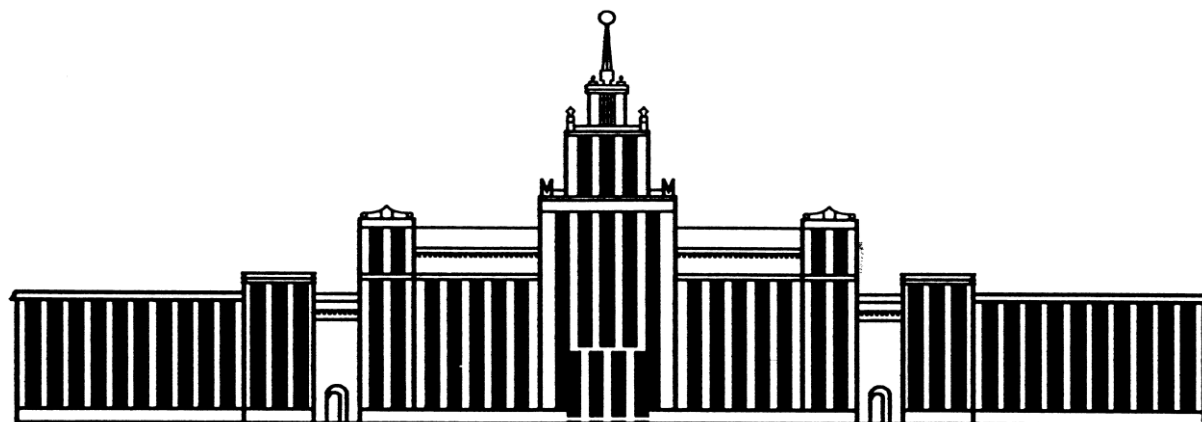

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

621.38(07)
К885

А.М. Кувшинов

**ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.
КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ
МИКРОСХЕМ**

Учебное пособие

Челябинск
2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Физика наноразмерных систем»

621.38(07)
К885

А.М. Кувшинов

**ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.
КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ**

Учебное пособие

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2019

УДК 621.38-022.53(075.8)
К885

Одобрено
учебно-методической комиссией института естественных и точных наук

Рецензенты: Е.А. Беленков, М.И. Шуняев

Кувшинов, А.М.

К885

Основы микро- и наноэлектроники. Конструкция и технология микросхем: учебное пособие / А.М. Кувшинов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – 47 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» при изучении дисциплин «Наноэлектроника», «Интегральная электроника и наноэлектроника». В учебном пособии изложены основы конструкций элементов полупроводниковых и гибридных микросхем, технологии производства интегральных микросхем. Подробно рассмотрены физико-технические аспекты электронной технологии.

Учебное пособие также может использоваться студентами родственных специальностей для изучения схожих дисциплин

УДК 621.38-022.53(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2019

1. ВВОДНЫЙ РАЗДЕЛ

1.1. Основные понятия и определения

Курс нанoeлектроники, изучаемый студентами направления «Электроника и нанoeлектроника», охватывает широкий круг вопросов в быстро развивающейся научной и практической сфере электронных технологий. В то же время, на изучение курса отводится ограниченное время, и студенту трудно самостоятельно изучить посвященную этим вопросам литературу.

Курс состоит из двух частей. В первой части изложены базовые микрoeлектронные технологии. Во второй части обсуждаются перспективы развития нанoeлектронных технологий. Такое изложение соответствует логике развития технологий в области электроники. Даже при применении принципиально иных материалов, перспективные конструкции нанoeлектронных приборов предполагают изготовление в традиционных для микрoeлектроники технологических процессах – литографии, нанесении тонких пленок и др. Поэтому понимание устройства и принципов работы нанoeлектронных устройств требует знания устройства, принципов работы и технологии изготовления традиционных микрoeлектронных устройств. Указанные области и являются предметом для изучения в данном пособии.

Электрoника (от греч. Ηλεκτρoν — электрон) — наука, занимающаяся изучением взаимодействия электронов с электромагнитными полями и разработкой методов создания электронных приборов, устройств или элементов, используемых, в основном, для передачи, обработки и хранения информации.

Различают следующие области:

- физическую — область, в которой изучаются процессы, происходящие с заряженными частицами в вакууме, газах, жидкостях и твердых телах.
- прикладную — электронные приборы и устройства, принцип действия которых основан на взаимодействии заряженных частиц с электромагнитными полями и используется для преобразования электромагнитной энергии (например, для передачи, обработки и хранения информации). Наиболее характерные виды таких преобразований: генерирование, усиление, приём электромагнитных колебаний с частотой до 10^{12} Гц, а также инфракрасного, видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучений (10^{12} — 10^{20} Гц). Возможность таких преобразований обусловлена малой инерционностью электрона.
- энергетическую промышленную
- цифровые и информационные технологии — разработка и выпуск класса устройств, потребляющих электрическую энергию, содержащих логические элементы, и, как правило, обрабатывающих некоторую информацию.

1.2. Микро- и нанoeлектроника. Интегральная электроника

Развитие научных представлений и технологий изготовления электронных устройств привело к появлению *микроэлектроники* – области науки и техники, продуктом которой являются микроминиатюрные устройства, выполняющие достаточно сложные и разнообразные функции по преобразованию электрических сигналов.

Задачи, решаемые сейчас при помощи микроэлектронных устройств, исторически возникли до их появления и решались при помощи различных электрических схем. Были разработаны электрические схемы, включающие небольшое разнообразие типовых элементов и схем, при помощи которых можно было решать самые разнообразные задачи по преобразованию сигналов, особенно в цифровых устройствах. Основным направлением развития микроэлектроники стала *микроминиатюризация* – реализация элементов электрических схем в микро- и наноразмерных масштабах. Именно от возможностей микроэлектронной технологии зависят скорость и объем одновременно перерабатываемой информации. Современные микросхемы могут содержать $\sim 10^8 - 10^{10}$ элементов при технологическом размере < 10 нм.

При указанном уровне миниатюризации работа приборов и устройств изменяется вследствие большого влияния квантовых и размерных эффектов. Именно такое изменение функционирования является критерием, по которому устройства относят к *нанoeлектронике*. Ведутся разработки нанoeлектронных приборов и устройств, порой значительно отличающихся по конструкции от микроэлектронных. Вместе с тем, технологии их изготовления во многом остаются основанными на тех же технологических операциях.

Кроме этого традиционного направления, развитие микроэлектроники направлено на создание *функциональной электроники* – электронных устройств, выполняющих преобразование сигналов без формирования традиционных элементов электрических схем, за счет физических свойств среды, в которой движутся заряженные частицы или их особого поведения в электромагнитных полях (кроме вакуумной электроники, поскольку ее устройства не являются миниатюрными). Направления функциональной электроники:

- оптоэлектроника
- акустоэлектроника
- магнитоэлектроника

Перспективы функциональной электроники связывают с такими направлениями, как:

- выполнение отдельных сложных задач, требующих при традиционном подходе большого количества элементов, например, генерация сигналов специальной формы, передача информации.
- защита от помех при преобразовании и передаче сигналов, например, гальваническая развязка оптоэлектронными устройствами.

Интегральная технология является основой создания микромасштабных устройств. Суть ее заключается в том, что все элементы электрических схем выполнены на едином физическом носителе, а все однотипные элементы выполняются в едином технологическом процессе.

Микроэлектронные устройства выпускаются в виде *интегральных микросхем (ИМС)* – изделий для преобразования сигналов, произведенных в едином технологическом цикле.

По конструктивно-технологическому исполнению различают следующие виды ИМС:

- полупроводниковые (биполярные, МОП);
- гибридные (пленочные) (тонкопленочные, толстопленочные).

Для изготовления микроэлектронных изделий широко применяются *принципы массового производства*:

- групповое изготовление: в технологическом оборудовании закрепляются пластины с заготовками десятков микросхем, которые затем разъединяются;
- взаимозаменяемость и подгонка: из одинаковых заготовок структур выполняются разные элементы, что позволяет уменьшить число технологических операций и выпускать серии микросхем различного назначения.

Применение этих принципов обеспечивает *планарная технология*: все ЭРЭ располагаются на одной стороне подложки, в один слой. Это позволяет иметь одновременный доступ к большому числу элементов, располагать на поверхности контактные площадки и выводы, получать диэлектрические слои окислением Si.

2. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС

2.1. Принципы создания интегральных полупроводниковых приборов

Полупроводниковые микросхемы выполняются на кристалле полупроводника. Основным полупроводником является Si.

В основе работы полупроводниковых микросхем лежат два основных принципа:

- возможность управления электропроводностью области кристалла полупроводника за счет введения в эту области легирующей примеси в определенной концентрации;
- управляющие свойства энергетических переходов, позволяющие создавать на кристалле полупроводниковые приборы.

В качестве энергетических переходов используются р-п переходы, структуры типа «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП, также называются МОП – «металл-диэлектрик-полупроводник», если диэлектрик – SiO₂).

Элементы схем реализуются за счет создания в кристалле областей с различным типом и величиной электропроводности:

- области полупроводника, легированные примесями p- и n-типа с различной концентрацией; используются для создания полупроводниковых приборов, резисторов, обкладок конденсаторов, изоляции;
- металлические проводники; используются для соединения элементов, обкладок конденсаторов;
- диэлектрические области; используются для изоляции элементов схем друг от друга и в качестве диэлектрика конденсаторов.

Выбор полупроводника и сопутствующих материалов обусловлен сочетанием их физических свойств, прежде всего структурных параметров. Типичное сочетание: полупроводник Si, проводка Al, диэлектрические слои SiO₂ или Si₃N₄. Используются также другие полупроводники – соединения группы A^{III}B^V (GaAs, InP в оптоэлектронике), материалы, обладающие полезными физическими свойствами (например, пьезоэлектрики в акустоэлектронике).

Применение интегральной технологии и принципов массового производства для изготовления интегральных полупроводниковых приборов заключается в следующем. Основными элементами полупроводниковых микросхем являются p-p-n транзисторы и МОП-транзисторы. Диоды, стабилитроны и пассивные элементы изготавливаются из областей, которые входят в конструкцию основных элементов, чтобы можно было изготавливать их в едином технологическом цикле.

2.2. Монокристаллический Si в электронной технологии

Основной полупроводник. Причины широкого применения – подходящая ширина запрещенной зоны, технологичность, высокие и стабильные диэлектрические свойства SiO₂, большие природные запасы. Основные физические свойства Si приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование физического свойства	Значение
Концентрация атомов при 298 К, см ⁻³	4,99·10 ²²
Плотность при 298 К, г/см ³	2,329
Температура плавления, °С	1417
ТКЛР, К ⁻¹	4,2·10 ⁻⁶
Диэлектрическая проницаемость	11,7
Ширина запрещенной зоны при 300 К, эВ	1,11
Эффективная масса электронов, отн.ед.	0,33
Подвижность электронов при 300 К, см ² /(В·с)	1400
Эффективная масса дырок, отн.ед.	0,55
Подвижность дырок при 300 К, см ² /(В·с)	500
Концентрация собственных носителей заряда при 300 К, см ⁻³	1,5·10 ¹⁰

В производстве используется в виде круглых пластин диаметром до 300 мм (в перспективе 450 мм), толщиной 0,2–1,0 мм. Пластины должны иметь высокий класс чистоты поверхности, с шероховатостью на порядок ниже

минимального размера элемента. Пластины получают резкой монокристалла Si цилиндрической формы. После завершения изготовления кремниевой части ИМС пластина разрезается на платы отдельных ИМС.

В качестве примесей используются в основном элементы III (p) и V (n) групп: Al, B, Sb, As, P, Au. Типичные концентрации примесей превосходят концентрацию собственных носителей заряда при $T \sim 300$ К, по крайней мере, на 3 порядка, поэтому можно считать, что проводимость любой легированной области определяется концентрацией примеси. Свойства Si подробно обсуждаются в [1, 5, 6].

2.3. Конструкция биполярных интегральных транзисторов

Требования к интегральным транзисторам:

- малое время переключения;
- низкое энергопотребление;
- малые токи утечки и высокое напряжение пробоя;
- отсутствие паразитных p-n переходов и коротких замыканий;

Структура и топология интегральных транзисторов разрабатываются так, чтобы максимально выполнить эти требования. Во всей ИМС используется только один вид транзисторов. Все или большинство транзисторов изготавливаются из одинаковых по свойствам областей, отличающихся только размерами.

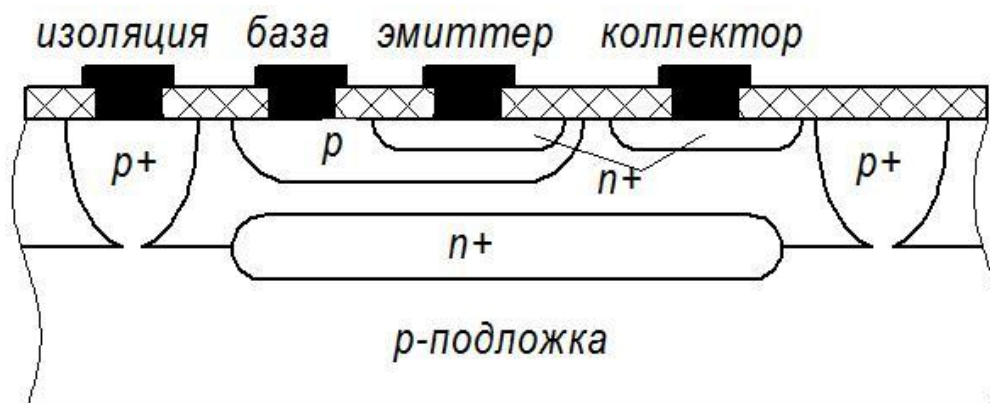


Рис. 1. Структура планарно-эпитаксиального n-p-n транзистора

Базовая структура n-p-n (рис. 1) транзистора включает эпитаксиальный коллекторный n-слой, базовый p-слой, высоколегированные (n^+) скрытый слой и контактные области эмиттера и коллектора. Транзистор располагается на подложке p-типа, коммутируется к другим элементам схемы разводкой из Al, изоляция по поверхности – из SiO_2 . Для изоляции в объеме кристалла используются p^+ -области, подключенные вместе с подложкой к низшему потенциалу в ИМС и образующие обратносмещенные p-n переходы с эпитаксиальным слоем. Низколегированные слои обеспечивают высокое напряжение пробоя и малые токи утечки. Скрытый слой создает низкоомный путь для электронов от эмиттера к коллектору. Сильное легирование контактных n^+ -областей эмиттера и коллектора необходимо, чтобы

предотвратить возникновение паразитных р-п переходов при растворении (до 10^{18} см^{-3}) Al, являющегося р-примесью в Si.

Транзисторы р-п-р обладают заведомо худшими характеристиками, и потому изготавливаются на основе слоев п-р-п транзистора: базовые р-области используются в качестве эмиттера и коллектора, контактный n^+ -слой, эпитаксиальный п-слой и скрытый n^+ -слой – в качестве базы.

Пример структуры и топологии транзистора р-п-р показана на рис. 2. Коллектор выполнен в симметричной топологии. Это увеличивает эффективную ширину и уменьшает сопротивление на пути коллектор-эмиттер до 2-3 раз. В симметричной топологии могут выполняться и п-р-п транзисторы.

