитографией удаляют нитрид кремния со всей пластины, кроме областей над каналом. Затем проводят окисление по комбинированной технологии, используя повышенное давление окислителя. Нарращивают окисел толщи-

ной 1,5 мкм (рис. 11.13, в). Стравливают нитрид кремния и после тщательной очистки пластин получают подзатворный диэлектрик  $SiO_2$  термическим окислением в сухом кислороде (рис. 11.13, г). Далее проводят фотолитографию, создавая контактные окна (рис. 11.13, д) и металлизацию (рис. 11.13, е).

Для обеспечения совмещения затвора с областями истока и стока разработана технология с молибденовыми затворами (рис. 11.14).

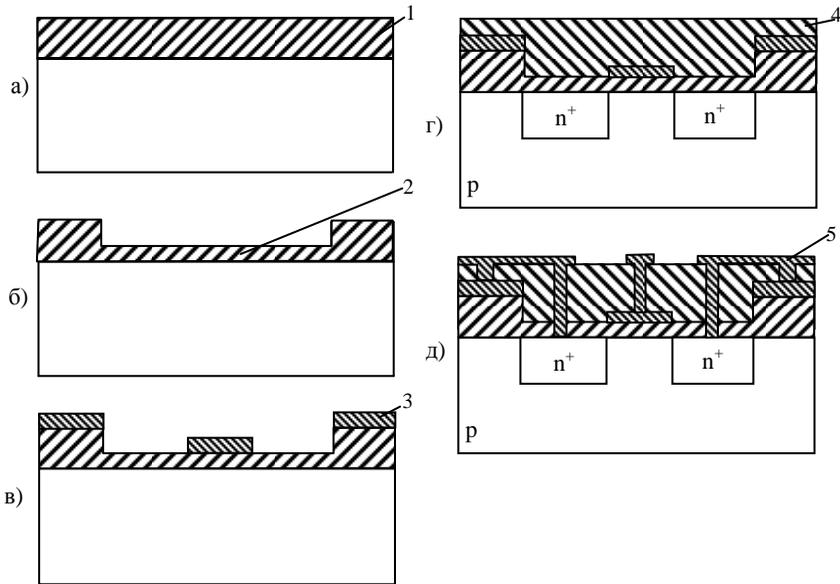


Рис. 11.14 – Последовательность изготовления МДП ИС по самосовмещенной технологии с молибденовым затвором: 1 – толстый оксид кремния; 2 – тонкий оксид кремния; 3 – молибден; 4 – фосфорно-силикатное стекло; 5 – алюминий

Процесс начинают с создания оксида на очищенной поверхности пластины кремния  $p$ -типа. По комбинированной технологии выращивают защитный оксид кремния толщиной 1,3 мкм (рис. 11.14, а). С помощью фотолитографии проводят селективное удаление оксида в местах формирования областей

истока, стока и затвора. В полученных окнах термическим окислением в сухом кислороде получают оксид толщиной 0,1 мкм (рис. 11.14, б), после чего на пластину осаждают сплошной слой молибдена. Затем проводят фотолитографию и травление молибдена, в результате чего формируют металлические затворы и первый слой соединительной металлизации над толстым слоем оксида (рис. 11.14, в). После этого на пластину наносят слой легированного фосфором стекла, из которого при температуре порядка 1000 °С проводится диффузия. Фосфор диффундирует только через тонкий слой оксида (рис. 11.14, г). Толстый оксид и молибденовый затвор служат масками при диффузии. Тем самым достигается самосовмещение затвора с легированными областями – истоком и стоком.

На последнем этапе с помощью фотолитографии осуществляют одновременное вскрытие контактных окон к молибдену и диффузионным областям, напыляют алюминий и фотогравировкой по алюминию формируют завершающий слой соединений (рис. 11.14, д).

Аналогичная технология используется при формировании затвора из поликристаллического кремния.

Самосовмещение истока и стока с затвором достигается также при использовании ионного легирования (рис. 11.15).

На пластинах кремния *n*-типа выращивают оксид кремния толщиной 1,0–1,3 мкм (рис. 3.15, а), по которому проводят фотолитографию для вскрытия окон под исток и сток. Диффузией бора в две стадии формируют области истока и стока транзисторных структур (рис. 3.15, б). Затем проводят фотолитографию окон под тонкий диэлектрик и после тщательной очистки проводят окисление в сухом кислороде для получения оксида кремния толщиной 0,1 мкм (рис. 3.15, в). Далее вскрывают окна под контакты и напыляют алюминий (рис. 3.15, г). Проводят фотогравировку по алюминию (рис. 3.15, д). На последней стадии применяют ионное легирование. Ионы бора проходят через тонкий диэлектрик в промежутке между истоком и затвором и между стоком и затвором, осуществляя тем самым их совмещение.

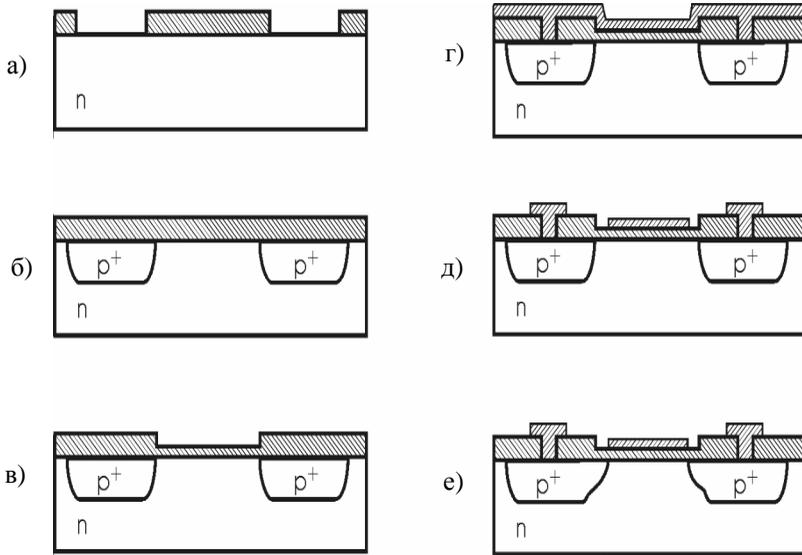


Рис. 11.15 – Последовательность изготовления МДП ИС по самосовмещенной технологии с использованием ионного легирования:

