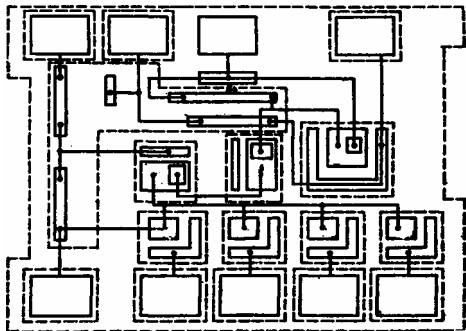


М. П. Романова

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ



Ульяновск 2005

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Ульяновский государственный технический университет

М.П. Романова

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ

Учебное пособие

Ульяновск 2005

УДК 621.38.049.77(075)
ББК 32.844.1я73
Р13

Утверждено редакционно-издательским
советом УлГТУ в качестве учебного пособия

Рецензенты: директор Ульяновского филиата ИРЭ РАН канд. техн. наук,
профессор В. А. Сергеев;
канд. техн. наук, профессор кафедры Аи РЭО УлВАУ ГА
А. В. Ефимов

УДК 621.38.049.77 (075)
ББК 32.844.1я73

Романова, М. П.

Р13 Проектирование и технология микросхем: учебное пособие/М. П. Романова. - Ульяновск: УлГТУ, 2005. - 83 с.
ISBN 5-89146-698-8

Пособие разработано в соответствии с программой дисциплины «Проектирование и технология микросхем». В нем изложены вопросы принципов проектирования и технологии изготовления полупроводниковых интегральных микросхем. Предназначено для самостоятельной работы студентов обучающихся по направлению 21.02.01.65.

Пособие подготовлено на кафедре «Проектирование и технология электронных средств».

Печатается в авторской редакции.

© М. П. Романова, 2005

ISBN 5-89146-698-8

© Оформление. УлГТУ, 2005

Оглавление

Введение.....	5
1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ	6
1.1. Особенности и преимущества планарной технологии.....	6
1.2. Кремниевые структуры полупроводниковых интегральных микросхем.....	7
1.3. Интегральный биполярный транзистор.....	12
1.4. Интегральные полупроводниковые резисторы.....	24
1.4.1. Классификация полупроводниковых резисторов и их характеристики.....	24
1.4.2. Расчет диффузионных резисторов.....	28
1.4.3. Расчет ширины и длины резисторов.....	30
1.5. Интегральные полупроводниковые конденсаторы.....	35
1.5.1. Конденсаторы на основе р-п перехода.....	35
1.5.2. Конденсаторы на основе МДП структуры.....	36
1.6. Интегральные полупроводниковые диоды.....	37
1.7. Расчет топологических размеров диффузионных преемычек.....	38
2. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА МДП ТРАНЗИСТОРАХ	40
2.1. Конструкции и основные параметры МДП транзисторов.....	40
2.2. Резисторы на основе МДП структур.....	45
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.	46
3.1. Правила проектирования изолированных областей.....	46
3.2. Правила размещения элементов интегральных микросхем на площади кристалла.....	47
3.3. Разработка эскиза топологии.....	48
4. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС	50
4.1. Требования к защите интегральных микросхем.....	50
4.2. Конструктивные исполнения бескорпусных БИС.....	52

4.3. Расчет теплового режима ИМС.....	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
Приложение 1. Банк данных топологии интегральных биполярных транзисторов.....	57
Приложение 2. Основные сведения об элементах структур полупроводниковых интегральных схем.....	63
Приложение 3. Основные операции технологического маршрута и изготовления структуры ИС на биполярных транзисторах.....	65
Приложение 4. Виды и причины наиболее типичных дефектов на операциях технологического маршрута изготовления полупроводниковых микросхем.....	73
Приложение 5. Конструктивно-технологические ограничения при конструировании ИМС на биполярных транзисторах, выполненных по планарно-эпитаксиальной технологии с использованием изоляции р - n переходом.....	80
Приложение 6. Типичные характеристики интегральных полупроводниковых резисторов.....	82
Б И Б Л И О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С П И С О К	83

ВВЕДЕНИЕ

Быстрыми темпами развивается элементная база радиотехники и радиоэлектроники. Традиционная радиоаппаратура представляла собой почти исключительно комбинации линейных и нелинейных электрических цепей. Сейчас интенсивно исследуются и внедряются в практику функциональные устройства и системы, производящие обработку сигналов за счет специфических явлений в твердых телах - полупроводниках, диэлектриках и магнитных материалах.

Важнейшую роль в современной жизни играют изделия микроэлектронной технологии. Быстродействующие интегральные микросхемы (ИМС) обусловили широкий переход к новым цифровым способам обработки и преобразования радиосигналов, создание новых видов связи, например, мобильной связи. Повышение эффективности производства радиоэлектронной аппаратуры, улучшение её качества и надежности может быть достигнуто лишь на основе широкого применения ИМС.