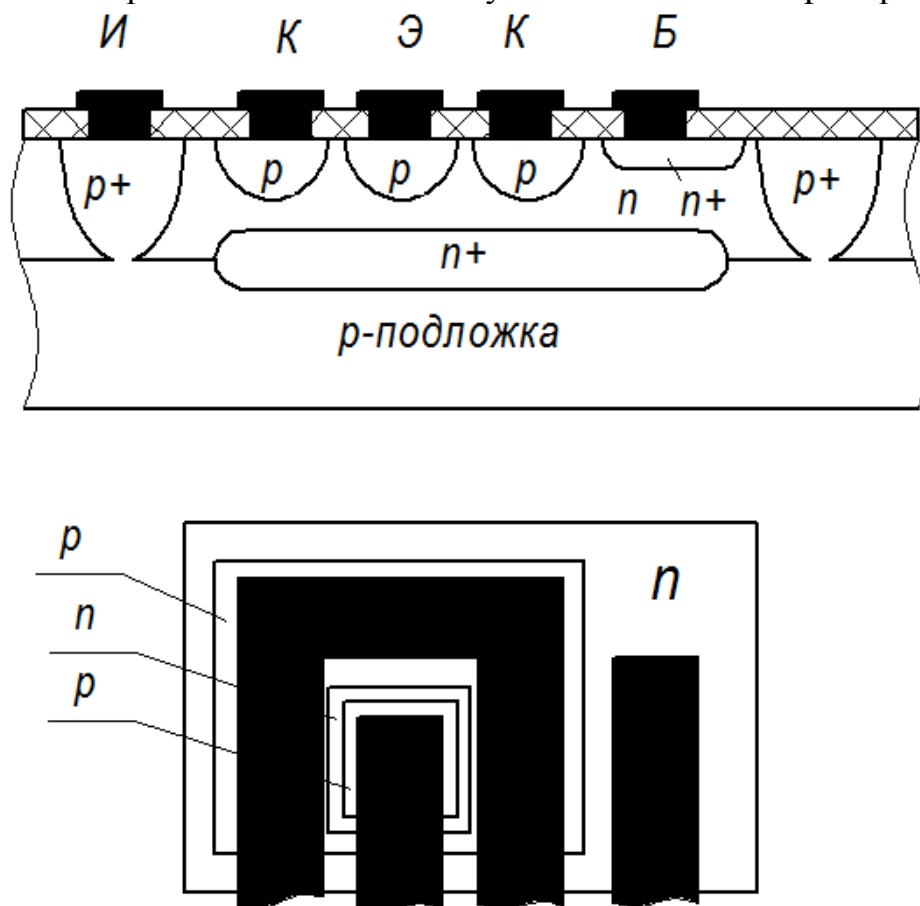


Рис. 2. Структура и топология р-п-р транзистора

В табл. 2 приведены типичные параметры областей биполярных транзисторов (названия электродов относятся к п-р-п транзистору)

Таблица 2

Область	$N, \text{ см}^{-3}$	$\rho_v, \text{ Ом} \cdot \text{ см}$	$\rho_s, \text{ Ом}/\square\square$
Подложка р-типа	$1,5 \cdot 10^{15}$	10	–
Скрытый n^+ -слой	–	–	15–50
Коллекторный эпитаксиальный п-слой	10^{16}	0,15–5,0	–
Базовый р-слой	$5 \cdot 10^{18}$	–	100–300
Эмиттерный n^+ -слой	10^{21}	–	2–15
Изолирующая p^+ -область	–	–	6–10
Пленка Al	–	$2,7 \cdot 10^{-6}$	0,06–0,1

Обозначения в таблице: N – концентрация легирующей примеси, ρ_V – удельное объемное сопротивление, ρ_S – удельное поверхностное сопротивление.

Величину поверхностного сопротивления принято использовать для описания проводников малой толщины, непосредственное измерение которой невозможно или технически не оправдано. Поверхностное и объемное сопротивление связаны следующим образом. Для проводника длиной l и сечением $b \times h$ сопротивление:

$$R = \rho_V \frac{l}{bh} = \rho_S \frac{l}{b}$$

Таким образом, сопротивление связано не с размерами проводника, а с их отношением $K_\phi = \frac{l}{b}$, называемым коэффициентом формы. Величина ρ_S равна сопротивлению квадратного проводника, поэтому измеряется в Ом/□ (Ом на квадрат). Неверно считать, что толщина проводника $h = \frac{\rho_V}{\rho_S}$, т.к. известные значения ρ_V измерены для объемных образцов, а для тонких объектов выше и зависят от толщины.

2.4. Конструкция интегральных МОП-транзисторов и КМОП-структур

Структура МОП-транзистора включает участок низколегированной (10^{13} – 10^{15} см⁻³) подложки под формирование канала, высоколегированные (10^{20} – 10^{21} см⁻³) области стока и истока, тонкий слой подзатворного диэлектрика.

Базовая структура МОП-транзисторов с индуцированным (а, б) и встроенным (в, г) каналом показана на рис. 3.

Подложка и сток/исток имеют противоположные типы проводимости. Подложка обеспечивает высокое напряжение пробоя и малые токи утечки, а также низкие паразитные емкости, что снижает время переключения. Подзатворный диэлектрик обеспечивает изоляцию канала от затвора и усиливает электрическое поле затвора. Часто используется SiO₂ из-за хорошей технологичности, однако лучших параметров позволяют добиться диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (для SiO₂ $\epsilon = 3,9$), такие как Si₃N₄ ($\epsilon = 6,3$ – $7,1$), ZrO₂ ($\epsilon = 25$). Как и в биполярных транзисторах, используется разводка из Al и изолирующий слой SiO₂. Изоляция в объеме кристалла обеспечивается обратносмещенным р-п переходом между подложкой и истоком, стоком, каналом. Для этого расположенный на тыльной стороне пластины электрод подложки подключается к низшему (для п-канальных транзисторов) или высшему (для р-канальных) потенциалу в схеме. Обычно в ИМС используются транзисторы с индуцированным каналом, т.к. они не требуют отдельной операции легирования канала на малую глубину. Однако, некоторые случаи требуют применения транзисторов со встроенным каналом, например, п-канальная МОП-логика.

Конструкция МОП-транзисторов проще и технологичнее и компактнее, чем биполярных, не требует эпитаксиального слоя и места под изолирующие области. ИМС на МОП-транзисторах получили широкое распространение в 1980-90-е гг, когда удалось добиться снижения пороговых напряжений с 10–15 до 2–3 В.

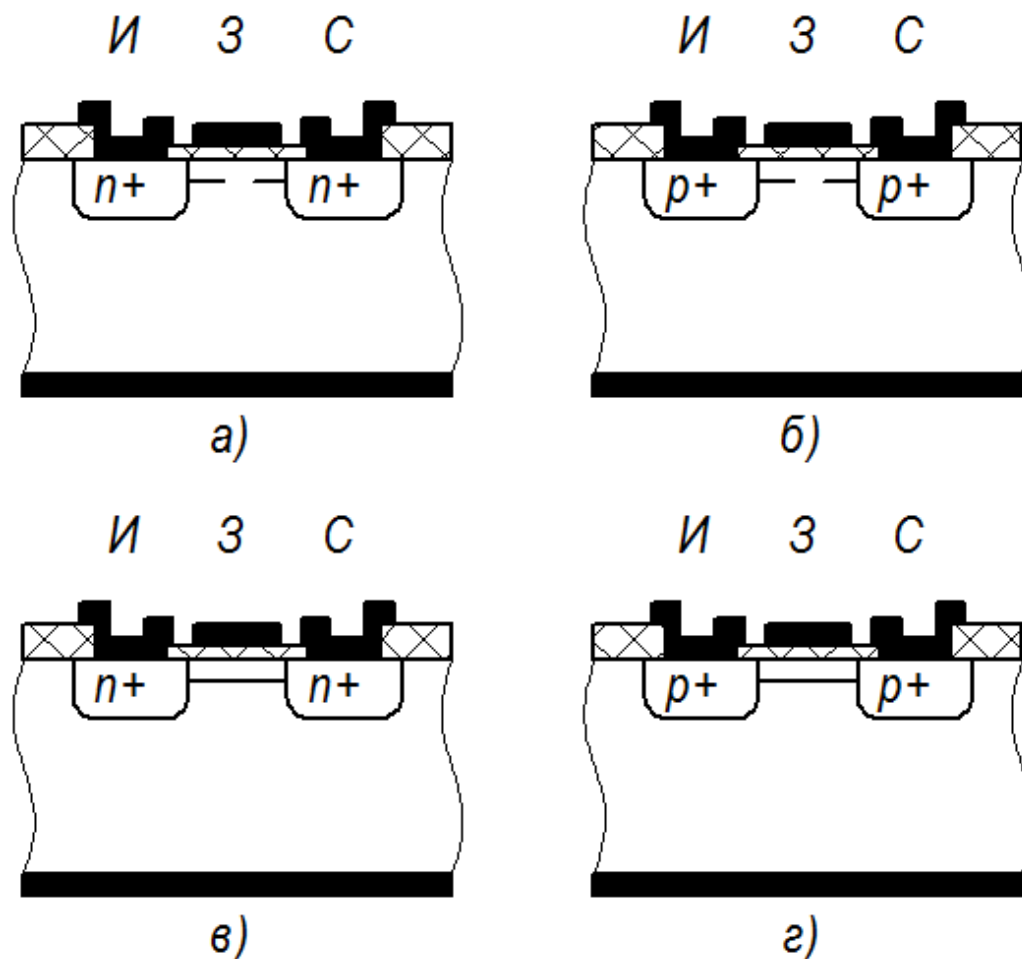


Рис. 3. Структура МОП-транзисторов

Электрические параметры МОП-транзисторов определяются их конструкцией и материалами. Основные параметры – пороговое напряжение U_0 , крутизна стоко-затворной характеристики S и частотные свойства.

Ток стока на крутом участке характеристики ($U_{cu} \leq U_{cu}^{nac}$):

$$I_c = \frac{\mu C_{з0} b_k}{2l_k} [2U_{cu}(U_{zu} - U_{cu}) - U_{cu}^2],$$

на пологом участке ($U_{cu} > U_{cu}^{nac}$):

$$I_c = \frac{\mu C_{з0} b_k}{2l_k} (U_{zu} - U_0)^2,$$

где U_{cu} , U_{zu} – напряжение сток–исток, затвор–исток,

$U_{cu}^{nac} = U_{zu} - U_0$ – напряжение насыщения,

l_k , b_k – длина и ширина канала,

μ – подвижность носителей заряда.

Через C_{30} обозначена удельная емкость затвора относительно канала:

$$C_{30} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\delta}{h_\delta},$$

где ε_δ , h_δ – диэлектрическая проницаемость и толщина подзатворного диэлектрика.

Усилительные свойства транзистора характеризуются крутизной характеристики вблизи U_{cu}^{nac} :

$$S = \left. \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} \right|_{U_{cu}=U_{cu}^{nac}} = \frac{\mu C_{30} b_\kappa}{2l_\kappa} U_{cu}^{nac} = \frac{\mu \varepsilon_0 \varepsilon_\delta b_\kappa}{2h_\delta l_\kappa}.$$

Отсюда видно, что улучшению усилительных свойств способствует конструкция с коротким и широким каналом (ограничено возможностями технологии), использование тонкого подзатворного диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью (ограничено пробоем и туннелированием носителем заряда).

Пороговое напряжение для р-канального транзистора:

$$U_0 = - \left(|\varphi_{МП}| + \frac{eN_{ss}}{C_{30}} + \frac{Q_n}{C_{30}} + 2\varphi_\Phi \right),$$

для п-канального:

$$U_0 = -\varphi_{МП} - \frac{eN_{ss}}{C_{30}} + \frac{Q_n}{C_{30}} + 2\varphi_\Phi,$$

где $\varphi_{МП}$ – контактная разность потенциалов между материалами канала и затвора,

N_{ss} – плотность поверхностных состояний на границе полупроводника и диэлектрика,

$Q_n = \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_n e N_n \varphi_\Phi}$ – плотность объемного заряда в подложке,

где ε_n , N_n – диэлектрическая проницаемость подложки и концентрация примеси в ней,

$$\varphi_\Phi = \varphi_T \ln \left(\frac{N_n}{n_i} \right),$$

где n_i – концентрация собственных носителей заряда в полупроводнике,

φ_T – температурный потенциал (26 мэВ при 300 К).

Видно, что пороговое напряжение п-канального транзистора ниже, чем у р-канального (в абсолютных величинах). Это достигается за счет меньшего вклада $|\varphi_{МП}|$ (у п-полупроводника выше уровень Ферми), и отрицательного вклада заряда поверхностных состояний. Снижение порогового напряжения тогда возможно за счет таких мер, как:

- использование поликремниевого затвора вместо Al ($\varphi_{МП} \rightarrow 0$),

- подбор диэлектрика для повышения числа поверхностных состояний,
- низкое легирование подложки для уменьшения объемного заряда.

Частотные свойства зависят от постоянных времени RC-цепей, в которые входят сопротивление канала и емкости, образуемые вокруг подзатворного диэлектрика и p-n переходов между токопроводящими частями и подложкой. Чтобы снизить емкости и объемный заряд, можно убрать p-n переход, выполнив подложку диэлектрической. На рис. 4 показаны варианты реализации структуры «кремний на диэлектрике» (КНД) на основе подложки из окисленного Si (см. рис. 4а, КНК), и сапфировой подложки с транзисторами в эпитаксиальном слое (см. рис. 4б, КНС).

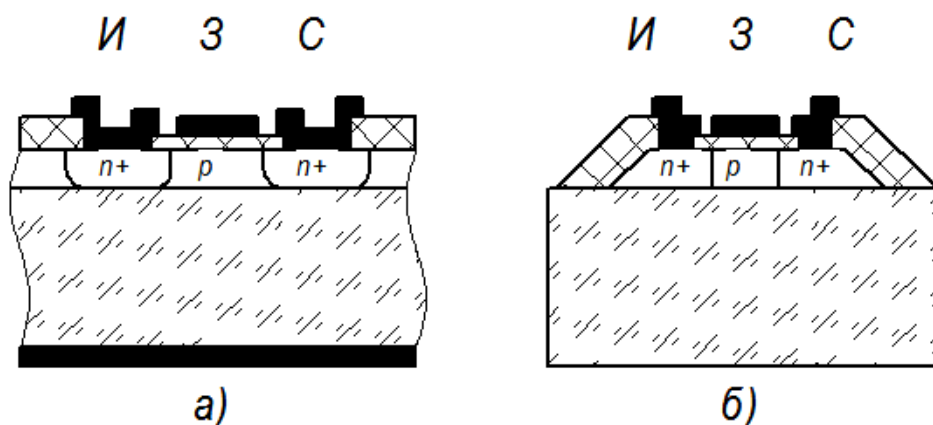


Рис. 4. Структуры КНД

Структура КНС обладает лучшими параметрами, но требует значительной перестройки технологии производства ИМС по сравнению с обычными МОП-транзисторами. Диэлектрическая подложка для КНК может быть получена за счет сращивания пластин окисленными сторонами, что требует только дополнительных операций в технологии.

Таким образом, конструктивные параметры МОП-транзисторов противоречиво влияют на усилительные и частотные свойства. Например, для повышения крутизны и снижения порогового напряжения хорошо иметь высокую C_{30} , а для улучшения частотных свойств – низкую. Конструкция транзисторов должна выбираться для конкретного проекта исходя из ценности их конкретных свойств для реализации электрических схем.

Комплементарные МОП-структуры (КМОП-структуры) представляют собой пару из p-канального и n-канального МОП транзисторов. Чтобы разместить их на одной подложке, для одного из транзисторов выполняется «карман», легируемый с примесью типом проводимости, противоположным подложке. Концентрация примеси в «кармане» выше, чем в подложке. Это повышает емкость p-n переходов и ухудшает быстродействие соответствующего транзистора. В то же время, при равных конструктивных и технологических параметрах, быстродействие n-канального транзистора выше в силу большей подвижности электронов по сравнению с дырками (см. табл. 1). Поэтому выбор типа легирования для подложки и кармана неоднозначен. Первыми были разработаны КМОП-структуры с p-карманом (рис. 5).

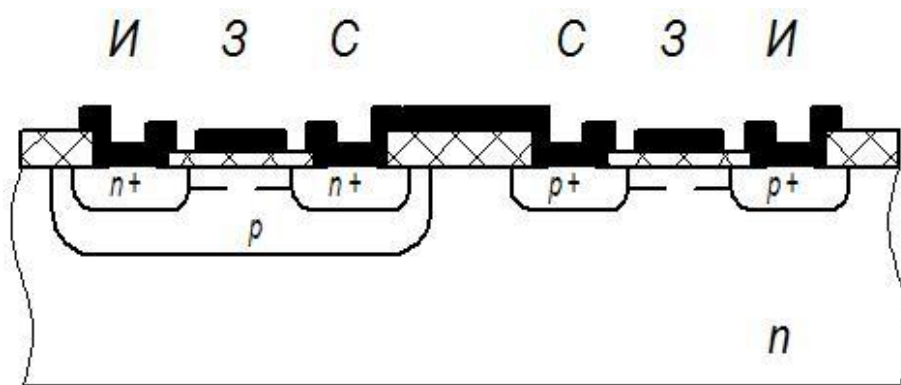


Рис. 5. КМОП-структура с карманом p-типа

КМОП-структуры являются основой логических элементов для современных цифровых ИМС.

2.5. Конструкция интегральных диодов и стабилитронов

Различают биполярные диоды и диоды Шоттки. Биполярные диоды выполняются из двух областей биполярного транзистора (Б – Э, Б – К) либо в виде транзистора, у которого один из p-n переходов замкнут разводкой (БК – Э, БЭ – К, Б – ЭК). Наиболее распространен вариант БК – Э (рис. 6 а).