- 1 – толстый оксид кремния; 2 – тонкий оксид кремния;  
3 – алюминий

По рассмотренным технологическим процессам изготавливают подавляющее большинство цифровых и аналоговых ИМС массового потребления. Дальнейшее совершенствование процессов технологии ИМС направлено на уменьшение геометрических размеров элементов и повышение их быстродействия, что особенно актуально при создании БИС и СБИС.

## **12 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ**

### **12.1 Методические указания к выполнению контрольных работ**

По данной дисциплине предусмотрены две контрольные работы, по результатам выполнения которых выставляется зачет. Вопросы и задачи к контрольным работам составлены в соответствии с содержанием учебного пособия «Технологические процессы микроэлектроники» и соответствуют ГОС по специальности 220500.

В первую контрольную работу включены следующие темы:

- 1) фотолитография;
- 2) получение рисунка интегральных микросхем;
- 3) термические испарения в вакууме;
- 4) режимы напыления пленок методом термического испарения в вакууме;
- 5) ионно-плазменное распыление;
- 6) тонкопленочные резисторы и конденсаторы;
- 7) технология тонкопленочных элементов;
- 8) типовые технологические процессы изготовления интегральных микросхем.

По каждой теме предусмотрено десять тестовых вопросов и задач.

Вторая контрольная работа включает в себя следующие темы:

- 1) выбор подложки для полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС);
- 2) легирование полупроводников;
- 3) эпитаксия;
- 4) термическое окисление кремния;
- 5) металлизация полупроводниковых ИМС;
- 6) структуры элементов полупроводниковых ИМС;
- 7) типовые технологические процессы изготовления полупроводниковых ИМС.

В методическом пособии приняты следующие обозначения и сокращения:

- интегральная микросхема – ИМС;

- фотолитография – ФЛ;
- фоторезисты – ФР;
- фотошаблон – ФШ.

Для выполнения заданий методическое пособие снабжено приложениями. В приложении 1 приведены основные физические постоянные и соотношения между единицами измерений. Приложение 2 представляет собой периодическую систему элементов. Необходимые для расчетов характеристики металлов и полупроводников приведены в приложении 3. Константы для расчетов режимов диффузии и окисления приведены в разделах 7 и 9.

При выполнении первой контрольной работы следует обратить внимание на следующее.

Фотошаблоны могут быть с негативным и позитивным изображением по отношению к тому рисунку, который надо получить на подложке. Например, если надо сформировать окно в слое  $\text{SiO}_2$ , то в позитивном ФШ на этом месте должен быть светлый участок. Если надо получить тонкопленочный резистор или другой элемент в центре подложки, то в позитивном ФШ на этом месте должен быть темный участок. Выбор ФР (негативный или позитивный) должен быть согласован с ФШ.

Технология изготовления ФШ включать следующие операции:

- изготовление оригинала;
- изготовление промежуточного ФШ;
- изготовление эталонного ФШ;
- изготовление рабочего ФШ.

На первом этапе вычерчивается на координатографе оригинал с большим увеличением: для полупроводниковых ИМС – в масштабе от М200:1 до М1000:1, а для пленочных схем – от М10:1 до М100:1.

На втором этапе изображение оригинала переносится на редуccionной установке на фотопластину с уменьшением. После проявления фотопластины получается промежуточный ФШ с единичным изображением ИМС. Масштаб уменьшения выбирается так, чтобы промежуточный фотошаблон имел масштаб М10:1 или М5:1.

Изображение с промежуточного ФШ переносится на фотопластину на фотоповторителе с уменьшением в заданное число раз до получения конечных размеров элементов (М1:1). Одно-

временно рисунок промежуточного ФШ размножается по всему полю фотопластины столько раз, сколько потребуется затем готовых схем на подложке (групповой ФШ). После операции проявления получаем эталонный ФШ, в котором рисунок сформирован в эмульсионном слое с размерами элементов в М1:1. Эталонный ФШ нельзя использовать в качестве рабочего, так как эмульсионный слой быстро повреждается, накапливаются дефекты, и он становится не пригодным к использованию.

Рабочие ФШ делаются с эталонного ФШ на стеклянной подложке в технологическом слое с помощью контактной ФЛ.

Термическое испарение в вакууме достаточно подробно рассмотрено в учебном пособии в разделе 3.1. Распределение толщины пленки по подложке оценивается отношением толщины пленки в любой точке подложки –  $d$  к толщине в центре подложки –  $d_0$ , т.е.  $\frac{d}{d_0}$ . Если это отношение, например, равно

0,85, то это соответствует разбросу толщины 15%. Во всех задачах выбирается стандартная подложка 60×48 мм, которая устанавливается симметрично относительно испарителя на расстоянии  $h$  от него, т.е. положение испарителя соответствует центру подложки.

При расчете скорости испарения по формуле (3.7) давление  $p_s$  следует подставлять в Па, массу – в кг, температуру испарения  $T_u$  – в К. Условная температура испарения соответствует давлению насыщенных паров  $p_s = 1,33$  Па. Необходимые для расчетов константы выбираются из соответствующих приложений.