Производство ИМС приводит к существенному уменьшению массы, объема (габаритов), стоимости РЭА, снижению потребляемой мощности и повышению надежности. Выигрыш по надежности резко увеличивается с увеличением сложности схемы. Групповая технология ИМС дает также выигрыш по стоимости, который значительно увеличивается с возрастанием степени интеграции (количество элементов в одном кристалле). ИМС часто используют при создании устройств, мало чувствительных к влиянию технологического разброса параметров элементов и к изменению температуры.

Знание основ микроэлектроники необходимо радиоинженеру для рационального выбора и применения элементной базы при создании новой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Разработка ИМС представляет собой сложный процесс. Вопросы расчета и выбора конкретного технологического процесса создания ИМС решают с учетом особенностей разрабатываемой схемы, возможностей и ограничений, присущим различным способам изготовления.

Предлагаемое учебное пособие является обобщением теоретического и справочного материала, который необходим для расчета и выбора технологии изготовления полупроводниковых ИМС. В нем представлены вопросы расчета интегральных элементов полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах и МДП структурах.

Большое внимание уделяется конструктивно-технологическим ограничениям при разработке топологии ИМС на биполярных транзисторах. Справочная часть пособия содержит пример технологического процесса изготовления полупроводниковых ИМС, а также банк данных биполярных транзисторов.

Пособие предназначено для подготовки студентов специальности 2102.01 65 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» различных форм обучения.

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

1.1. Особенности и преимущества планарной технологии

Особенностью планарной технологии является ее универсальность. Технологический процесс состоит из трех повторяющихся операций (химическая обработка, термическая обработка и фотолитография). Самые разнообразные полупроводниковые приборы и интегральные схемы (ИС) можно создавать изменением только комплекта фотошаблонов и режимов термических процессов

Планарные $p-n$ переходы защищаются от окружающей среды диэлектрической пленкой двуокиси кремния непосредственно в процессе их создания, и защитная пленка двуокиси кремния сохраняется на всех этапах дальнейшего формирования структуры элементов ИС. Эта особенность планарных $p-n$ переходов обеспечивает высокую стабильность их параметров и надежность работы ИС.

Планарная технология характеризуется большим разнообразием геометрических конфигураций, высокой точностью взаимного расположения и линейных размеров $p-n$ переходов. Минимальные линейные размеры областей в планарных структурах ИС составляют в настоящее время 1-3 мкм. Высокая стабилизация режимов при проведении термических процессов позволяет получить диффузионные слои толщиной до 0,1—0,2 мкм с разбросом $\pm 10\%$. Это обеспечивает высокие электрические параметры планарных приборов и микросхем, повышение плотности упаковки элементов в ИС, создание больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС). В настоящее время уже разработаны ИС, содержащие десятки тысяч элементов на одном кристалле кремния; с плотностью упаковки до 1000 элементов/мм², а в ближайшем будущем число элементов на кристалле возрастет до 150000. При этом достигнуто исключительно высокое быстродействие ИС, характеризующееся временем задержки 0,1 - 0,2 нс на один логический элемент.

Особенностью планарной технологии является также использование в ней *группового метода* изготовления ИС. На одной пластине кремния одновременно изготавливается много ИС. Их число зависит от диаметра пластины и размера площади, занимаемой ИС. После изготовления элементов структур, получения металлической разводки между элементами и металлических контактных площадок для присоединения внешних выводов корпуса ИС пластина кремния разрезается на отдельные кристаллы, содержащие уже только одну ИС. Дальнейшая обработка каждого кристалла (сборка в корпус, присоединение выводов) ведется индивидуально, что увеличивает стоимость процессов сборки ИС по сравнению с другими технологическими процессами. В результате, как показывают оценочные данные, затраты на сборочные операции составляют от 40 до 65% всех затрат на изготовление ИС в зависимости от степени интеграции. В настоящее время для снижения стоимости сборки также используются групповые методы и в процессах сборки.

Групповой метод изготовления ИС - это своего рода *интеграция технологических процессов*, т. е. объединение в едином времени технологических процессов изготовления сотен и тысяч ИС. Появилась тенденция расширить интеграцию технологических процессов, объединяя их в непрерывный процесс, проходящий в единой реакционной камере или в замкнутой многокамерной системе. Уникальные структурные параметры и электрические характеристики ИС достигнуты в производственных условиях, характеризующихся исключительно высокой технологической гигиеной, использованием сложного технологического оборудования, особо чистых химических реактивов.