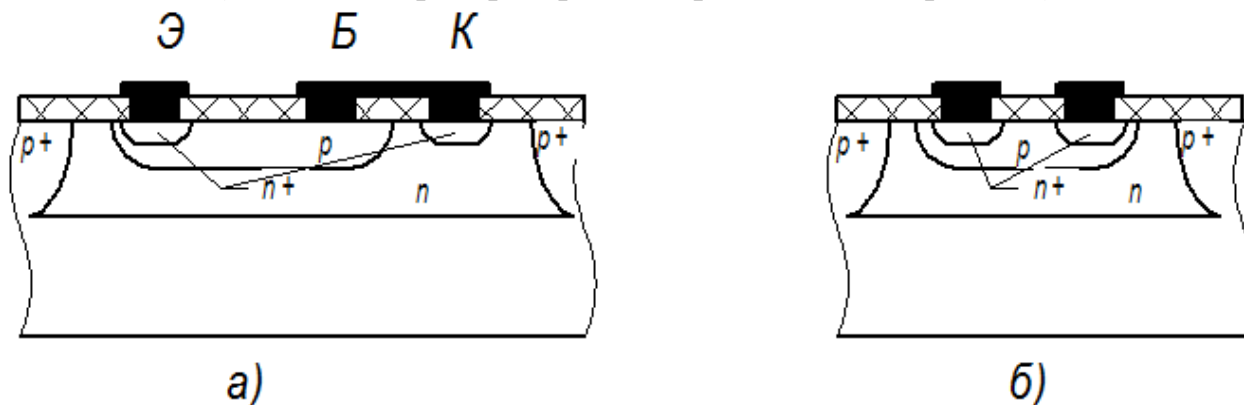


Рис. 6. а) диод БК – Э; б) симметричный термокомпенсированный стабилитрон

Функцию стабилитрона в принципе выполняет обратновключенный диод в режиме пробоя. Однако здесь критичен температурный дрейф падения напряжения на p-n переходе $+ (2-5) \text{ мВ/К}$. Для его компенсации формируют два противоположно включенных p-n перехода – один выполняет роль стабилитрона, а другой компенсирует температурный дрейф за счет своего дрейфа, примерно равного по величине и противоположного по знаку (рис. 6б).

Диод Шоттки образуется в месте контакта металла к эпитаксиальному p-слою. Второй (невыпрямляющий) контакт выполняется к n^+ -области (рис. 7а). Высота барьера определяется используемым металлом и концентрацией носителей в полупроводнике. Более высокая концентрация приводит к меньшей высоте барьера, что делает ВАХ диода более крутой. Однако малая высота барьера повышает вероятность туннелирования через него электронов, что нарушает функции диода. Как правило, используют концентрацию примеси не более 10^{17} см^{-3} .

В качестве металла в диодах Шоттки используются сплав Ni_xPt_{1-x} , дающий высоту барьера от 0,64 (100 % Ni) до 0,84 (100 % Pt) эВ, а также Ti (0,53 эВ) и W (0,59 эВ). Применение Al (высота барьера 0,7 эВ), используемого для разводки, затруднено низкой воспроизводимостью параметров контакта.

Барьер Шоттки может быть использован в интегральных транзисторах для шунтирования перехода коллектор – база в режиме насыщения. Такое решение помогает повысить быстродействие транзистора (рис. 7б).

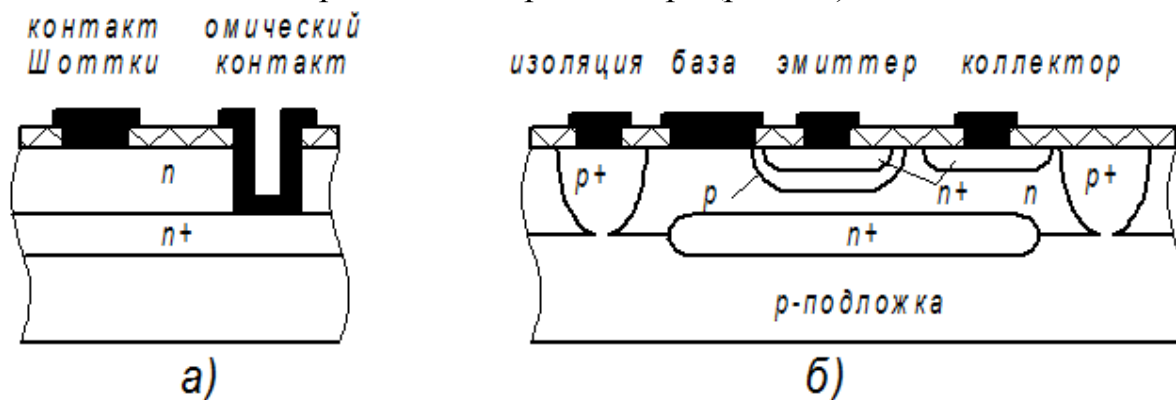


Рис. 7. а) диод Шоттки; б) биполярный транзистор с диодом Шоттки

2.6. Конструкции интегральных резисторов

Резисторы применяются в основном в ИМС на биполярных транзисторах в качестве нагрузки транзистора. Для ИМС на МОП-транзисторах характерны нагрузочные транзисторы, где используется сопротивление канала в открытом состоянии. Интегральные резисторы изготавливаются на основе области полупроводника, легированной до заданного сопротивления. Чтобы не выполнять дополнительных операций по изготовлению резисторов, используют подходящие области транзисторной структуры. Сопротивление интегральных резисторов определяется их топологией и поверхностным сопротивлением области. Конструктивно резистор включает активную область, определяющую коэффициент формы, и контактные площадки для проводников. Сопротивление контактных площадок не входит в сопротивление резистора, т.к. они шунтированы участками проводника. Коэффициент формы K_f может принимать значения $0,25-10^4$. Нижняя граница определяется сопротивлением контактных площадок, верхняя – предельно достижимым отношением длины (единицы мм, размер кристалла) и ширины. Резисторы выполняют в форме прямоугольников (рис. 8г,д), при больших K_f – меандра (рис. 8е). Углы меандра имеют сниженное сопротивление (на 15 % для одиночного угла, на 20% – для сдвоенного, см. рис. 8е).

Различают диффузионные, пинч- и ионно-легированные резисторы.

Диффузионные резисторы (рис. 8а) изготавливаются на основе базовой p -области или эмиттерной n^+ -области, обладают хорошей воспроизводимостью номиналов ($\delta R \sim 10-20\%$), но низким сопротивлением ($\rho_s \sim 100 \text{ Ом}/\square$). Отклонения сопротивлений на одном кристалле от номинала вследствие неточности технологии имеют один знак, соотношения сопротивлений

выполняются с лучшей точностью. Температурный коэффициент сопротивления $\text{TKC} = (0,1-3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

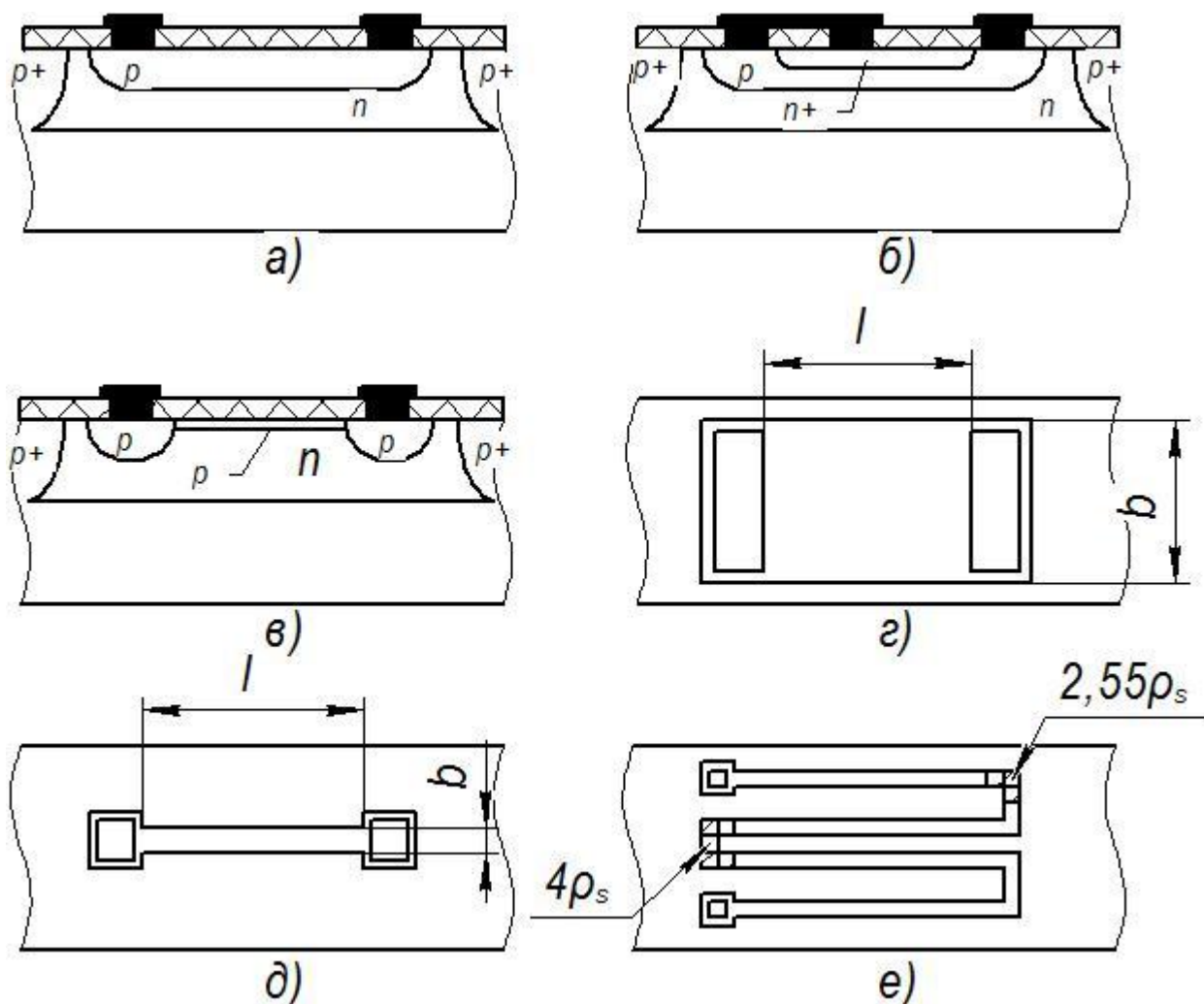


Рис. 8. Структура и топология интегральных резисторов

Пинч-резисторы (рис. 8б) изготавливаются на основе донной части базовой р-области, расположенной под эмиттерной областью, где концентрация дырок низка. Имеют $\rho_s = 2-5 \text{ кОм}/\square$, но низкую воспроизводимость номиналов (δR до 50 %) из-за плохой воспроизводимости толщины донной области. Сторона, где слои р и n^+ транзисторной структуры замкнуты накоротко, подключается к более высокому потенциалу, чтобы эмиттерный р-п переход был смещен в обратном направлении. Напряжения ограничены пробоем эмиттерного р-п перехода (7–8 В). ВАХ линейна при напряжениях до 1–1,5 В.

Ионно-легированные резисторы (рис. 8в) конструктивно аналогичны диффузионным, но могут иметь $\rho_s = 0,5-20 \text{ кОм}/\square$ за счет малой толщины. Обладают хорошей воспроизводимостью номиналов ($\delta R \sim 10-20 \%$), но требуют дополнительной операции ионного легирования. Есть смысл применять такие резисторы в ИМС, где есть МОП-транзисторы со встроенным каналом, совмещая операции легирования канала и резисторов.

2.7. Конструкции интегральных конденсаторов

Емкость плоского конденсатора определяется как

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где S – площадь перекрытия обкладок,

d – расстояние между обкладками,

ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Различают диффузионные и МДП-конденсаторы.

Диффузионный конденсатор (рис. 9а) использует в качестве диэлектрика область контакта р- и n^+ -областей, являющихся обкладками. Изготавливаются в едином техпроцессе с транзисторами. Недостаток – низкая емкость, т.к. перекрытие обкладок ограничено толщиной р- и n^+ -областей.

Емкость диффузионных конденсаторов зависит от напряжения, поскольку от него зависит толщина обедненных слоев. Примерный вид зависимости удельной емкости р-п перехода от напряжения:

$$c_{уд} \approx \frac{K}{U^m},$$

где K – коэффициент, зависящий от уровня легирования слоев,

$m = 1/3$ (линейный переход)– $1/2$ (ступенчатый переход), реальные переходы – внутри этого интервала.

МДП-конденсатор (рис. 9б) располагается на поверхности пластины, использует наносимый на поверхность диэлектрик, а в качестве обкладок – слой металлизации и n^+ -слой. Емкость может быть значительно выше, чем у диффузионных конденсаторов. МДП-конденсаторы можно изготовить в едином техпроцессе с МОП-транзисторами, используя для них тонкий подзатворный диэлектрик.

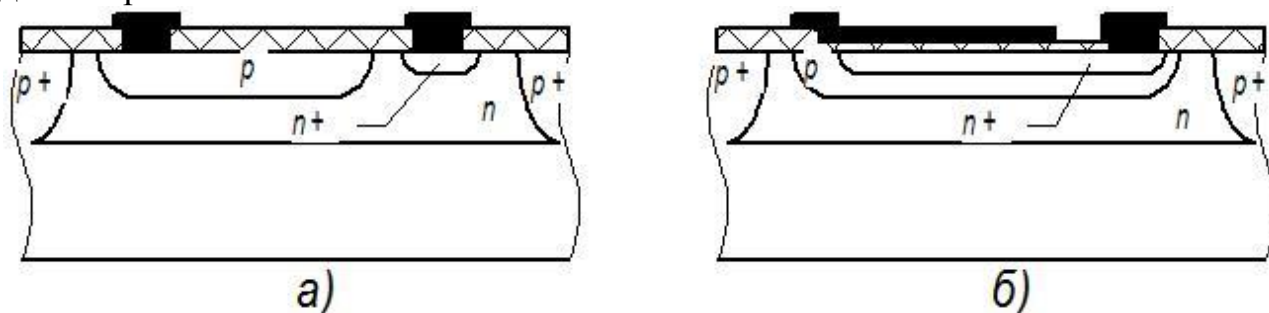


Рис. 9. Конструкции конденсаторов в полупроводниковых ИМС

Пути повышения емкости конденсаторов – использование диэлектриков с высокой проницаемостью и уменьшение толщины диэлектрика, ограниченное пробоем и туннелированием электронов через диэлектрик.

2.8. Проводники и контактные площадки

Проводники и контактные площадки в основном выполняются из Al, в один слой. Должны иметь хорошую проводимость, теплопроводность и хорошую адгезию к Si и материалам внешних выводов. Контакты Si и внешних выводов к материалу проводников должны быть невыпрямляющими. Направлениями развития являются повышение плотности упаковки элементов за счет создания многоуровневой разводки (слои разделены диэлектриком) и многослойных проводников, обладающих лучшими характеристиками за счет специализации слоев по функциям (контактный, адгезионный, проводящий и др.).

3. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИМС

3.1. Классификация гибридных ИМС. Подложки. Проводники

Конструкции и топологические решения подробно описаны в [1, 4]

В гибридных ИМС используются полупроводниковые активные элементы и пленочные пассивные элементы. Пленки делят на тонкие (толщиной < 1 мкм) и толстые (толщиной 1–100 мкм). В качестве конструктивной основы используются подложки из стекол, ситаллов, керамики. В пленочной технологии, как и в полупроводниковой, важно добиться хорошей адгезии пленок к подложке и соответствия друг другу физических свойств используемых материалов. Гибридные микросхемы обладают гораздо большими размерами элементов, чем полупроводниковые – как правило, > 100 мкм, однако, применение специальных материалов дает более высокие электрические параметры, точность и стабильность пассивных элементов.

Подложки выполняют функции электрической изоляции элементов, теплоотвода, являются физическим носителем ИМС.

Требования к подложкам заключаются в выполнении их функций (низкая электропроводность, высокая электрическая прочность, высокая теплопроводность) и возможности нанесения на них пленок. Последнее выражается в удачном сочетании физико-механических свойств подложки и пленки (хорошая адгезия, близкие величины температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), малая шероховатость) и устойчивости к воздействиям при изготовлении ИМС (термическим, химическим). В зависимости от конкретных требований, в качестве подложек применяются следующие материалы (в порядке улучшения теплопроводности и механической прочности, ухудшения диэлектрических свойств): боросиликатные стекла, ситаллы, поликор, бериллиевая керамика, Al + слой диэлектрика, эмалированная сталь.

Проводники и контактные площадки аналогичны проводникам и контактными площадкам полупроводниковых ИМС. В сочетании с материалами подложек типична двухслойная конструкция: адгезионный подслоя (Cr, Ni–Cr, Ti, 50–100 нм) и проводящий слой (Au, Cu, Al, 300–500 нм).

3.2. Конструкция тонкопленочных резисторов

Тонкопленочные резисторы изготавливаются из пленок резистивных материалов, аналогично резисторам в полупроводниковых ИМС выполняются в виде полосок или меандров (рис. 10). Ограничения: возможности технологии, требования к точности, рассеиваемая мощность, приемлемые габариты.

Для полосковых резисторов (рис. 10а) $K_\phi = 0,1 - 100$.