Теория ионно-плазменного распыления изложена в разделе 3.2. Ионно-плазменное распыление рекомендуется для получения пленок тугоплавких металлов ( $Ta, Mo, W$  и др.), тугоплавких окислов, карбидов, нитридов и др. (реактивное катодное распыление на постоянном токе или высокочастотное распыление).

Рисунок элементов тонкопленочных ИМС формируется с помощью контактных масок. При травлении резистивной пленки толщиной  $d$  через фоторезистивную маску ширина резистора уменьшается за счет бокового подтравива на величину  $2d$ .

Свободные маски (трафареты) при изготовлении тонкопленочных резисторов не применяются. Технологический маршрут изготовления тонкопленочных резисторов включает две последовательные прямые фотолитографии, если на подложке имеются резистивный и проводящий слои. Первая ФЛ применяется для формирования рисунка контактов, а вторая ФЛ – для формирования рисунка самого резистора.

Для формирования рисунка тонкопленочных конденсаторов требуется три фотолитографии:

первая – для формирования рисунка нижних обкладок с помощью прямой контактной маски,

вторая – прямая литография для формирования рисунка диэлектрического слоя,

третья – для формирования рисунка верхних обкладок конденсаторов с помощью обратной маски. Верхняя обкладка делается на основе металлической пленки, которая непрозрачна и через нее не видны метки совмещения. Поэтому сначала в слое ФР формируется обратный рисунок (ФР прозрачен), затем напыляется металл и за счет удаления ФР-маски получается нужный рисунок верхней обкладки. Допускается напыление диэлектрической пленки через трафарет (свободная маска), т.к. размеры области диэлектрика не влияют на параметры конденсатора. При напылении следует отдать предпочтение биметаллическим трафаретами.

При решении задач по второй контрольной работе следует подставлять все величины в системе СИ кроме размерности длины, которая подставляется в см, т.к. все графики и таблицы приводятся с использованием размерности см. Ниже приведены примеры решения задач по легированию полупроводников и технологии получения диэлектрических плёнок.

1) Определить глубину залегания  $p-n$ -перехода при диффузии бора в подложку типа  $KЭФ-1,0$ , если поверхностная концентрация примеси в легированной области  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Диффузия проводилась из ограниченного источника при температуре 1273 К в течении 30 мин.

Для решения задачи воспользуемся уравнением (7.11) учебного пособия  $x_{p-n} = 2\sqrt{Dt} \left( \ln \frac{N_0}{N_{ucx}} \right)^{1/2}$ , где  $D$  – коэффициент диффузии при температуре диффузии, определяемый по уравнению (7.1);

$t$  – время диффузии;  $N_0$  – поверхностная концентрация легированной области,  $N_{ucx}$  – исходная концентрация области, в которую проводится диффузия на глубине  $p-n$ -перехода  $x_{p-n}$ .

Определим коэффициент диффузии бора при температуре 1273 К, используя константы диффузии из приложения 4.

$$D = 11,5 \cdot \exp\left(-\frac{3,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1237}\right) = 2,66 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}.$$

Для определения  $N_{ucx}$  используем график зависимости удельного сопротивления от концентрации (рис. 7.7) для равномерно легированного кремния. Концентрация примеси в кремнии  $KЭФ-1,0$  с удельным сопротивлением  $\rho = 1,0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  равна  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

$$x_{p-n} = 2\sqrt{2,66 \cdot 10^{-14} \cdot 1800} \left( \ln \frac{5 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{15}} \right)^{1/2} = 364 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 0,364 \text{ мкм}$$

2) Мышьяк внедряется в область  $p$ -типа, примесь в которой распределяется по закону  $N(x) = 10^{19} \exp\left(\frac{-x^2}{3,9 \cdot 10^{-9}}\right)$ . При поверхностной концентрации легированной  $n$ -области, равной  $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , образуется  $p-n$ -переход на глубине 1,5 мкм. Определить концентрацию донорной примеси на глубине 1 мкм.

Основным расчетным уравнением является равенство концентрации примеси  $n$  и  $p$ -типа на глубине залегания  $p-n$ -перехода:

$$N(x)_{x=x_{p-n}}^n = N(x)_{x=x_{p-n}}^p.$$

Примесь в  $n$ -области распределяется по закону интеграла функции ошибок, так как  $x_{p-n} < 2$  мкм, тогда

$$N_0^n \operatorname{erfc} \frac{x_{p-n}}{2\sqrt{Dt}} = 10^{19} \exp\left(-\frac{x_{p-n}^2}{3,9 \cdot 10^{-9}}\right).$$

Подставляя значение  $x_{p-n}$  и  $N_0^n$  определяется значение

$$\operatorname{erfc} \frac{x_{p-n}}{2\sqrt{Dt}} = 0,000062. \text{ Воспользовавшись таблицей 7.2 со значениями } \operatorname{erfc}Z,$$

рассчитаем значение  $2\sqrt{Dt} = 5,26 \cdot 10^{-5}$ . Значение концентрации примеси на глубине 1 мкм можно определить:

$$\begin{aligned} N(x = 1 \text{ мкм}) &= 5 \cdot 10^{20} \operatorname{erfc} \frac{1 \cdot 10^{-4}}{5,26 \cdot 10^{-5}} = 5 \cdot 10^{20} \cdot 0,00721 = \\ &= 3,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}. \end{aligned}$$

3) При формировании базовой области транзистора проводим диффузию бора в кремний, обеспечивая поверхностную концентрацию  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Определить концентрацию примеси на глубине 2 мкм, если на глубине 1,2 мкм она составляет  $1,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Так как диффузия бора обычно проводится в две стадии, то распределение примеси в легированной области подчиняется закону Гаусса:

$$N(x) = N_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right).$$

Зная концентрацию примеси на глубине 1,2 мкм и поверхностную концентрацию  $N_0$ , можно определить значение  $4Dt$ :

$$4Dt = \frac{x^2}{\ln \frac{N_0}{N_{\text{исх}}}} = \frac{1,2^2 \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{1 \cdot 10^{19}}{1,3 \cdot 10^{18}}} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2.$$

Для определения концентрации примеси на глубине 2 мкм подставим найденное значение  $4Dt$  в уравнение, определяющее распределение примеси:

$$N(x) = 1 \cdot 10^{19} \exp\left(-\frac{(2 \cdot 10^{-4})^2}{7 \cdot 10^{-9}}\right) = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

4) Определить время получения пленки двуокиси кремния толщиной 1,0 мкм во влажном кислороде при температуре 1200°C.

Учитывая, что толщина окисла большая, процесс окисления описывается параболическим законом:  $x^2 = Bt$ . Значение параболической константы скорости  $B$  выбираем из таблицы 9.1 учебного пособия.

$$\text{При температуре } 1200^\circ\text{C } B = 0,72 \frac{\text{мкм}^2}{\text{ч}}.$$

$$\text{Время роста окисла } t = \frac{1,0^2}{0,72} = 1,4 \text{ час.}$$

5) Определить время получения пленки двуокиси кремния толщиной 1,5 мкм по комбинированной технологии при температуре 1200°C.

По комбинированной технологии пленка  $\text{SiO}_2$  наращивается сначала в сухом кислороде в течение 15 мин., затем во влажном до необходимой толщины. Поэтому, используя таблицу 9.1, определим толщину пленки, которая наращивается за 15 мин.

Считается, что рост пленки подчиняется линейному закону:

$$x = \frac{B}{A}(t + \tau), x = 1,12(0,25 + 0,027) = 0,3 \text{ мкм.}$$

Определим время, необходимое для получения оставшейся толщины пленки  $x^2 = Bt; t = \frac{x^2}{B} = \frac{1,2^2}{0,72} = 2 \text{ часа.}$

Суммарное время получения пленки заданной толщины равно 2,25 час., после чего пленка прогревается в сухом кислороде 1 час.

6) Определить время роста пленки двуокиси кремния толщиной 1,3 мкм во влажном кислороде при температуре 1000°C и давлении 2,5 МПа.

Используя параболический закон роста пленки, необходимо определить значение константы  $B$ . В случае роста пленки при повышенном давлении величина  $B$  увеличивается во столько раз, во сколько раз увеличивается значение концентрации окисляющих частиц  $C^*$  (табл. 9.3).

$$\frac{C^*_{2,5МПа}}{C^*_{1кПа}} = \frac{3,4 \cdot 10^{20}}{3 \cdot 10^{19}} = 11.$$

Константа скорости  $B$  будет равна  $3,157 \frac{мкм^2}{ч}$ , тогда время

получения пленки  $t = \frac{1,3^2}{3,157} = 0,53 ч = 32 \text{ мин.}$

## 12.2 Контрольная работа №2

1. Указать параметры подложки марки:

$$110 \frac{10КЭС5/5КЭМ10}{300КДБ15}.$$

2. Указать параметры подложки марки:

$$60 \frac{3КЭФ0,2/4КЭС8}{200КДБ15}.$$

3. Указать параметры подложки марки:

$$75 \frac{7КЭФ0,8/3,5КЭМ15}{200КДБ10}.$$

4. Указать параметры подложки марки:

$$60 \frac{10КЭФ0,5/5КЭМ25}{300КДБ15}.$$

5. Указать параметры подложки марки:

$$75 \frac{7KЭC0,7/2,5KЭM5}{300KДБ10}.$$

6. Указать параметры подложки марки:

$$110 \frac{7KЭФ2,02/2,5KЭC10}{200KДБ12}.$$

7. Указать параметры подложки марки:

$$75 \frac{5KЭФ1,5/2,5KЭC15}{200KДБ15}.$$

8. Указать параметры подложки марки:

$$100 \frac{5KЭФ0,1/4KЭM8}{200KДБ15}.$$

9. Указать параметры подложки марки:

$$110 \frac{7KЭФ1,5/5KЭC5,0}{300KДБ8}.$$

10. Указать параметры подложки марки:

$$75 \frac{5KЭФ - 0,5/2KЭM5}{200KДБ - 10}.$$

11. На этапе разгонки примесь распределяется по закону:

- а) интеграла функции ошибок;    б) параболическому;  
в) линейному;    г) закону Гаусса.

12. На этапе загонки примесь распределяется по закону:

- а) интеграла функции ошибок;      б) параболическому;  
в) линейному;      г) закону Гаусса.

13. При легировании полупроводника  $p-n$ -переход образуется на глубине, где:

- а) концентрация введенной примеси больше концентрации исходной примеси;  
б) концентрация введенной примеси равна концентрации исходной примеси;  
в) концентрация введенной примеси меньше концентрации исходной примеси.

14. Для создания базовых областей  $n^+ - p - n$ -транзисторов в качестве легирующей примеси используется:

- а) мышьяк;      б) фосфор;  
в) бор;      г) сурьма.

15. Для создания скрытых слоев в полупроводниковой ИМС в качестве легирующей примеси используется:

- а) бор;      б) алюминий;  
в) мышьяк;      г) фосфор.