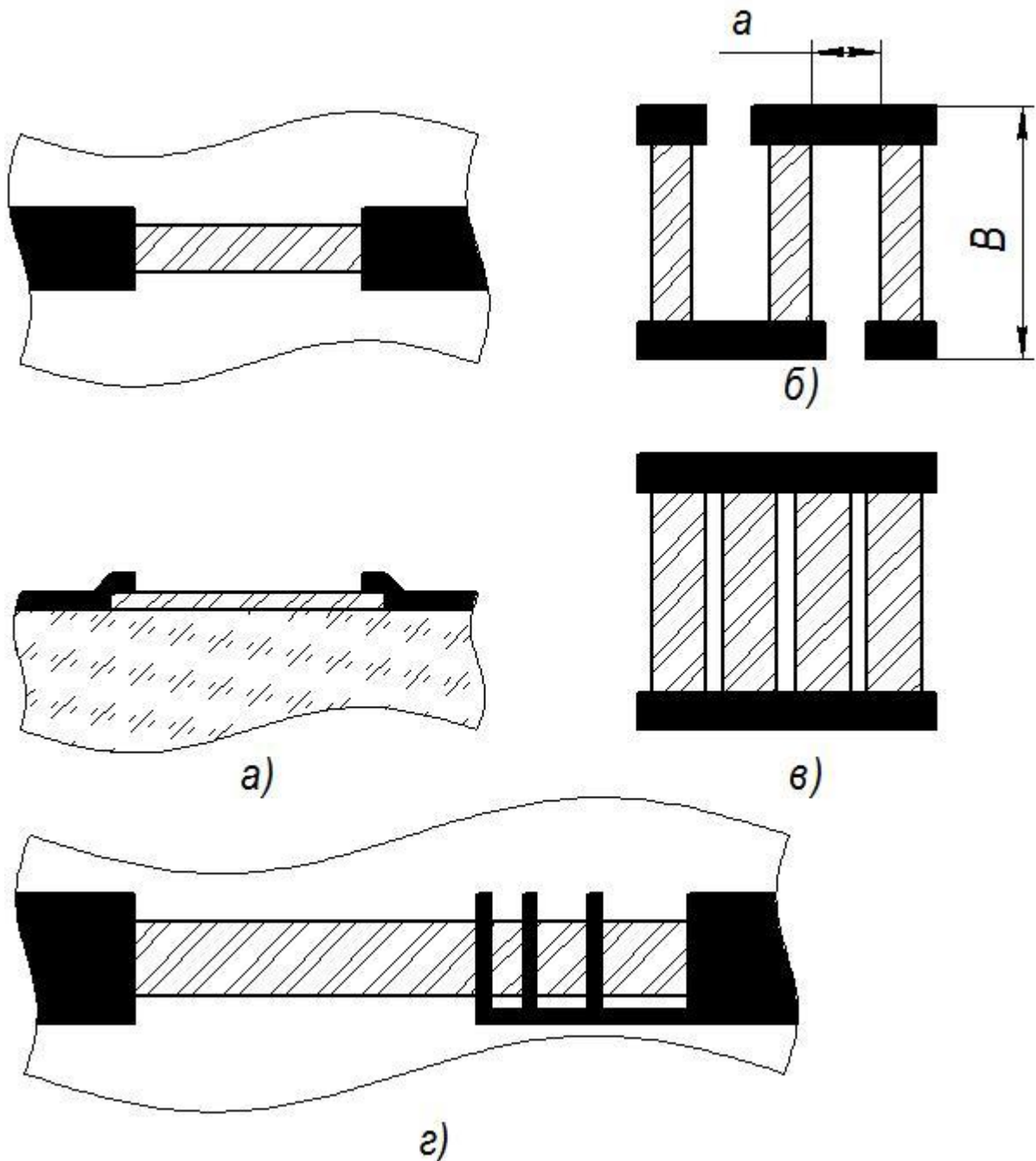


Рис. 10. Конструкция и топология пленочных резисторов

Для резисторов в форме меандра ограничениями являются минимальное расстояние между соседними звеньями a и максимальная длина B . По технологическим причинам отношение $\frac{B}{a} \leq 10$.

Для составных резисторов, разделенных на части проводящими перемычками (рис. 10б), технология изготовления проще, т.к. нужно изготавливать только прямоугольные элементы, что позволяет достигать $\frac{B}{a} \leq 50$.

Составные резисторы с параллельно включенными полосками (рис. 10в) используются в качестве мощных. Дают более равномерное распределение температуры по поверхности подложки, чем одна широкая полоска.

Могут иметь подгоночные секции, позволяющие достигать лучшей точности (5–10 %). Подгоночные секции подключаются за счет пережигания лазером или электронным лучом шунтирующих проводников (рис. 10г) или за счет подключения секций проволочными перемычками.

Материалы резисторов:

- металлы: хром, тантал;
- сплавы: РС-3001, РС-3710 (37,9 % Cr, 9,4 % Ni, 52,7 % Si); МЛТ-3М (43,6 % Si, 17,6 % Cr, 14,1 % Fe, 24,7 % W). $\rho_S = 0,05\text{--}50$ кОм/□;
- керметы – металл + диэлектрик, например (50–90 % Cr, 10–50 % SiO). $\rho_S = 0,1\text{--}10$ кОм/□, высокая стабильность, но худшая воспроизводимость по сравнению с металлическими сплавами.

3.3. Конструкция тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочные конденсаторы состоят из двух проводящих слоев, разделенных слоем диэлектрика, что аналогично МДП-конденсатору в полупроводниковых ИМС.

Требования к конденсаторам – минимальные габаритные размеры, воспроизводимость характеристик при производстве, совместимость технологии изготовления с технологией изготовления других элементов.

Конструкция конденсатора зависит от требуемой площади перекрытия обкладок S и емкости C . Конструкция, показанная на рис. 11а применяется при $S < 5$ мм², на рис. 11б – при $S = 1\text{--}5$ мм², рис. 11в – при $S < 1$ мм². Для конденсаторов малой емкости (десятки пФ) используется гребенчатая конструкция (рис. 11г), где в качестве диэлектрика используется подложка.

Основным элементом является диэлектрик, обкладки подбираются исходя из совместимости с ним, в основном применяются Al и Au.

Диэлектрики:

- оксиды: SiO, GeO, Al₂O₃, Ta₂O₅, TiO₂;
- титанаты: BaTiO₃, CaTiO₃;
- сложные стекла: (I₂O₃, B₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, CaO), (BaO, Ta₂O₅, Bi₂O₃, I₂O₃, GeO₂).

Типичная толщина диэлектрика 100–300 нм, удельная емкость 50–500 пФ/мм².

Могут иметь подгоночные секции, позволяющие достигать лучшей точности (< 5 %, рис. 11д, е).

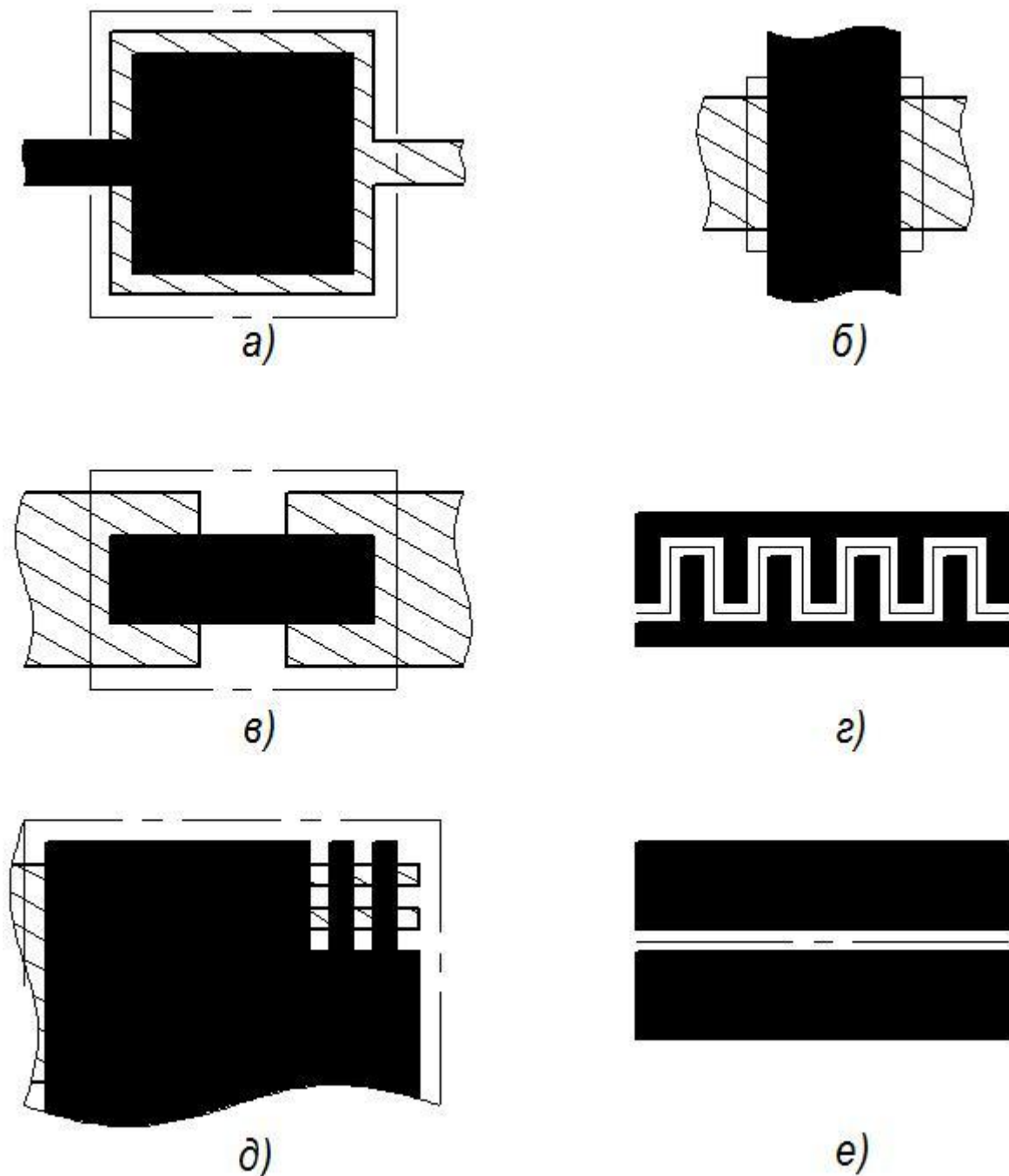


Рис. 11. Конструкция и топология пленочных конденсаторов

4. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИМС

4.1. Планарно-эпитаксиальная технология изготовления ИМС на биполярных транзисторах

Изготовление области, легированной до заданной концентрации включает 3 основных процесса:

- окисление поверхности Si для защиты не легируемой части;
- фотолитография со вскрытием окон в SiO₂ под легирование;

- легирование диффузией примеси или ионной имплантацией.

Формирование пленок на поверхности включает нанесение сплошной пленки и фотолитографию для формирования рисунка.

Кроме того, техпроцессы могут включать эпитаксиальное наращивание слоя, подготовительные и завершающие операции.

Заготовкой для ИМС служит пластина, легированная акцепторной примесью. Области изготавливаются в порядке уменьшения глубины (см. конструкцию n-p-n транзистора).

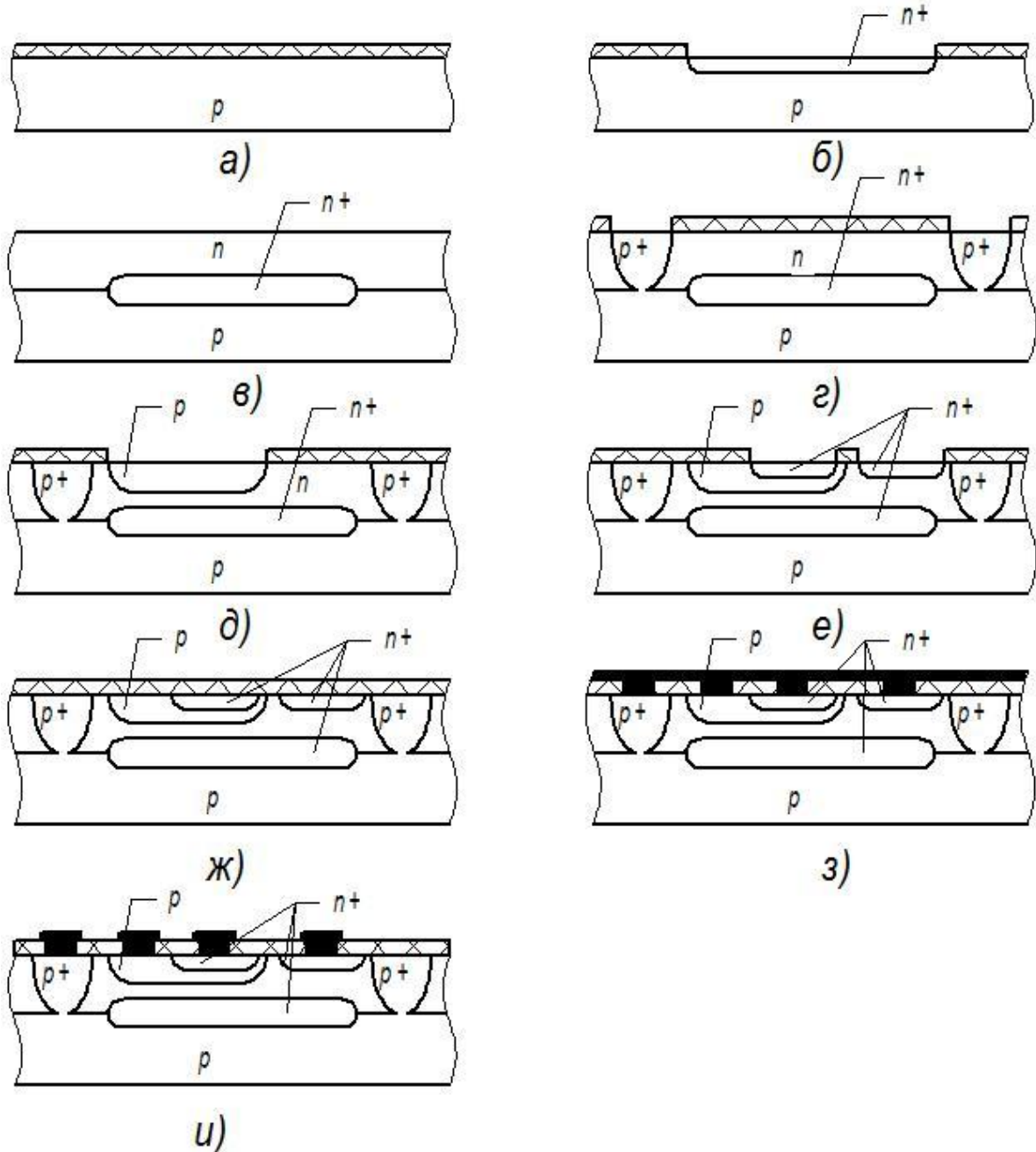


Рис. 12. Изготовление ИМС на биполярных транзисторах

Последовательность операций:

1. Подготовительные операции (очистка, шлифовка, полировка поверхности, стравливание слоя с нарушенной структурой). Для успешного

нанесения пленок высота микронеровностей должна быть, по крайней мере, в несколько раз меньше толщины пленки. На практике это 5–25 нм.

2. Окисление поверхности пластины (рис. 12а)

3. Фотолитография SiO_2 , легирование Si для изготовления скрытого n^+ -слоя (рис. 12б). В качестве примеси используются As или Sb, обладающие меньшими коэффициентами диффузии в Si, чем P, используемый при последующих операциях. Это предотвращает «размывание» границ уже сформированной области.

4. Травление SiO_2 , эпитаксиальное наращивание и легирование коллекторного слоя (рис. 12в)

5. Окисление поверхности пластины, фотолитография SiO_2 , легирование Si для изготовления изолирующих p-областей (рис. 12г). Легирующая примесь – В. Легирование проводится в две стадии: сначала формируется высоколегированный приповерхностный слой, а затем происходит его «разгонка» в глубину пластины за счет диффузии при высокой температуре.

6. Изготовление контактных эмиттерных/коллекторных n^+ -областей, нижних обкладок МДП-конденсаторов (рис. 12е). Используется фотолитография SiO_2 , легирование путем диффузии P или ионной имплантации.

7. Окисление поверхности (рис. 12ж).

8. Фотолитография SiO_2 под контакты к областям полупроводниковых приборов, нанесение сплошной пленки Al, отжиг для создания контакта Al к Si (рис. 12з).

9. Фотолитография Al для изготовления разводки, контактных площадок, верхних обкладок МДП-конденсаторов (рис. 12и).

10. Нанесение защитной диэлектрической пленки, фотолитография под контакты к выводам ИМС.

11. Завершающие операции: установка в корпус, герметизация, контроль, маркировка, упаковка.

4.2. Технология изготовления ИМС на МОП-транзисторах и КМОП-структурах

Также, как и технология ИМС на биполярных транзисторах, базируется на процессах окисления Si, фотолитографии SiO_2 и легировании подложки через окна. Технологический процесс короче, чем для ИМС на биполярных транзисторах, и не требует его наименее стабильной операции – эпитаксиального наращивания. Исходный материал – пластина (подложка), легированная примесью с низкой концентрацией. Последовательность операций для ИМС на n-канальных МОП-транзисторах с индуцированным каналом:

1. Подготовительные операции (очистка, шлифовка, полировка поверхности, стравливание слоя с нарушенной структурой).