16. Для создания эмиттерных областей  $n^+ - p - n$ -транзистора в качестве легирующей примеси используется:

- а) сурьма;      б) алюминий;  
в) бор;      г) фосфор.

17. При создании легированных областей методом термической диффузии максимум концентрации примеси находится:

- а) на глубине  $p-n$ -перехода;  $x_{p-n}$  ;  
 б) на поверхности;  
 в) на глубине  $\frac{1}{2} x_{p-n}$  ;  
 г) на глубине средней проекции пробега  $R_p$  .

18. При создании легированных областей методом ионного легирования максимум концентрации примеси находится:

- а) на глубине  $p-n$ -перехода;  $x_{p-n}$  ;  
 б) на поверхности;  
 в) на глубине средней проекции пробега  $R_p$  ;  
 г) на глубине  $\frac{1}{2} x_{p-n}$  ;

19. Этап разгонки проводится в атмосфере;

- а) легирующей примеси;      б) кислорода;  
 в) водорода;                      г) аргона.

20. При проведении локальной диффузии маской является:

- а) фоторезист;                      б) фотошаблон;  
 в) пленка двуокиси кремния; г) пленка алюминия.

21. Рассчитать количество донорной примеси фосфора, внедряемое в кремний из бесконечного источника при температуре  $1000^\circ\text{C}$  за 40 мин.

- а)  $2,3 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2}$ ;              б)  $4,1 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ ;              в)  $3,8 \cdot 10^{20} \text{см}^{-2}$ .

22. Определить глубину залегания  $p-n$ -перехода при диффузии бора в подложку типа  $KЭФ-0,5$ , если поверхностная концентрация легированной области  $10^{18} \text{см}^{-3}$ . Диффузия прово-

дилась из ограниченного источника при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$  в течении 40 мин.

- а) 0,12 мкм;                      б) 1,2 мкм;                      в) 4,0 мкм.

23. При проведении двухстадийной диффузии фосфора в кремний получена поверхностная концентрация  $10^{19}\text{см}^{-3}$ . Определить концентрацию примеси на глубине 2 мкм, если на глубине 0,5 мкм она составляет  $7,5 \cdot 10^{18}\text{см}^{-3}$ .

- а)  $1 \cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$ ;                      б)  $1 \cdot 10^{19}\text{см}^{-3}$ ;                      в)  $1 \cdot 10^{21}\text{см}^{-3}$ .

24. Фосфор внедряется в кремний типа *КДБ* –15, создавая область *n*-типа с поверхностным сопротивлением  $4\text{ Ом}/\square$  и глубиной залегания *p-n*-перехода 1,5мкм. Определить концентрацию примеси на глубине 1мкм. если температура диффузии  $1100^{\circ}\text{C}$

- а)  $4 \cdot 10^{14}\text{см}^{-3}$ ;                      б)  $4 \cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$ ;                      в)  $4 \cdot 10^{20}\text{см}^{-3}$ .

25. Фосфор внедряется в легированную область *p*-типа, где примесь распределяется по закону  $N(x) = 5 \cdot 10^{+18} \exp(-\frac{x^2}{3,7 \cdot 10^{-9}})$ .

Поверхностное сопротивление *n*-области  $5\text{ Ом}/\square$  и глубина залегания *p-n*-перехода 1,7мкм получены при  $T=1400\text{ К}$ . Определить концентрацию донорной примеси на глубине 1,7 и 1,2 мкм.

- а)  $1 \cdot 10^{21}\text{см}^{-3}$ ;                      б)  $1 \cdot 10^{20}\text{см}^{-3}$ ;                      в)  $1 \cdot 10^{18}\text{см}^{-3}$ .

26. Рассчитать количество донорной примеси мышьяка, внедряемое в кремний из бесконечного источника при температуре  $900^{\circ}\text{C}$  за 40 мин.

- а)  $4,2 \cdot 10^{10}\text{см}^{-2}$ ;                      б)  $4,2 \cdot 10^{14}\text{см}^{-2}$ ;                      в)  $4,2 \cdot 10^{20}\text{см}^{-2}$ .

27. При формировании диффузионного резистора проводили диффузию бора в кремний, обеспечивая поверхностную концентрацию  $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Определить концентрацию примеси на глубине 1,5 мкм, если на глубине 0,5 мкм она составляет  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

- а)  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ;                      б)  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;                      в)  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

28. Фосфор внедряется в кремний типа КДБ-15, создавая область  $n$ -типа с поверхностным сопротивлением  $4 \text{ Ом}/\square$  и глубиной залегания  $p-n$ -перехода 1,5 мкм. Определить концентрацию примеси на глубине 1,2 мкм, если температура диффузии  $1100^\circ\text{C}$ .

- а)  $2,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;                      б)  $2,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;                      в)  $2,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

29. При формировании диффузионного резистора проводили диффузию бора в кремний, обеспечивая поверхностную концентрацию  $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Определить концентрацию примеси на глубине 1,5 мкм, если на глубине 0,7 мкм она составляет  $3,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

- а)  $2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;                      б)  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;                      в)  $2,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

30. При диффузии фосфора в  $p$ -область, примесь в которой распределяется по закону  $N(x) = 1,5 \cdot 10^{18} \exp\left(-\frac{x^2}{3,8 \cdot 10^{-9}}\right)$ , получено поверхностное сопротивление  $3 \text{ Ом}/\square$ . Глубина залегания  $p-n$ -перехода 1,5 мкм. Определить концентрацию примеси на глубине 1,5 мкм и 0,5 мкм, если температура диффузии  $1100^\circ\text{C}$ .

- а)  $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ;                      б)  $1,6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;                      в)  $1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

31. Структура эпитаксиальных пленок:

- а) поликристаллическая;
- б) монокристаллическая;
- в) аморфная.

32. В эпитаксиальной пленке донорная или акценторная примесь распределяется:

- а) по закону Гаусса;
- б) равномерно;
- в) по закону интеграла функций ошибок;
- г) по параболическому закону.

33. При получении эпитаксиальных пленок кремния используется метод химического осаждения из газовой фазы, так как:

- а) отсутствуют примеси и загрязнения;
- б) обеспечивается высокая подвижность атомов на подложке;
- в) процесс идет при низкой температуре.

34. При окислении кремния в сухом кислороде пленка двуокиси кремния получается:

- а) хорошего качества;
- б) с большой скоростью;
- в) при низкой температуре.

35. При окислении кремния в парах воды пленка двуокиси кремния получается:

- а) хорошего качества;
- б) с большой скоростью;
- в) при низкой температуре подложки.

36. Скорость окисления кремния при повышении давления окислителя:

- а) остается неизменной;

- б) увеличивается;
- в) уменьшается.

37. В какой атмосфере выращивается подзатворный диэлектрик оксида кремния:

- а) в парах воды;
- б) во влажном кислороде;
- в) в сухом кислороде.

38. При получении толстого маскирующего оксида кремния (1,5 мкм) используют:

- а) термическое окисление в сухом кислороде;
- б) термическое окисление в парах воды;
- в) комбинированную технологию.

39. При большой толщине пленки  $SiO_2$  ( $>0,5$  мкм), получаемой термическим окислением, зависимость скорости роста толщины слоя от времени описывается:

- а) линейным законом;
- б) параболическим законом;
- в) экспоненциальным законом.

40. Комбинированная технология, используемая при получении пленок двуокиси кремния, обеспечивает:

- а) сокращение времени окисления;
- б) улучшение параметров пленки;
- в) снижение температуры роста.

41. Определить время получения пленки двуокиси кремния толщиной 1,5 мкм во влажном кислороде при температуре 1200°C.

- а) 1,1 час;
- б) 0,5 час;
- в) 3,12 час.

42. Определить время получения пленки двуокиси кремния толщиной 1,5 мкм по комбинированной технологии при температуре 1200°C.

- а) 0,25 час;                      б) 3,25 час;                      в) 5,1 час.

43. Определить время роста пленки двуокиси кремния толщиной 1 мкм во влажном кислороде при температуре 1000°C и давлении 2,5 МПа.

- а) 1,25 час;                      б) 1 час;                      в) 0,3 час.

44. Определить время роста пленки двуокиси кремния толщиной 1,5 мкм во влажном кислороде при температуре 1000°C и давлении 2 МПа.

- а) 1,83 час;                      б) 0,78 час;                      в) 0,25 час.

45. Определить время выращивания пленки двуокиси кремния для подзатворного диэлектрика МДП ИС толщиной 0,12 мкм при температуре 1000°C.

- а) 2,5 час;                      б) 2,12 час;                      в) 1,23 час.

46. Определить время получения подзатворного диэлектрика при температуре 920°C и давлении кислорода 1 МПа.

- а) 1,2 час;                      б) 0,38 час;                      в) 0,26 час.

47. Рассчитать время получения маски из  $SiO_2$  для диффузии фосфора толщиной 1 мкм при температуре 1200°C.

- а) 3,6 час;                      б) 2,5 час;                      в) 1,4 час.

48. Определить время, необходимое для создания изопланарной изоляции. Эпитаксиальная пленка имеет толщину 3 мкм.

Процесс окисления проходит во влажном кислороде при температуре 1200°C и давлении кислорода 2 МПа.

- а) 2,15 час;                      б) 1,25 час;                      в) 0,5 час.

49. Определить время роста пленки двуокиси кремния толщиной 1,5 мкм во влажном кислороде при температуре 1000°C и давлении 2 МПа.

- а) 2,78 час;                      б) 1,78 час;                      в) 0,78 час.

50. Определить время выращивания пленки двуокиси кремния для подзатворного диэлектрика толщиной 0,12 мкм при температуре 1000°C.

- а) 2,23 час;                      б) 1,23 час;                      в) 0,53 час.

51. Представить структуру эпитаксиально-планарного биполярного транзистора.

52. Представить структуру двух резисторов в базовой области.

53. Представить структуру диода.

54. Представить структуру МДП-конденсатора.

55. Представить структуру МДП ИС на комплементарных транзисторах.

56. Представить структуру МДП ИС на транзисторах с каналами  $p$ -типа проводимости.

57. Представить структуру пинч-резистора.

58. Представить структуру диффузионно-планарного биполярного транзистора.

59. Представить структуру двух резисторов в эмиттерной области.

60. Представить структуру МДП ИС на транзисторах с каналами  $n$ -типа проводимости.

61. Изоляция элементов в биполярной ИМС обратнo-сместенным  $p-n$ -переходом обеспечивает:

- а) надежную изоляцию элементов на высоких частотах;
- б) простоту технологии;
- в) сложную механическую обработку пластин.

62. Диэлектрическая изоляция элементов биполярной ИМС обеспечивает:

- а) надежную изоляцию элементов;
- б) простоту технологии;
- в) введение дополнительной операции диффузии.

63. В МДП ИС на транзисторах с каналами одного типа проводимости изоляция элементов:

- а) диэлектрическая;
- б) не требуется;
- в) комбинированная.

64. Представить профиль распределения примеси в биполярном транзисторе, изготовленном по эпитаксиально-планарной технологии.

65. Представить профиль распределения примеси в биполярном транзисторе в схеме с диэлектрической изоляцией

66. Представить профиль распределения примеси в биполярном транзисторе изготовленном по диффузионно-планарной технологии.