2. Окисление поверхности Si (рис. 13а)

3. Фотолитография и легирование n^+ -областей стока и истока, нижних обкладок МДП-конденсаторов (рис. 13б).

4. Окисление поверхности (рис. 13в), фотолитография под тонкий подзатворный диэлектрик (рис. 13г).

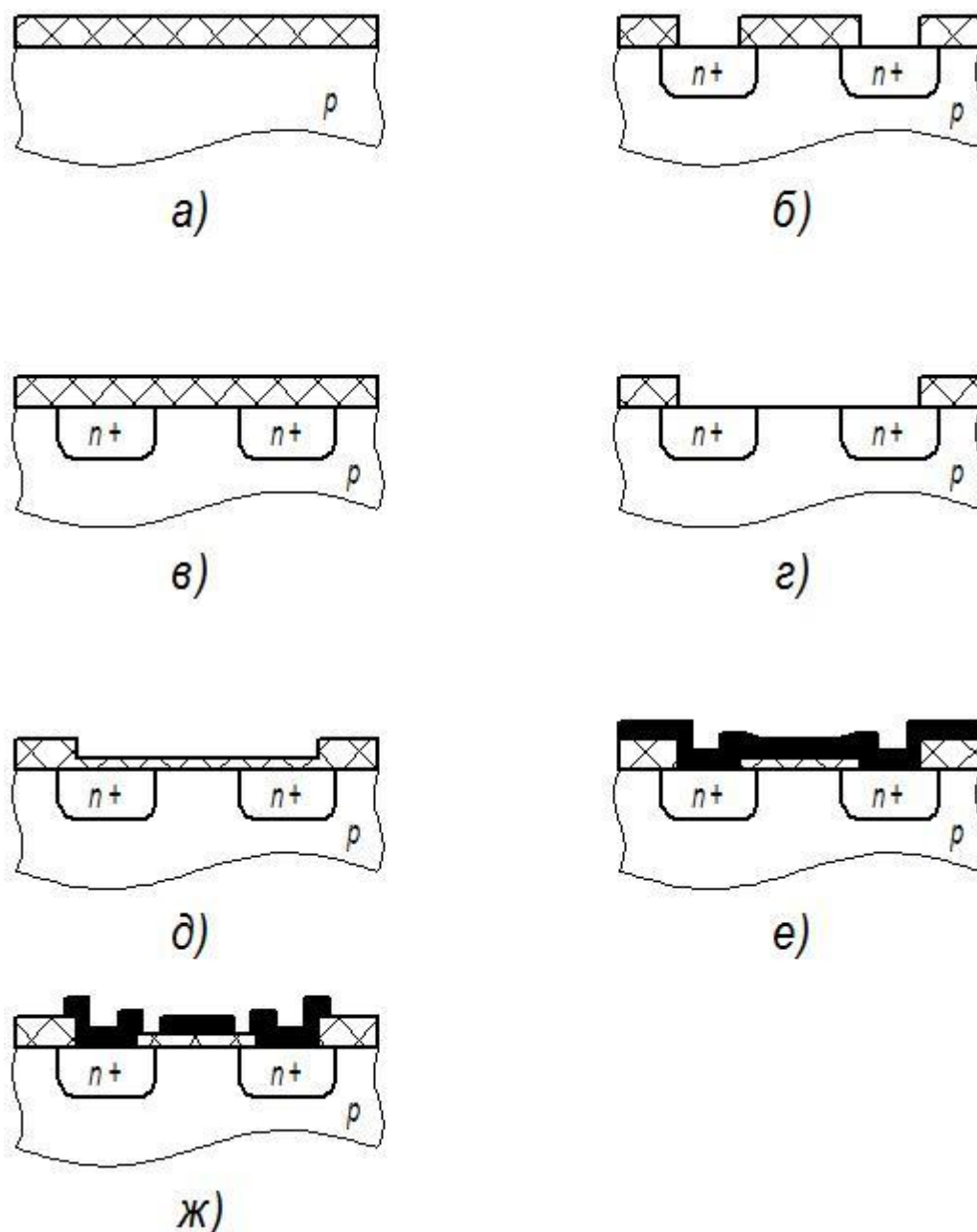


Рис. 13. Изготовление ИМС на n -канальных МОП-транзисторах

5. Выращивание тонкого подзатворного диэлектрика(рис. 13д). Это наиболее сложная и ответственная операция, требующая тщательного контроля. Производится в специально очищенном сухом O_2 при температуре $1100-1200^\circ C$. Принимаются меры для предотвращения кристаллизации диэлектрика, возникновения механических напряжений. Это позволяет стабилизировать границу $p-Si-SiO_2$.

6. Изготовление разводки, контактных площадок, верхних обкладок МДП-конденсаторов из пленки Al на поверхности SiO₂ (рис 13е, ж). Процесс аналогичен проводимому в технологии ИМС на биполярных транзисторах.

7. Изготовление электрода подложки с обратной стороны пластины аналогично операции 6.

8. Нанесение защитной диэлектрической пленки, фотолитография под контакты к выводам ИМС.

9. Завершающие операции: установка в корпус, герметизация, контроль, маркировка, упаковка.

Для ИМС на р-канальных МОП-транзисторах технология отличается типом примесей.

Главный фактор упрощения и укорачивания техпроцесса – конструкция МОП-транзистора, предполагающая единственный тип областей Si, отличающихся типом или величиной концентрации примеси от подложки.

Для КМОП-ИМС таких областей 3 – истоки/стоки комлементарных транзисторов и карман», выполняющий роль подложки для одного из транзисторов. Соответственно, технологию изготовления можно построить, взяв за основу технологию МОП-транзисторов и дополнив ее еще двумя циклами окисления, фотолитографии и легирования.

4.3. Технология изготовления гибридных ИМС

Заключается в последовательном нанесении слоев на подложку и формировании элементов масочным методом, фотолитографией или двойной фотолитографией.

При масочном методе пленки наносятся через маску (трафарет). Масочный метод прост, но обладает большими погрешностями – дает разброс номиналов пленочных элементов 5–15 %. Точность ограничена затенением подложки маской и подпылом при неплотном прилегании. Эти явления определяются толщиной маски, необходимой для обеспечения ее механической прочности (~200–300 мкм).

Процесс фотолитографии описан в разделе 6. Фотолитография выполняется на сплошной пленке, нанесенной на всю поверхность подложки. Затенение определяется толщиной фоторезиста (< 1 мкм). В результате достигается разброс номиналов 1–5 %. При двойной фотолитографии наносятся подряд два сплошных слоя пленки, которые затем подвергаются двум последовательным процессам фотолитографии. Это повышает производительность, т.к. значительное время занимает подготовка к работе оборудования для нанесения пленок.

Последовательность нанесения слоев комбинированным методом масок и двойной фотолитографии (рис. 14):

1. Нанесение сплошных резистивной (нижний слой) и проводящей (верхний слой) пленок (рис. 14а).

2. Фотолитография и селективное травление проводящего слоя (рис. 14б).
3. Фотолитография резистивного слоя (рис. 14в).
4. Последовательное напыление через маску нижних обкладок, диэлектрика и верхних обкладок конденсаторов (рис. 14г).
5. Нанесение защитного слоя (рис. 14д)
6. Монтаж навесных компонентов (рис. 14е).

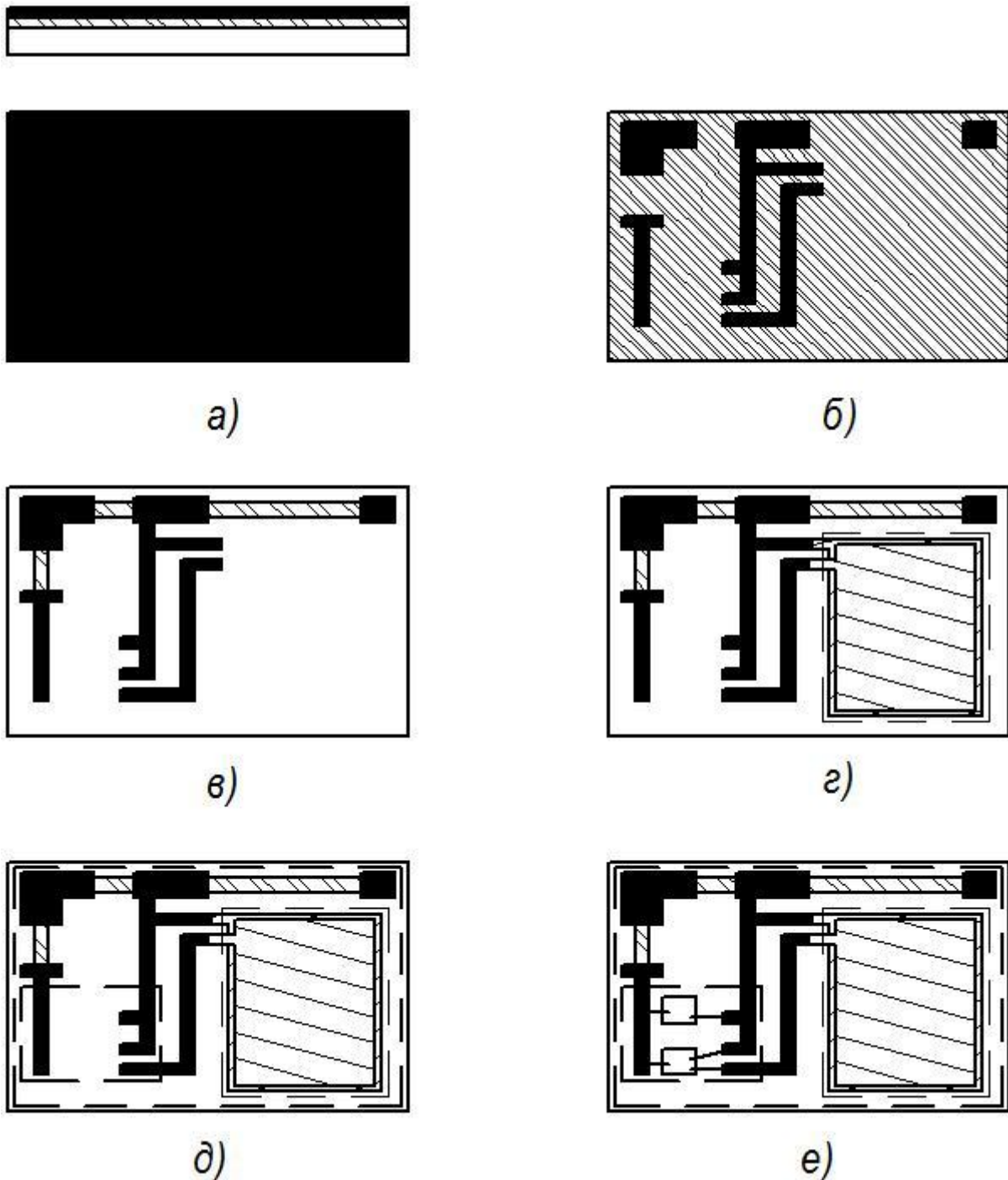


Рис. 14. Изготовление ГИМС комбинированным методом

Следует отметить, что результат двойной фотолитографии несколько отличается от конструкций резисторов и проводников, показанной на рис. 10.

Резистивный материал нанесен на подложку не только в местах, где расположены резисторы, но и под всеми проводниками. Это позволяет не выделять места на подложке под контактные площадки, повысив тем самым плотность упаковки элементов. Резистивная пленка под проводниками при этом не создает сопротивления, поскольку шунтирована проводящей, а также может выполнять роль адгезионного подслоя (например, Cr, см. раздел 3).

Технологии изготовления полупроводниковых ИМС описаны в [1, 3], гибридных ИМС – в [1, 4].

5. ЛЕГИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКА

5.1. Точечные дефекты в полупроводниках. Растворимость примесей

Возникают при легировании кристалла полупроводника примесью. Виды дефектов: атомы замещения, междоузельные атомы, вакансии, ассоциаты. Для электроники наибольшее значение имеют атомы замещения. Точечные дефекты изменяют электронную структуру, а, следовательно, и физические свойства полупроводника. Дефект создает одно или несколько локализованных состояний в запрещенной зоне. Влияние этих состояний определяется их энергией. Мелкие уровни определяют электропроводность, т.к. переходы электронов могут осуществляться за счет теплового движения. При высокой концентрации примесные уровни расщепляются в зоны, подобно тому как образуются зоны в самом кристалле полупроводника. Примесные зоны могут пересечься с разрешенными зонами самого полупроводника (для Si при $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Глубокие уровни определяют оптические и люминесцентные свойства: кванты света излучаются при переходе с дефектного уровня и при рекомбинации электронов и дырок на нем, что позволяет создавать полупроводниковые оптоэлектронные приборы.

Равновесная концентрация носителей заряда и растворимость примесей может быть определена методом *квазихимического описания*: процессы генерации и рекомбинации носителей заряда и растворения примесей рассматриваются как обратимые химические реакции, для которых определяются условия равновесия. Метод подробно описан в [9].

В примесном полупроводнике такими процессами являются генерация собственных электронно-дырочных пар и ионизация примесей. Рассмотрим эти процессы и их константы равновесия, а также их связи между собой – закон сохранения вещества и условие электронейтральности полупроводника в целом (табл. 3).

Эти соотношения позволяют установить взаимную зависимость растворимости примесей:

$$[D^+] = \frac{K_D(T)[D]}{n},$$

тогда

Таблица 3

Процесс	Константа равновесия	Связи
$0 \leftrightarrow e^- + e^+$	$K_i(T) = np = n_i^2$	$n + [A^-] = p + [D^+]$
$D \leftrightarrow D^+ + e^-$	$K_D(T) = \frac{[D^+]}{[D]} n$	$[D] + [D^+] = N_D$
$A \leftrightarrow A^- + e^+$	$K_A(T) = \frac{[A^-]}{[A]} p$	$[A] + [A^-] = N_A$

Обозначения в таблице: e^- – свободный электрон, e^+ – дырка, n – концентрация свободных электронов, p – концентрация дырок, n_i – концентрация собственных электронов и дырок, N_D – концентрация введенной донорной примеси, $[D]$ и $[D^+]$ – концентрация нейтральных и ионизованных доноров, N_A – концентрация введенной акцепторной примеси, $[A]$ и $[A^-]$ – концентрация нейтральных и ионизованных акцепторов.

$$N_D = [D] \left(1 + \frac{K_D(T)}{n} \right),$$

аналогично

$$N_A = [A] \left(1 + \frac{K_A(T)}{p} \right).$$

Величины $[D]$ и $[A]$ определяются процессом растворения. Величины в скобках зависят от концентраций уже имеющихся в полупроводнике примесей. Дополнительная донорная примесь увеличивает n , следовательно уменьшает p и N_D . Акцепторная примесь увеличивает p , следовательно уменьшает n и N_A . Таким образом, примеси одного типа ухудшают растворимость друг друга, а разных – улучшают.

Сам процесс растворения (табл. 4) представляет собой переход из газовой фазы в твердую нейтрального атома или молекулы. описываемый законами Генри и Сивертса соответственно.

Таблица 4

Процесс	Константа равновесия	Закон
$D^e \leftrightarrow D$	$K_1(T) = \frac{[D]}{[D^e]}$	$[D] = s_D(T)p$
$D_2^e \leftrightarrow 2D$	$K_2(T) = \frac{[D]^2}{[D_2^e]}$	$[D] = s_D(T)p^{1/2}$

Обозначения в таблице: $[D^e]$, $[D_2^e]$ – концентрация примеси в газовой фазе.

$s_D(T) = \left(\frac{K_{1,2}(T)}{RT} \right)^m$ – коэффициент растворимости примеси в полупроводнике,

$p = [D^e]kT$ – парциальное давление примеси в газовой фазе, $m = 1$ или $1/2$.

Рассмотрим температурную зависимость растворимости.

1) Область низких температур

$$N_D \approx [D] = s_D(T)p^m.$$

2) Область средних и высоких температур:

$$N_D \approx [D^+] = \frac{K_D(T)[D]}{n} = \frac{K_D(T)s_D(T)p^m}{n}$$

С учетом условия электронейтральности $n = p + [D^+] = \frac{n_i^2}{n} + [D^+]$

и пренебрегая температурной зависимостью $s_D(T)$, получим:

$$N_D \approx [D^+] = \frac{K_D(T)[D]}{\sqrt{K_D(T)[D] + n_i^2}}.$$

При средних температурах вся примесь ионизована, а n_i невелико, т.е. $K_D(T)[D] \gg n_i^2$, тогда

$$N_D \approx \sqrt{K_D(T)[D]} = \sqrt{K_{D0}[D]} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right),$$

где $K_{D0} = const$, ΔE_D – высота энергетического барьера проводимости для примеси.

Полученная зависимость растет с ростом температуры.

При высокой температуре ионизовано много собственных носителей заряда, т.е., несмотря на ионизацию примеси, $K_D(T)[D] \ll n_i^2$.

Тогда

$$N_D \approx \frac{K_D(T)[D]}{n_i} = K_{D0} K_{i0}^{1/2} \exp\left(\frac{\frac{\Delta E_g}{2} - \Delta E_D}{kT}\right),$$

где ΔE_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, K_{i0} – константа генерации электронно-дырочных пар.