67. Представить профиль распределения примеси в транзисторе изготовленном по изопланарной технологии.

68. Представить профиль распределения примеси в транзисторе изготовленном по полипланарной технологии.

69. Представить профиль распределения примеси в МДП транзисторах в схеме с каналами одного типа проводимости.

70. Представить профиль распределения примеси в транзисторах МДП ИС на комплементарных транзисторах.

Варианты заданий для контрольной работы №2 представлены в таблице.

Номер варианта	Номера заданий						
	1	2	3	4	5	6	7
Вариант 1	1	11	21	31	41	51	61
Вариант 2	2	12	22	32	42	52	62
Вариант 3	3	13	23	33	43	53	63
Вариант 4	4	14	24	34	44	54	64
Вариант 5	5	15	25	35	45	55	65
Вариант 6	6	16	26	36	46	56	66
Вариант 7	7	17	27	37	47	57	67
Вариант 8	8	18	28	38	48	58	68
Вариант 9	9	19	29	39	49	59	69
Вариант 10	10	20	30	40	50	60	70

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микроэлектроника, основанная на комплексном использовании физических, химических, технологических, кибернетических и других исследований, за сравнительно короткий исторический период прошла большой путь. Основным достижением микроэлектроники является создание принципиально новых технологических процессов на основе применения прецизионного технологического и контрольно-измерительного оборудования и различных полупроводниковых, диэлектрических и проводящих материалов, обеспечивающих промышленное производство широкой номенклатуры интегральных микросхем различного конструктивно-технологического исполнения и функционального назначения. Изделия микроэлектроники – интегральные микросхемы, БИС, в том числе микропроцессоры, микро-ЭВМ и др., стали основной элементной базой современной микроэлектронной аппаратуры, отличающейся высокими и технико-эксплуатационными характеристиками, надежностью и низкой стоимостью.

Основной тенденцией развития современной микроэлектроники является схмотехническая и технологическая интеграция, обеспечивающая создание БИС и СБИС высокой степенью интеграции элементов.

Определяющим в создании современных БИС и СБИС наряду с достижением физики и схмотехники является технология, основанная на групповых методах локальной обработки твердотельных материалов (литография, легирование, нанесение пленок и др.) с целью создания в материалах локальных областей в виде статических неоднородностей и последующего объединения этих областей в законченную конструкцию, выполняющую определенную схмотехническую функцию, причем полупроводниковая технология является базой для изготовления массовых ИМС и БИС на основе биполярных и МДП-транзисторов, а гибридная – на основе тонких и толстых пленок – для специализированных ИМС, БИС и МСБ.

Создание высоконадежных и дешевых БИС и СБИС, сфера применения которых в различных областях непрерывно расширяется, выдвинуло микроэлектронику в число ведущих отраслей науки и техники, определяющих ускорение научно-технического прогресса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. – М.: Высшая школа, 1986. – 464 с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 315 с.
3. Радионов Ю.А. Литография в производстве интегральных микросхем. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 95 с.
4. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Учеб. пособие для ПТУ. Кн.8. Литографические процессы / В.В. Мартынов, Т.Е. Базарова. – М.: Высшая школа, 1990. – 120 с.
5. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
6. Данилина Т.И. Перспективные технологии производства СБИС. – Томск: ТМЦ ДО, 2000. – 99 с.
7. Технология тонких пленок: Справочник / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – М.: Сов.радио, 1977. Т.1. – 662 с.
8. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. – Томск: Томск. ун-т систем управления и радиоэлектроники. 2000. – 140 с.
9. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. – М.: Сов.радио, 1979. – 104 с.
10. Матсон Э.А., Крыжановский Д.В. Справочное пособие по конструированию микросхем. – Минск: Высшая школа, 1982. – 224с.
11. Данилина Т.И., Смирнова К.И. Физические основы технологии микросхем. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1984. – 86 с.
12. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
13. Технология и аппаратура газовой эпитаксии кремния и германия. – М.: Энергия, 1978. – 134 с.
14. Технология СБИС / Под ред. С.Зи. – М.: Мир, 1986. Т.1, 2.
15. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Высшая школа, 1986. – 386 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянные	Символ	Значение	Единицы СИ
Элементарный заряд	$e$	1,6	$10^{-19}$ Кл
Число Авогадро	$N_A$	6,02	$10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Масса покоя электрона	$m_e$	9,1	$10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	$h$	6,62	$10^{-34}$ Дж·с
Атомная единица массы	$a.e.m.$	1,66	$10^{-27}$ кг
Газовая постоянная	$R$	8,3	Дж · моль <sup>-1</sup> град <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана	$k$	1,38	$10^{-23}$ Дж · град <sup>-1</sup>
Первый радиус Бора	$a_0$	5,67	$10^{-11}$ м
Диэлектрическая проницаемость вакуума	$\epsilon_0$	8,85	$10^{-12}$ Ф · м <sup>-1</sup>

### СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

$$1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал}; 1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1 \cdot 6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1 \cdot 6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,83 \cdot 10^{-20} \text{ кал}$$

$$1 \text{ м} = 10^{10} \text{ \AA} = 10^9 \text{ нм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^3 \text{ мм} = 10^2 \text{ см}$$

$$\text{Заряд электрона } e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ СГС} = 1 \cdot 6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\text{Газовая постоянная } R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} = 1,987 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Периодическая система элементов