Поскольку $\frac{\Delta E_g}{2} > \Delta E_D$, коэффициент экспоненты положительный и растворимость при высоких температурах падает.

Вывод: температурная зависимость растворимости примеси имеет максимум при определенной температуре. Именно при такой температуре должно проводиться диффузионное легирование. Для типичных примесей в Si температура максимальной растворимости 900–1200 °С.

5.2. Диффузия примесей

Подробно описывается в [9].

Является основным методом легирования полупроводников. Даже легировании ионной имплантацией при последующем отжиге происходит разгонка примеси диффузией.

Математически диффузию в пластину полупроводника можно описать законом Фика:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2},$$

где x – глубина от поверхности пластины, t – время процесса, D – коэффициент диффузии, $c(x, t)$ – концентрация примеси.

Решение уравнения зависит от начальных и граничных условий. Начальное условие: $c(x, 0) = 0, x > 0$. Граничные условия образуют 3 модели.

1. Постоянный источник: за счет притока вещества извне на границе поддерживается постоянная концентрация c_s . Решением уравнения является комплементарная функция ошибок:

$$c(x,t) = c_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}.$$

2. Полуограниченный источник: в начале процесса на границе концентрация c_0 , с течением времени примесь переходит из источника в пластину; концентрация на границе со стороны источника c_{s1} и пластины c_{s2} при этом разная из-за разности коэффициентов диффузии примеси в источнике (D_1) и пластине (D_2). Решение уравнения:

$$c(x,t) = \frac{c_0}{K + R} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_2 t}},$$

где $K = \frac{c_{s1}}{c_{s2}}, R = \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}$.

3. Поверхностный источник с отражающей границей: в начале процесса в приповерхностном слое пластины $0 < x < d$ концентрация примеси c_0 , в процессе диффузии атомы примеси распределяются по глубине и не покидают пластину. Для практики интересен случай $x \gg d$, приводящий к решению в виде нормального распределения:

$$c(x,t) = \frac{c_0 d}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right).$$

В табл. 5 показаны методы легирования Si и их соответствие моделям диффузии.

В технологии ИМС области транзисторов легируются последовательно, поэтому создание р-п переходов и каждой следующей области внутри предыдущей требует легирования таким количеством примеси, чтобы нейтрализовать действие примеси из более глубокого слоя. Поскольку легирование неоднородно (см.решения уравнения), необходим подбор материалов с коэффициентами диффузии, обеспечивающими получение р-п переходов на заданной глубине и их сохранность при легировании последующих слоев.

Таблица 5

Источник примеси	Метод легирования	Модель диффузии
Парогазовая фаза	Испарение твердых или жидких источников в закрытой системе	Постоянный источник
	В проточной системе с потоком газа-носителя	
Поверхностный источник	Из напыленного металлического слоя	Постоянный источник
	Из эпитаксиального слоя в подложку	Полуограниченный источник
	Из поверхностных окислов (БСС, ФСС), с образованием SiO_2 и В/Р	
	Из тонкого ионно-имплантированного слоя	Поверхностный источник с отражающей границей

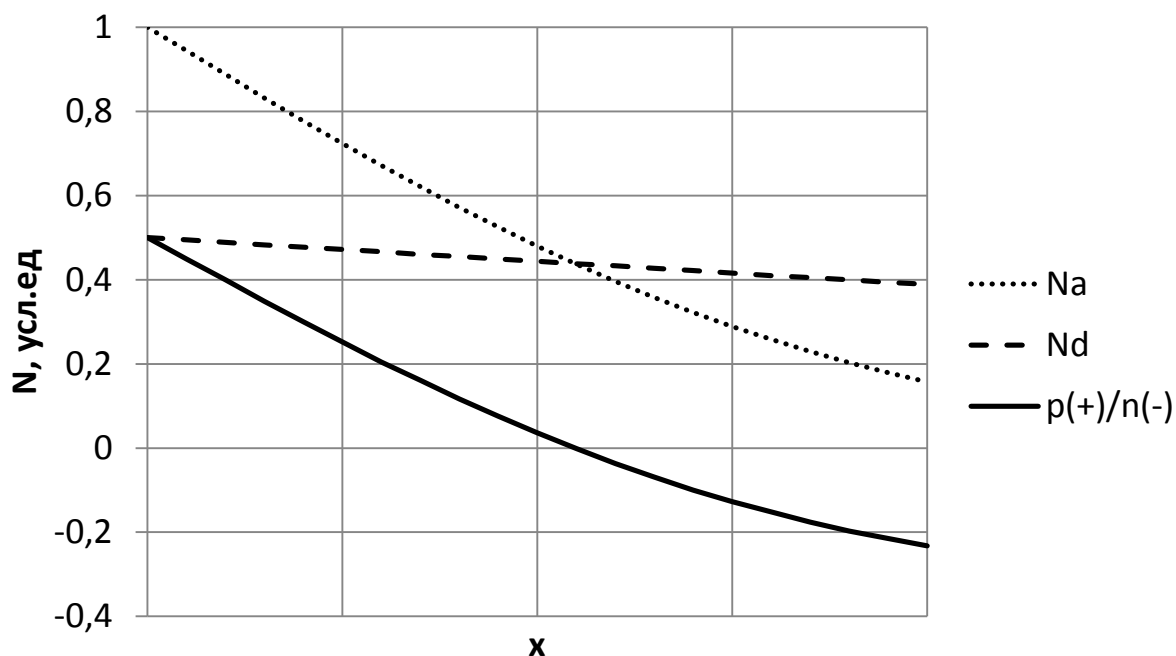


Рис. 15. Формирование p-n перехода при легировании примесями с различными коэффициентами диффузии

Диффузия примесей в полупроводник производится в закрытых и открытых нагреваемых кварцевых реакторах. Конструкция реакторов аналогична реакторам для термического окисления Si (см. раздел 6).

Принцип формирования p-n переходов показан на рис. 15.

5.3. Легирование ионной имплантацией

Имплантация заключается в бомбардировке поверхности мишени ионами с энергией 10^3 – 10^5 эВ, которые остаются в веществе мишени на определенной глубине. Торможение ионов происходит вследствие их взаимодействия с атомами вещества.

Столкновение в направлении, близком к направлению на ядро атома, из-за высокой кинетической энергии иона приводит к его выходу из кристаллической решетки, т.е. распылению или аморфизации приповерхностных слоев. Интерес представляет случай *каналирования* ионов. Когда ион входит в направлении, близком к одному из кристаллографических направлений в веществе мишени, для его входа имеются «каналы» между атомными рядами, т.е. его движение не направлено на ядро атома мишени на протяжении многих слоев. Глубина проникновения в этом случае определяется отталкиванием электронных оболочек иона и атомов мишени, сопровождающимся небольшими потерями энергии и небольшими изменениями направления движения. Считается, что каналирование происходит при углах входа ионов $\sim 1^\circ$ от кристаллографических направлений.

Глубина имплантации имеет существенный статистический разброс, но в отличие от глубины диффузии значительно более управляема, поскольку есть возможность управлять как энергией ионов, так и направлением их входа. Ионная имплантация позволяет создавать различное распределение концентрации примесей по глубине, тогда как при диффузии каждый следующий слой должен легироваться сильнее предыдущего. После имплантации требуется отжиг для восстановления аморфизованной поверхности. Отжиг сопровождается диффузией, что необходимо учитывать в конструкции и технологии производимых приборов.

Установка для ионной имплантации (рис. 16) включает в себя, источник ионов 1, ускоритель 2, магнитный сепаратор 3, ионные линзы 4, отклоняющие электроды 5, камеру с мишенью 6. Вся установка помещается в вакуумную камеру с давлением $\sim 10^{-4}$ Па, чтобы избежать рассеяния ионов на частицах атмосферы.

Поток ионов имеет неравномерное распределение по пятну облучения, поэтому для легирования необходим остросфокусированный пучок ионов, формируемый линзами. Для распределения ионов по поверхности используется сканирование пучком при помощи отклоняющих электродов. Глубина имплантации зависит в первую очередь от энергии и массы иона. Для выделения ионов с заданной энергией и массой служит магнитный сепаратор. В сепараторе ионы движутся в магнитном поле под действием силы Лоренца по круговой траектории через узкий канал. Пройти через канал и попасть далее в мишень могут только ионы, радиус траектории которых близок к радиусу канала. Радиус траектории зависит от массы и энергии иона:

$$r = \frac{Mv}{qB} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2MU}{q}},$$

где M – масса иона, q – его заряд, U – ускоряющее напряжение, B – индукция магнитного поля в сепараторе.

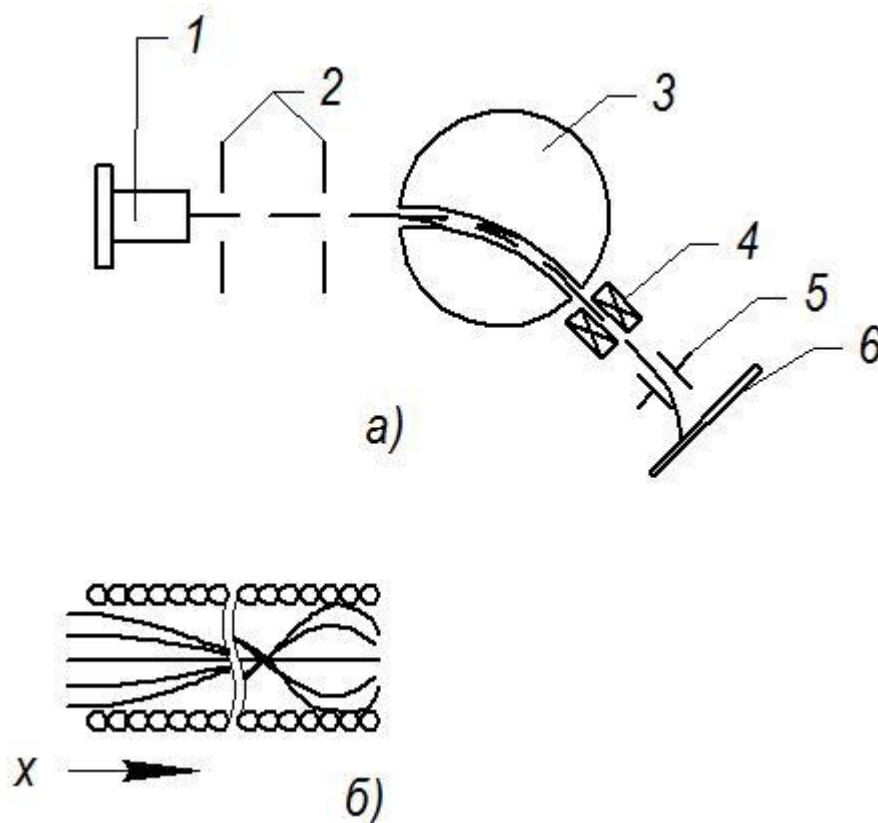


Рис. 16. а) схема установки ионного легирования; б) траектории ионов при каналировании

Распределение проекции пробега x на нормаль к поверхности и, следовательно, концентрации внедренных ионов N по глубине x считается нормальным:

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

где Q – полное количество примеси, вводимой на единицу поверхности мишени,

R_p – средняя проекция пробега иона на нормаль к поверхности

ΔR_p – параметр распределения.

Полное количество примеси $Q = \frac{jt}{q}$,

где j – плотность тока ионов, t – время облучения, q – заряд иона.

Параметр распределения зависит от масс иона M_1 и атома мишени M_2 :

$$\frac{\Delta R_p}{R_p} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}M_1M_2}}{M_1 + M_2}.$$

Для В в Si $\frac{\Delta R_p}{R_p} = 0,37$, для Р в Si $\frac{\Delta R_p}{R_p} = 0,41$.

Сама величина R_p сложным образом зависит от энергии, определяется ее потерями при рассеянии ионов на атомах мишени. Основная зависимость здесь – от угла рассеяния: чем больше угол, тем больше потери и меньше R_p . Отсюда можно заключить, что большая часть пути при каналировании приходится на несколько первых актов рассеяния, пока углы еще невелики ($\sim 1^\circ$), и может составлять порядка $10\text{--}10^3$ межатомных расстояний (т.е. 1–300 нм), в зависимости от энергии ионов.

6. ОПЕРАЦИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

6.1. Строение и свойства тонких пленок

Подробно рассматриваются в [7,8].

Под тонкой пленкой мы будем понимать объект со следующими особенностями:

- существует на подложке из другого материала, является единой и отдельной от подложки фазой
- толщина много меньше размеров в направлении поверхности подложки
- толщина сравнима или меньше характерных параметров физических процессов или структурных параметров строения пленки.

На практике можно условно считать, что тонкие пленки – это пленки толщиной < 1 мкм.

Свойства тонких пленок часто существенно отличаются от свойств объемных образцов тех же материалов. Это связано с большой ролью поверхностных атомов, имеющих ненасыщенные связи, приводящие к перестройке структуры и с самим наличием поверхности раздела фаз, изменяющим параметры физических процессов в пленке.

Различают два основных типа структуры тонких пленок:

- сплошная: пленка представляет собой «тонкий кристалл», закрывая всю поверхность подложки некоторым числом непрерывных слоев атомов;
- островковая: пленка представляет собой сеть из островков, разделенных свободными участками подложки, но участвующих в общих физических процессах.

Влияние структуры тонкой пленки покажем на примере важнейшего для электроники свойства – электропроводности. Для сплошной металлической пленки появляется дополнительный механизм рассеяния электронов – отражение от границы пленки. Если толщина пленки d сравнима с длиной свободного пробега электронов λ , это существенно уменьшает ее электропроводность σ_{mn} по сравнению с объемным образцом $\sigma_{об}$:

$$\frac{\sigma_{mn}}{\sigma_{об}} = \frac{3d}{4\lambda} \left(0,4228 + \ln \frac{\lambda}{d} \right).$$

Для островковой пленки возможна проводимость активационного типа, т.е. туннельный переход электронов с одного островка на другой, если они обладают достаточной энергией в результате теплового движения или внешних воздействий. Электропроводность определяется средним размером островков a , расстоянием между ними b , прозрачностью перехода D и тепловым фактором kT :

$$\sigma = \frac{e^2 b^2}{a} D \exp\left(-\frac{e^2}{akT}\right).$$

6.2. Механизмы роста тонких пленок

Все методы нанесения тонких пленок на микроскопическом уровне совмещают в себе два основных момента:

- материал пленки находится в виде отдельных атомов, ионов или молекул в некоторой среде, обеспечивающей его транспорт к подложке (жидкости, газе, парах самого материала, плазме);
- в области контакта среды и подложки существуют энергетически выгодные для частиц материала пленки положения на подложке, что приводит к его осаждению и формированию пленки.

Структура и свойства пленок зависят от условий осаждения, таких как температура подложки, энергия частиц материала, скорость роста пленки, присутствие других веществ, воздействие электромагнитных полей и др.

Выделяют три механизма роста пленок:

- островковый (Фольмера – Вебера): частицы пленки связаны между собой сильнее, чем с подложкой; первые атомы пленки сцепляются с подложкой, а последующие – с уже осажденными атомами, формируя островки, которые могут постепенно срастаться в сплошную пленку или образовывать островковую;
- послойный (Франка – Ван-дер-Мерве): частицы пленки связаны между собой слабее, чем с подложкой; атомы стремятся занять свободное место на подложке, пока не закроют ее полностью монослоем, затем растет следующий слой, т.к. для формирования островков связи слабы и т.д.;
- промежуточный (Странского – Крастанова): вырастает 1-2 монослоя, затем формируются островки.

6.3. Основные методы нанесения тонких пленок

Подробно рассматриваются в [1,8].

Широкое применение в электронике имеют методы термического испарения в вакууме, ионного (катодного) распыления, ионно-плазменного распыления, термического окисления Si, химического осаждения из газовой фазы.

Метод термического испарения в вакууме (рис. 17а). Напыляемое вещество в испарителе 1 разогревается до высокой температуры ($> 2000\text{ }^\circ\text{C}$) и испаряется. Когда поток пара встречает на своем пути подложку 2, отдельные атомы вещества конденсируются на ней, постепенно формируя пленку. Подложки располагаются в подложкодержателе, как правило, при повышенной (300–500 $^\circ\text{C}$) температуре, обеспечиваемой нагревателем 3. Для создания направленного потока пара требуется обеспечить длину свободного пробега частиц пара λ много больше расстояния между испарителем и подложкой L . При повышении давления атомы пара будут

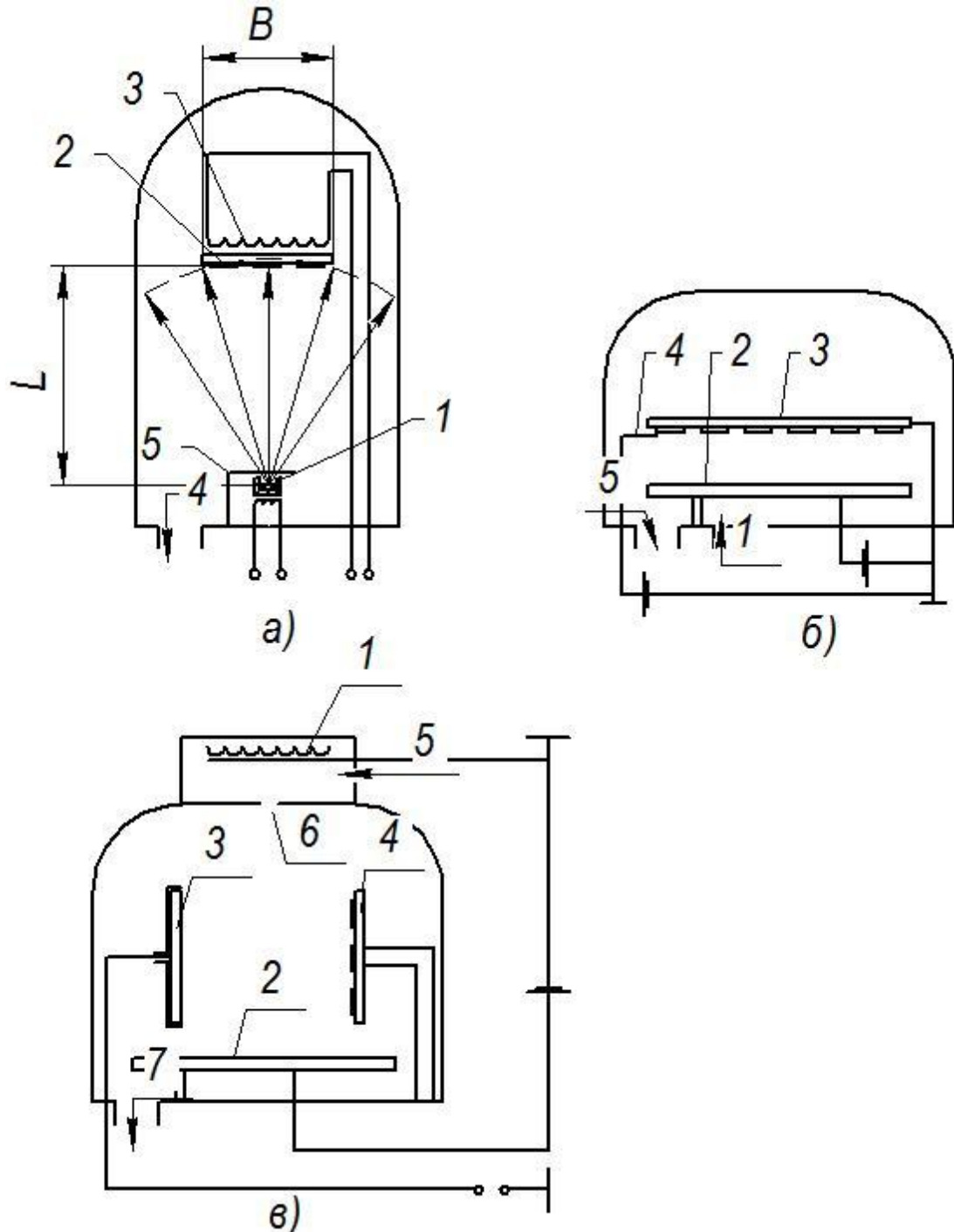


Рис. 17. Методы нанесения тонких пленок: а) термическое испарение в вакууме; б) катодное распыление; в) ионно-плазменное распыление

Для создания направленного потока пара требуется обеспечить длину свободного пробега частиц пара λ много больше расстояния между испарителем и подложкой L . При повышении давления атомы пара будут

сталкиваться с атомами среды и распределяться по объему камеры. Длина свободного пробега связана с температурой T и давлением p . Для идеального газа:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\sigma p},$$

где σ – эффективное сечение частиц газа.

Расстояние L ограничено снизу шириной подложек B . Точечный испаритель дает сферический фронт потока частиц пара, интенсивность которого Φ зависит от радиуса сферы r :

$$\Phi \sim \frac{1}{r^2}$$

В центре подложки $r = L$, а на краю $r = \sqrt{L^2 + \frac{B^2}{4}}$, т.е. поток неравномерно распределен по подложке. Чтобы эта неравномерность не была сильной, нужно $L > B$, по крайней мере, в несколько раз. Типичные значения $L = 0,2-0,5$ м, $p = 10^{-3}-10^{-4}$ Па.

Таким образом, напыление должно вестись в условиях глубокого вакуума, создаваемого и поддерживаемого вакуумной системой 4. Вакуумная система для таких давлений, как правило, состоит из двух ступеней – механического форвакуумного насоса, откачивающего до давления 0,1–1 Па, и диффузионного или другого высоковакуумного насоса, который становится эффективным при этих давлениях.

Испарители обладают инерцией при нагреве, поэтому для управления процессом напыления используется заслонка 5. Она открывается, когда испаритель прогрелся и интенсивность потока пара стала стабильной, и закрывается при достижении заданной толщины пленки. Существенную погрешность может вносить время открытия и закрытия заслонки (~ 1 с), т.к. при малых толщинах пленки оно сравнимо со временем напыления.

Используются испарители различной конструкции. Нагрев достигается за счет пропускания тока через испаряемое вещество (проволочные и ленточные испарители), косвенного подогрева (тигельные), воздействия электронного луча. Испарители изготавливаются из тугоплавких материалов (проводники из La, W, тигли из графита). Обладают ограниченным ресурсом и небольшим запасом испаряемого вещества. Трудно испарять тугоплавкие материалы. Приходится часто разгерметизовать установку вакуумного напыления для замены и наполнения испарителей, что снижает производительность.

Существуют установки различной производительности. Отличия заключаются в размерах установок, конструкции подложкодержателей и нагревателей. В небольших установках, используемых в исследовательских целях и опытном производстве, используются неподвижные держатели на 1–2 подложки и резистивные нагреватели. В установки для массового производства одновременно загружаются десятки подложек, перемещаемые между позициями напыления и ожидания карусельными или планетарными

механизмами. Для подогрева подложек на позиции напыления используются инфракрасные лампы.

Метод ионного (катодного) распыления (рис. 17б). На распыляемую мишень-катод 2 направляется поток ионов газа 1 (давление 1–10 Па), ускоренных отрицательным потенциалом катода относительно анода с подложками 3, до энергий 100–5000 эВ. В камере зажигается тлеющий разряд. При бомбардировке катода ионы выбивают из него атомы, которые осаждаются на подложке. Газ может быть инертным или активным. В последнем случае на подложку осаждаются продукты реакции распыляемого вещества и газа. Металлы распыляются на постоянном токе. Для диэлектриков используется переменный ток: в один полупериод происходит распыление, а в другой с диэлектрика снимается накопленный заряд. Электрод смещения 4 позволяет выполнять очистку подложек ионной бомбардировкой. Подавая на него небольшой положительный потенциал (до 300 В), можно вызвать разряд, где заземленные подложки являются катодом и подвергаются ионной бомбардировке. Пониженное давление создается за счет откачки вакуумной системой 4. Относительно высокое рабочее давление позволяет обойтись вакуумной системе без высоковакуумного насоса.

Вещество распыляется равномерно со всей площади электрода. Это позволяет уменьшить расстояние между источником вещества и подложкой до единиц см. Достаточная длина свободного пробега, несмотря на относительно высокое давление газа, обеспечивается высокой скоростью распыленных частиц. В камере часто устанавливаются накопители заготовок и подложек с напыленными пленками и устройства их передвижения. Это позволяет обрабатывать десятки подложек без разгерметизации установки.

Достоинства по сравнению с методом термического испарения в вакууме:

- Низкая инерционность. Управление напылением происходит включением и выключением напряжения между электродами. Стабильные параметры разряда устанавливаются быстро.
- Высокий ресурс. Взаимодействие ионов с распыляемым веществом происходит только на поверхности мишени. Это позволяет иметь массивные мишени с большим запасом напыляемого вещества.
- Отсутствие геометрических погрешностей.
- Нет ограничений по напыляемым веществам. Ион с энергией > 100 эВ способен разорвать любую химическую связь.
- Возможность нанесения пленок сложного состава.

Недостатки:

- Сложная электрическая часть.
- Возможность загрязнения пленок.

Метод ионно-плазменного распыления (рис. 17в). Используются три электрода – катод-мишень 3, анод 2 и дополнительный термокатод 1. Давление рабочего газа поддерживается на уровне 10^{-2} – 10^{-1} Па. В газе возбуждается несамостоятельный разряд, поддерживаемый эмиссией электронов из

термокатода. На пути от катода к аноду эти электроны ионизируют рабочий газ, поступающий через натекатель 5. Возникает дуговой разряд с током 1–10 А и напряжением ~100 В. Ионы вещества мишени выбиваются ионами газа и осаждаются на подложку 4 отрицательным потенциалом 1–3 кВ, который вытягивает ионы из плазмы разряда. Если разряд касается подложек, это приводит к разогреву и повреждению поверхности. Чтобы избежать этих эффектов, используется водоохлаждаемый подложкодержатель, а разряд формируется в отдельной камере и вытягивается в рабочую камеру через калиброванное отверстие 6 за счет специальной геометрии электродов. Пониженное давление создается за счет откачки вакуумной системой 7.

Достоинства метода по сравнению с катодным распылением:

- Выше скорость и стабильность процесса напыления за счет параметров разряда.
- Пленки менее подвержены загрязнению в силу меньшего давления газа.

Недостатки:

- Сложнее электрическая часть и вакуумная часть.

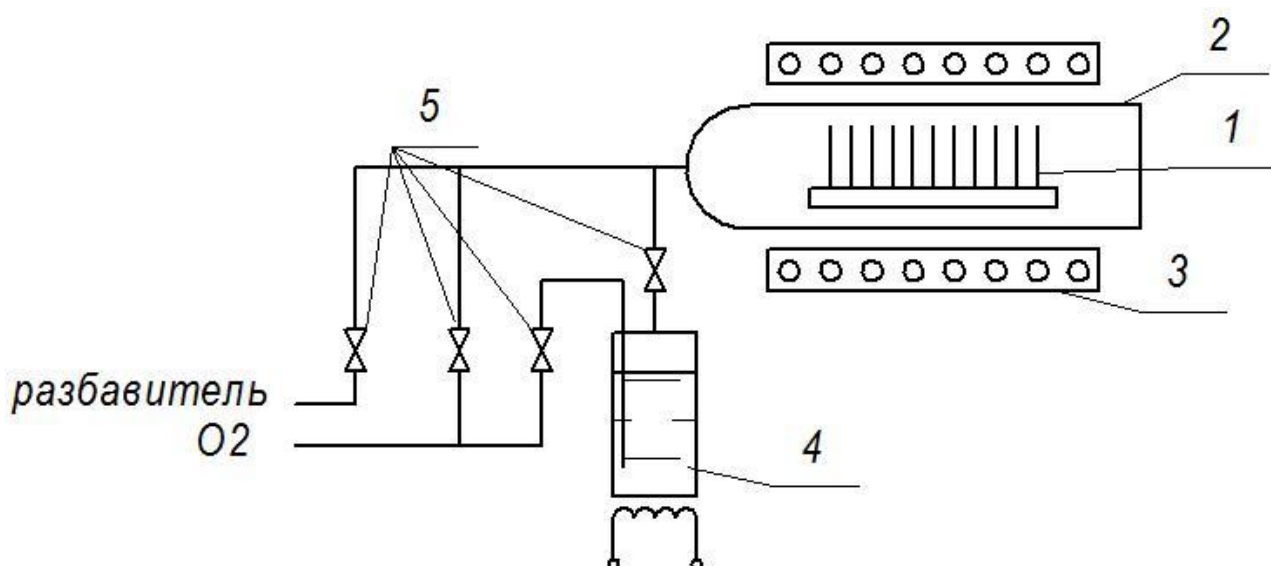
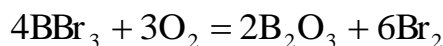
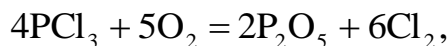


Рис. 18. Установка для термического окисления Si

Термическое окисление Si. проводится при атмосферном или повышенном давлении в горизонтальных цилиндрических кварцевых реакторах при температуре 800–1200 °С. Различают нанесение пленок в сухом и во влажном кислороде. Качество пленок выше в сухом кислороде, но скорость окисления выше во влажном. Скорость зависит также от давления кислорода. Для выращивания подзатворного окисла к O_2 может добавляться HCl. Это снижает заряд на границе Si–SiO₂, а значит и пороговое напряжение р-канальных транзисторов. Однородность параметров пленок обеспечивается постоянством температуры и давления. Основой установки термического окисления (рис. 18) является кварцевый цилиндрический реактор 2, помещаемый в печь 3. В реактор помещается кассета с пластинами Si 1. Поток газа под давлением поступает по трубопроводам с клапанами 5 и состоит из разбавителя, сухого и

влажного кислорода, получаемого пропусканием через подогреваемую емкость с водой 4. В качестве разбавителя обычно используется N_2 . Разбавитель ускоряет реакцию за счет повышения давления.

Химическое осаждение из газовой фазы фосфоросиликатного (ФСС) и боросиликатного (БСС) стекла. Основано на протекании реакций кислорода с галогенидами:



при температуре 800–1100 °С. Получаемые таким образом оксиды находятся в состоянии размягчения и образуют ФСС – $(P_2O_5)_x(SiO_2)_y$ и БСС – $(V_2O_3)_x(SiO_2)_y$.

ФСС и БСС используются как источники Р и В для легирования Si. Установки для нанесения аналогичны показанной рис. 18. Вместо емкости с водой используются термостатированные испарители VBr_3 или PCl_3 . Для доставки галогенидов в реактор и поддержания стехиометрической смеси с O_2 используется подаваемый под давлением Ar.

6.4. Фотолитография

Подробно рассматривается в [1,4].

Основной метод формирования конфигураций пленочных элементов. Исходным материалом для фотолитографии является полупроводниковая пластина или подложка ГИМС с нанесенной на ее поверхность пленкой.

Основные стадии процесса фотолитографии (рис. 19):

1. Нанесение фоторезиста. *Фоторезист* – защитное вещество, изменяющее свою химическую стойкость при экспонировании светом. Применяются жидкие фоторезисты, распределяемые по поверхности подложки вращением на центрифуге.

2. Сушка фоторезиста. Проводится с целью удаления из фоторезиста входящего в его состав растворителя для повышения химической стойкости. Применяют конвективную, ИК- и СВЧ-сушку. Режимы выбираются так, чтобы обеспечивать непрерывный выход растворителя через поверхность и исключить преждевременные химические преобразования в фоторезисте. Это достигается невысокой температурой сушки (90–120 °С) и достаточным временем.

3. Экспонирование. Производится через *фотошаблон* – трафарет из прозрачных и непрозрачных участков, повторяющий конфигурацию слоя пленки. Облучение вызывает фотохимические реакции диссоциации или полимеризации в фоторезисте в результате образования свободных радикалов. В результате экспонирования формируется рисунок фоторезиста, имеющий химически стойкие участки над будущими элементами и химически нестойкие – над будущими пробельными местами. Для эффективного экспонирования

длина волны излучения должна соответствовать энергии активации образования свободных радикалов.

Выделяют позитивные и негативные фоторезисты. Позитивные фоторезисты имеют низкую химическую стойкость в экспонированных областях, т.е. соответствуют позитивному фотошаблону, с непрозрачными участками над будущими элементами ИМС. Негативные фоторезисты имеют высокую химическую стойкость в экспонированных областях, т.е. соответствуют негативному фотошаблону, с непрозрачными участками над будущими пробельными местами.

Для экспонирования используются проекционные оптические системы с уменьшением и мультиплицированием рисунка фотошаблона. Возможности литографических процессов определяют минимальный размер элементов ИМС. Для выполнения рисунка на поверхности ИМС необходимо соблюдение законов геометрической оптики, т.е. отсутствие влияния волновых явлений. Оптическое разрешение составляет $\sim 0,1\lambda$, где λ – длина волны экспонирующего излучения. Используется УФ-излучение с $\lambda = 200\text{--}400$ нм, т.е. элементы ~ 20 нм – технологический предел. Уменьшение длины волны требует помещения источника излучения и оптической системы в вакуум, т.к. при $\lambda < 190$ нм излучение активно поглощается и рассеивается газами воздуха.