Периоды	Ряды	Группы элементов										
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	I	<i>H</i> <sup>1</sup> 1,008								<i>He</i> <sup>2</sup> 4,0		
2	II	<i>Li</i> <sup>3</sup> 6,94	<i>Be</i> <sup>4</sup> 9,01	<i>B</i> <sup>5</sup> 10,81	<i>C</i> <sup>6</sup> 12,0	<i>N</i> <sup>7</sup> 14,01	<i>O</i> <sup>8</sup> 16,0	<i>F</i> <sup>9</sup> 19,0	<i>Ne</i> <sup>10</sup> 20,18			
3	III	<i>Na</i> <sup>11</sup> 23	<i>Mg</i> <sup>12</sup> 24,30	<i>Al</i> <sup>13</sup> 26,98	<i>Si</i> <sup>14</sup> 28,09	<i>P</i> <sup>15</sup> 30,97	<i>S</i> <sup>16</sup> 32,06	<i>Cl</i> <sup>17</sup> 35,45	<i>Ar</i> <sup>18</sup> 40,0			
4	IV	<i>K</i> <sup>19</sup> 39,10	<i>Ca</i> <sup>20</sup> 40,08	<i>Sc</i> <sup>21</sup> 44,96	<i>Ti</i> <sup>22</sup> 47,90	<i>V</i> <sup>23</sup> 50,94	<i>Cr</i> <sup>24</sup> 52,0	<i>Mn</i> <sup>25</sup> 54,9	<i>Fe</i> <sup>26</sup> 55,8	<i>Co</i> <sup>27</sup> 58,9	<i>Ni</i> <sup>28</sup> 58,7	
	V	<i>Cu</i> <sup>29</sup> 63,55	<i>Zn</i> <sup>30</sup> 65,38	<i>Ga</i> <sup>31</sup> 69,72	<i>Ge</i> <sup>32</sup> 72,5	<i>As</i> <sup>33</sup> 74,92	<i>Se</i> <sup>34</sup> 79,0	<i>Br</i> <sup>35</sup> 79,9	<i>Kr</i> <sup>36</sup> 83,8			
5	VI	<i>Rb</i> <sup>37</sup> 85,5	<i>Sr</i> <sup>38</sup> 87,6	<i>Y</i> <sup>39</sup> 88,9	<i>Zr</i> <sup>40</sup> 91,2	<i>Nb</i> <sup>41</sup> 92,9	<i>Mo</i> <sup>42</sup> 96,0	<i>Tc</i> <sup>43</sup> 98,9	<i>Ru</i> <sup>44</sup> 101,0	<i>Rh</i> <sup>45</sup> 102,9	<i>Pd</i> <sup>46</sup> 106,4	
	VII	<i>Ag</i> <sup>47</sup> 107,9	<i>Cd</i> <sup>48</sup> 112,4	<i>In</i> <sup>49</sup> 114,8	<i>Sn</i> <sup>50</sup> 118,8	<i>Sb</i> <sup>51</sup> 121,8	<i>Te</i> <sup>52</sup> 127,6	<i>I</i> <sup>53</sup> 126,9	<i>Xe</i> <sup>54</sup> 131,3			
6	VIII	<i>Cs</i> <sup>55</sup> 132,9	<i>Ba</i> <sup>56</sup> 137,3	<i>La-Lu</i> <sup>72</sup>	<i>Hf</i> <sup>73</sup> 178,5	<i>Ta</i> <sup>74</sup> 180,9	<i>W</i> <sup>75</sup> 183,8	<i>Re</i> <sup>76</sup> 186,2	<i>Os</i> <sup>77</sup> 190,2	<i>Ir</i> <sup>78</sup> 192,2	<i>Pt</i> <sup>79</sup> 195,0	
	IX	<i>Au</i> <sup>79</sup> 197	<i>Hg</i> <sup>80</sup> 200,6	<i>Tl</i> <sup>81</sup> 204,3	<i>Pb</i> <sup>82</sup> 207,2	<i>Bi</i> <sup>83</sup> 209,0	<i>Po</i> <sup>84</sup> (209)	<i>At</i> <sup>85</sup> (210)	<i>Rn</i> <sup>86</sup> (222)			
7	X	<i>Fr</i> <sup>87</sup> (223)	<i>Ra</i> <sup>88</sup> 226	<i>Ac-(Lr)</i> <sup>104</sup>	<i>Ku</i> <sup>105</sup> (261)	<i>Ns</i> <sup>105</sup> (261)						

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Параметры металлов и полупроводников

Материал	Плотность $\gamma \cdot 10^3$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Атомная плотность $N_0 \cdot 10^{28}$ , $\text{атом}/\text{м}^3$	Условная температура испарения, К	Коэффициенты		Энергия сублимации, $E_{\text{суб}}$ , эВ
				A	B	
<b>A</b>	10,49	5,85	1320	10,78	14090	2,7
<b>g</b>						
<b>Al</b>	2,7	6,04	1400	11,11	15630	3,26
<b>Cu</b>	8,96	8,52	1546	10,84	16580	3,56
<b>Mo</b>	10,2	6,39	2800	10,92	30310	6,9
<b>Au</b>	19,32	5,90	1738	10,77	18520	3,92
<b>Pt</b>	21,5	6,61	2360	11,75	27500	5,56
<b>Ti</b>	4,52	5,66	1820	11,1	20110	4,34
<b>W</b>	19,3	6,09	3580	11,36	40260	8,76
<b>Ni</b>	8,9	9,03	1780	11,67	20600	4,41
<b>Cr</b>	7,19	7,64	1478	12,0	17560	3,68
<b>Si</b>	2,42	5,04	1615	12,32	19700	3,91
<b>Ta</b>	16,6	5,52	3340	12,12	40210	8,7
<b>Ge</b>	5,32	4,53	1520	10,12	15150	3,77