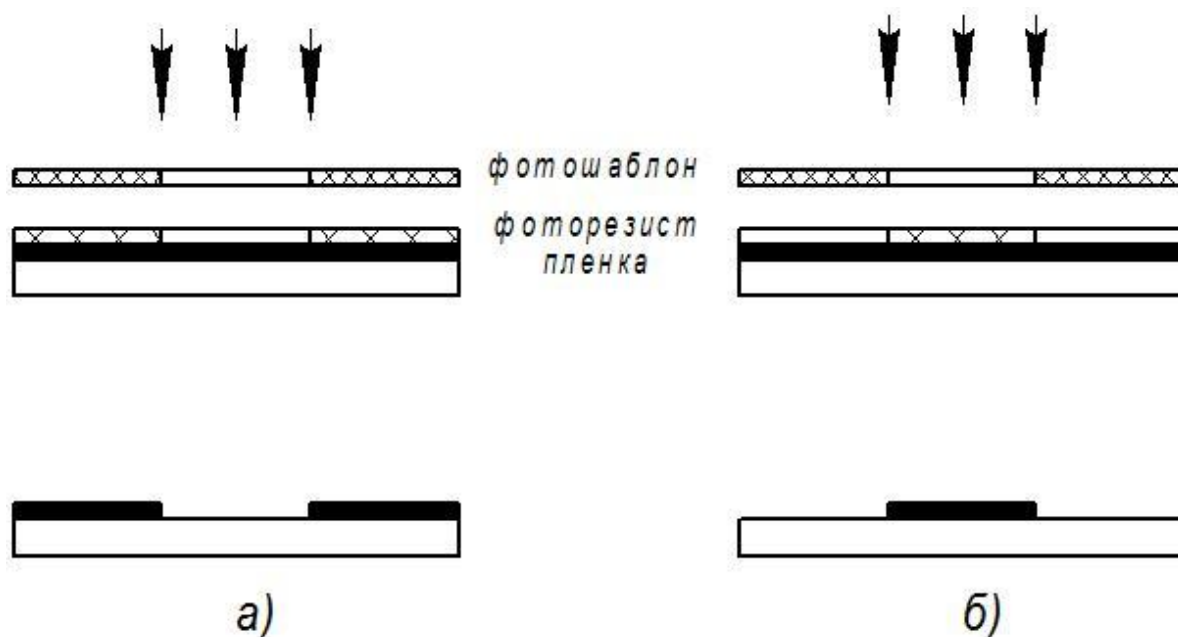


Рис. 19. Фотолитография с использованием позитивного (а) и негативного (б) фоторезиста

4. Проявление. Время после экспонирования, отводимое на прохождение реакций в фоторезисте.

5. Дублирование (вторая сушка, термообработка). Производится для придания прочности пленке фоторезиста.

6. Травление. Удаление фоторезиста и материала пленки с пробельных мест. В основном используется жидкостное химическое травление методами погружения заготовки в травитель или распыления травителя. Основные стадии

процесса травления – диффузия травителя к поверхности, адсорбция травителя поверхностью, поверхностные химические реакции, десорбция и диффузия продуктов реакции. Выделяют *полирующие* и *селективные* травители. Для полирующих самая медленная стадия – диффузия. За время диффузии реакции со всеми чувствительными к травителю веществами успевают пройти. Следовательно, происходит полировка, т.е. стравливание микронеровностей поверхности, а процесс травления проходит изотропно и нечувствительно к составу и строению поверхности. Для селективных травителей самой медленной стадией является собственно химическая реакция. Скорость поверхностной реакции сильно зависит от состава и структуры поверхности. При правильном подборе травителя можно добиться селективности (т.е. отношения скоростей реакции) для двух заданных веществ 10^3 – 10^4 и более, т.е. по сути стравливать одно вещество и не стравливать другое или стравливать вещество анизотропно. Селективность важна для травления контактирующих веществ (проводящий и резистивный слои ГИМС, Al – SiO₂, SiO₂ – Si), а также поверхностей Si с разной кристаллографической ориентацией. Травители выбираются в зависимости от состава поверхности. Типичные варианты – смесь HNO₃ и HF (Si), насыщенный водный раствор NH₄F (SiO₂), FeCl₃ (Al, Cr, Cu, сплавы на их основе), «царская водка» (Au, Pt, сплавы Pt).

Также возможно газовое, плазменное и ионное травление в электрическом разряде. Используются большие реакторы, где обрабатываемые пластины или подложки помещаются между двумя электродами. Ускоренные ионы из плазмы оказывают, в зависимости от энергии и тока разряда, в разной степени химическое и физическое воздействие. Газовое и плазменное травление обладают универсальностью по стравливаемым веществам. Процесса в основном сводится только к взаимодействию на поверхности. Управлять скоростью можно, регулируя давление газа или ток разряда. Основные трудности в использовании газового травления – получение газов-реагентов высокой чистоты и высокая температура процесса. Ионное и плазменное травление обладают невысокой селективностью (5–30) по типичным для электроники веществам.

7. Удаление продуктов реакции травления. Обычно отмывка в жидкости.

Погрешности фотолитографии – области засветки и затенения на краях элементов, возникающие из-за конечной толщины фоторезиста и фотошаблона. Возможности создания тонких слоев фоторезиста и фотошаблонов ограничены механической прочностью материалов.

6.5. Чистота поверхности пластин и подложек

В силу субмикронных размеров элементов ИМС, загрязнение поверхности ведет к нарушению процессов их формирования, а следовательно – к браку при производстве ИМС. Поверхность твердых тел химически активна по сравнению с объемом, поэтому из любой среды, с которой она контактирует, адсорбируется некоторое количество загрязнений. Атомарно-чистая

поверхность возможна только после очистки в условиях глубокого вакуума. Для производственных нужд достаточно *технологической чистоты* поверхности – концентрации загрязнений, которая не препятствует изготовлению годных изделий. Для ИМС это не более 10^{-8} – 10^{-7} г/см², что соответствует единицам сплошных слоев атомов.

Источниками загрязнений являются среды и предметы, с которыми контактирует поверхность пластины или подложки – вода, воздух, технологические среды, оборудование, инструмент, тара для транспортировки и хранения, персонал. Виды загрязнений – пыль, органические загрязнения, продукты абразивного износа, ионы металлов и другие неорганические загрязнения. Поддержание чистоты поверхности требует комплекса мер по устранению источников загрязнения и очистки.

Для устранения источников загрязнений в электронном производстве используются очищенная, дегазованная и деионизованная вода, высокочистые и химически нейтральные технологические среды. Например, чистота воды контролируется по удельному сопротивлению: у абсолютно чистой воды 25 МОм·см, при разном уровне технологической чистоты 18, 10 и 1 МОм·см. Выделяются чистые производственные и объемы и помещения (*чистые комнаты*) для наиболее чувствительных к загрязнениям технологических операций. Стены производственных помещений, оборудование, инструмент, тара изготавливаются из материалов с минимально возможными абразивным износом и газовой выделением (кварцевая тара, алмазный режущий инструмент и др.). Производится регулярная влажная уборка. Вводится регламент работы для персонала – от ограничения доступа в производственные помещения до работы в полностью закрытых скафандрах.

Очистка производится многократно в технологическом процессе изготовления ИМС. Наиболее важна очистка перед высокотемпературными процессами, нанесением пленок и после механической обработки. Методы очистки разделяют по механизму воздействия на химические и физические, по применяемым средствам – на жидкостную и сухую.

Для химической жидкостной очистки пластин Si применяется перекисно-аммиачный раствор $H_2O_2 + NH_4OH$. Он разлагается с образованием активного атомарного кислорода и переводит многие виды загрязнений в растворимые окислы. NH_4OH при этом связывает металлы I и II групп.

Из физических жидкостных методов применяется обезжиривание в органических растворителях (фреонах, бензоле, толуоле и др.), промывка в деионизованной воде, ультразвуковая очистка, адсорбция загрязнений в полимерные покрытия (полиметилметакрилат, поливинилхлорид и др.).

Жидкостные методы безопасны для заготовок ИМС, но эффективны только против некоторых видов загрязнений.

Для сухой очистки применяются термообработка (отжиг), газовое, плазменное и ионное травление. При отжиге тепловое движение делает энергетически невыгодным положение адсорбированных частиц (загрязнений) на поверхности, что вызывает их десорбцию. Применение ограничено

температурой отжига – обычно до 500–700 °С во избежание плавления пленки Al и активизации диффузии примеси. Некоторые загрязнения при такой температуре еще не десорбируются. Газовое, ионное и плазменное травление эффективны против любого загрязнения, однако могут приводить к аморфизации и распылению самой поверхности. Для восстановления структуры поверхности после применения этих методов используют отжиг.

6.6. Защита и герметизация ИМС

Для защиты от внешних воздействий кристаллы полупроводниковых и платы гибридных ИМС помещают в корпус. Функции корпусов:

- конструкционная;
- защита от воздействий внешней среды (химических, механических);
- электрическая изоляция;
- электрическая коммутация кристалла к внешним цепям;
- теплоотвод

Выбор конструкции корпуса определяется эксплуатационными и экономическими требованиями – выпускаются ИМС в тропическом (повышенная защита от влажности во избежание коррозии проводников), взрывозащищенном (повышенная механическая прочность) исполнении. Если особых требований нет, используются самые дешевые в производстве корпуса. Элементы корпуса – несущая часть (цельная или основание и крышка), выводы кристалла или платы, внешние выводы, в некоторых типах корпусов – система проводников для коммутации между ними. Корпуса различаются используемыми материалами, числом, конструкцией и расположением выводов.

Герметизация в корпусе требует выполнения следующих технологических операций:

- изготовление корпуса с выводами и проводниками;
- изготовление выводов кристалла или платы;
- соединение кристалла или платы с корпусом;
- создание электрического соединения выводов кристалла или платы с выводами корпуса;
- собственно герметизация.

Расположение выводов корпуса возможно по периметру (DIP, SOIC и др.) или по всей площади (LGA, BGA и др.), иметь форму для штыревого или поверхностного монтажа. Расположение выводов по всей площади корпуса позволяет упростить топологию проводников и контактных площадок на кристалле и уменьшить длину проводников. Это улучшает параметры ИМС (прежде всего быстродействие) за счет снижения паразитных емкостей, индуктивностей, сопротивлений, образуемых проводниками, однако требует соответствующих выводов кристалла.

По материалам различают корпуса металлические с диэлектрическим основанием (пластмассовым, стеклянным или керамическим), керамические и пластмассовые. Металлические корпуса состоят из основания и крышки, соединяемых пайкой высокотемпературными припоями. Кристалл закрепляется в корпусе также при помощи пайки (низкотемпературные припой In, In–Sb) или приклеивается. Их достоинства – хороший теплоотвод и высокая механическая прочность, недостатки – большое тепловое воздействие при герметизации и изоляционные свойства. Керамические корпуса состоят из нескольких слоев керамической массы, на которых формируются пленочные проводники, подобно многослойным печатным платам. Керамическая масса прессуется и спекается с кристаллом и проводниками внутри. Достоинства таких корпусов – коммутационные возможности, хорошие изоляционные свойства, главный недостаток – сложная технология изготовления. Пластмассовые корпуса обладают худшими свойствами, но дешевы и просты в изготовлении, поэтому широко применяются. Состоят из основания и крышки, изготавливаемых и соединяемых прессованием. Кристалл обычно приклеивается. Иногда снабжаются также металлическим теплоотводом.

Выводы кристалла предназначены для электрического соединения контактных площадок с выводами корпуса. Выводы должны обеспечивать омический контакт с низким сопротивлением и достаточной механической прочностью, быть совместимы с материалами контактных площадок и выводов корпуса. Различают гибкие (проволочные), жесткие (шариковые, столбиковые, балочные) и паучковые выводы.

Гибкие выводы выполняются из проволоки Au, Cu или Al толщиной 30–50 мкм и длиной до 5–10 мм, присоединяются индивидуальной пайкой или сваркой. Сварка предпочтительнее, т.к. дает лучшие электрические характеристики, чем пайка, из-за отсутствия переходов с припоем, а также большую механическую прочность. Разработаны методы термокомпрессионной (нагревом и давлением), ультразвуковой и контактной (пропусканием тока) сварки. Достоинства гибких выводов – возможность любого расположения контактных площадок. Недостатки – расположение выводов корпуса только по периметру, низкая механическая прочность, отсутствие групповых операций присоединения.

Жесткие выводы подобны многослойным контактам и проводникам в самих ИМС, но имеют большие размеры. Состоят из слоев, выполняющих отдельные функции – контактную, адгезионную, проводниковую, защитную. Шариковые и столбиковые выводы образуют контакт над контактной площадкой, балочные – за кромкой кристалла на 100–200 мкм. Высота жестких выводов – 10–40 мкм. Основная часть вывода – хорошо проводящие шарик, столбик или балка из Cu или Au, имеющие контактно-адгезионный подслоя Cr, Mo, Ti или Ta на кристалле. Шарики также покрывают слоями Ni и припоя. Присоединяются жесткие выводы за счет адгезии напыляемых пленок к контактным площадкам и групповой пайки к подготовленным выводам кристалла. Достоинства – возможность любого расположения контактных площадок и выводов корпуса

(кроме балочных), хорошие электрические и механические свойства, групповая пайка. Недостатки – монтаж кристалла лицевой стороной к основанию корпуса (сложно контролировать, плохой теплоотвод) у шариковых и столбиковых выводов, малая длина выводов и расположение контактных площадок и выводов по периметру у балочных, а также сложная технология изготовления. Возможен перенос контактных площадок на заднюю сторону кристалла. Для этого в кристалле выполняется сквозной проводящий канал методом термомиграции или лазерного прожигания отверстий.

Паучковые выводы названы по форме, напоминающей ноги паука. Представляют собой плоские металлические (Cu, Al, ковар) ленты толщиной 25–75 мкм. Изготавливаются отдельно от кристалла на металлической рамке или полимерной ленте. При монтаже вырубается штампом и присоединяются групповой пайкой или сваркой. Достоинства – высокая технологичность изготовления и сборки, большая длина, недостаток – расположение контактных площадок кристалла и выводов корпуса только по периметру.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коледов, Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учебное пособие для вузов по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» / Л.А. Коледов. – СПб. и др.: Лань, 2009. – 400 с.
2. Игнатов, А.Н. Классическая электроника и наноэлектроника: учебное пособие для вузов по специальности 210400 – «Телекоммуникации» / А.Н. Игнатов, Н.Е. Фадеева, В.Л. Савиных. – М. : Флинта : Наука, 2009. – 725 с.
3. Щука, А.А. Электроника: учебное пособие для вузов по направлению 654100 – Электроника и микроэлектроника / А.А. Щука. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 739 с.
4. Сергиев, В.Г. Технология микросхем и микропроцессоров: учебное пособие / В.Г. Сергиев, Н.С. Колмакова, Р.В. Смыслова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 93 с.
5. Зебрев, Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: учебное пособие / Г.И. Зебрев. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2011. – 240 с.
6. Раскин, А.А. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники Ч. 1 : учебное пособие для вузов по направлению подготовки 210100 – «Электроника и микроэлектроника» / А.А. Раскин, В.К. Прокофьева. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2010. – 163 с.
7. Ефимов, И.Е. Основы микроэлектроники: учебник / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. – СПб. и др.: Лань, 2008. – 383 с.
8. Марголин, В.И. Введение в нанотехнологию: учебник для вузов по направлению 211000 – «Конструирование и технология электронных средств» / В.И. Марголин. – СПб.: Лань, 2012. – 464 с.
9. Барыбин, А.А. Электроника и микроэлектроника: Физико-технологические основы: учебное пособие для вузов / А.А. Барыбин. – М.: Физматлит, 2006. – 423 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Вводный раздел	
1.1. Основные понятия и определения.....	3
1.2. Микро- и нанoeлектроника. Интегральная электроника	4
2. Конструкции элементов полупроводниковых ИМС	
2.1. Принципы создания интегральных полупроводниковых приборов	5
2.2. Монокристаллический Si в электронной технологии.....	6
2.3. Конструкция биполярных интегральных транзисторов	7
2.4. Конструкция интегральных МОП-транзисторов и КМОП-структур.....	9
2.5. Конструкция интегральных диодов и стабилитронов	13
2.6. Конструкции интегральных резисторов.....	14
2.7. Конструкции интегральных конденсаторов.....	16
2.8. Проводники и контактные площадки	17
3. Конструкции элементов гибридных ИМС	
3.1. Классификация гибридных ИМС. Подложки. Проводники.....	17
3.2. Конструкция тонкопленочных резисторов	18
3.3. Конструкция тонкопленочных конденсаторов	19
4. Базовые технологии производства ИМС	
4.1. Планарно-эпитаксиальная технология изготовления ИМС на биполярных транзисторах.....	20
4.2. Технология изготовления ИМС на МОП-транзисторах и КМОП-структурах.....	22
4.3. Технология изготовления гибридных ИМС.....	24
5. Легирование полупроводника	
5.1. Точечные дефекты в полупроводниках. Растворимость примесей.....	26
5.2. Диффузия примесей.....	28
5.3. Легирование ионной имплантацией	31
6. Операции с поверхностью пластин и подложек	
6.1. Строение и свойства тонких пленок.....	33
6.2. Механизмы роста тонких пленок.....	34
6.3. Основные методы нанесения тонких пленок.....	34
6.4. Фотолитография.....	39
6.5. Чистота поверхности пластин и подложек	41
6.6. Защита и герметизация ИМС.....	43
Библиографический список.....	46

Учебное пособие

Кувшинов Алексей Михайлович

**ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.
КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ**

Учебное пособие

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 22.11.2019. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,79. Тираж 30 экз. Заказ 460/126.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.