Высокие требования предъявляются к чистоте производственных помещений. В 1 л воздуха должно содержаться не более трех пылинок размером 0,3 мкм и более. В обычных условиях число пылинок обычно колеблется от 5000 до 1 000 000 в одном литре воздуха. При возрастании степени интеграции ИС требования к чистоте еще более повышаются. Для обеспечения этих условий создаются специальные системы фильтрации воздуха на основе мощных кондиционеров. Наиболее ответственные технологические участки располагаются в так называемых чистых комнатах, организуемых по принципу «комната в комнате», что улучшает герметизацию помещений. Из особых, нестирающихся, материалов должны изготавливаться стены, полы и потолки. Важное значение имеет спецодежда работающего персонала, которая должна быть изготовлена из материалов, не выделяющих пылевых частиц.

Требования к производственным условиям при использовании планарной технологии существенно выше тех, которые предъявляются при любом другом технологическом процессе. Учитывая эту особенность планарной технологии, можно отметить, что для повышения выхода годных приборов большое значение приобретает автоматизация технологических процессов, позволяющая минимально уменьшить численность персонала, снизить влияние субъективных качеств операторов, проводящих технологические процессы.

1.2. Кремниевые структуры полупроводниковых интегральных микросхем

В производстве ИМС обычно используются полупроводниковые материалы в виде монокристаллических слитков имеющей форму, близкую к цилиндрической. Размеры слитков зависят от метода их выращивания и типа полупроводникового материала.

В настоящее время наибольшее развитие получили ИС на основе монокристаллов кремния. Выбор кремния обусловлен высоким качеством планки двуокиси кремния, получаемой относительно простым технологическим способом.

Монокристаллический кремний. Промышленно выпускается для производства интегральных микросхем полупроводниковых приборов кремний, получаемый методами Чохральского, бестигельной зонной и гарнисажной плавок. Первый метод обеспечивает получение слитков с кристаллографической ориентацией (111) и (100), а два других - с кристаллографической ориентацией (111).

Условное обозначение материала включает в себя указание на группу марок или марку кремния (первые цифра и буква), подгруппу марок (последующая цифра), после чего следует набор букв и цифр, раскрывающих метод получения кремния, тип электропроводности, легирующий элемент, номинал удельного сопротивления, диаметр слитка.

Примеры условного обозначения:

1.1А5 КДБ 7,5/0,1 — 60

Кремний, полученный методом Чохральского (индекс К) дырочного типа электропроводности (индекс Д), легированный бором (индекс Б), с удельным сопротивлением 7,5 Ом·см, диффузионный длиной носителей заряда 0,1 мм, диаметр слитка 60 мм.

2. 1А4 КЭФ 5/0,1

Кремний, полученный методом Чохральского, электронного типа электропроводности (индекс Э), легированный фосфором (индекс Ф), с удельным сопротивлением 5 Ом·см и диффузионный длиной носителей заряда 0,1 мм.

3. 2Б 2Б КЭФ 25/0,2 -50

Кремний, полученный методом бестигельной зонной плавки (индекс БК).

4. 2Г1 ГКЭФ

Кремний, полученный методом гарнисажной плавки (индекс Г К).

Если кремний электронного типа электропроводности легируется сурьмой или мышьяком, он обозначается соответственно КЭС или КЭМ.

В целях уменьшения заряда, накапливающегося на границе раздела между поверхностью кремния и диэлектрическим покрытием из двуокиси кремния, и улучшения таким образом параметров элементов микросхем изготавливаются кремниевые структуры с комбинированным диэлектриком.

Кремниевые структуры с комбинированным диэлектриком.

Структуры подобного типа представляют собой кремниевые пластины-подложки толщиной 200 - 300 мкм и диаметром 40 мм. Подложки сподготовленно поверхностью, отвечающей требованиям технологии изготовления микросхем, покрываются пленками диэлектриков: двуокисью кремния (SiO_2) толщиной от 0,05 до 0,35 мкм, нитридом кремния (Si_3N_4) толщиной от 0,05 до 0,35 мкм, двуокисью кремния (верхняя пленка) толщиной от 0,5 до 1 мкм.

Пример условного обозначения

ККД 0,8 SiO₂

0,05 Si₃N₄

0,05 SiO₂

250 КЭФ 001

Кремниевая структура с комбинированным диэлектриком, подложка толщиной 250 мкм из кремния марки КЭФ 0,01, нижняя пленка дву-

окиси кремния и средняя пленка нитрида кремния толщиной 0,05 мкм, верхняя пленка двуокиси кремния толщиной 0,8 мкм.

Кремниевые эпитаксиальные структуры.

Для производства полупроводниковых ИМС широко используются эпитаксиальные кремниевые структуры. Кристаллическая структура эпитаксиального слоя представляет собой выскоженный монокристалл. Если слой и подложка изготовлены из одного и того же материала, такая структура называется эпитаксиальной. Если материал слоя отличается от материала подложки, структура называется *гетероэпитаксиальной*.

Пример условного обозначения однослойной эпитаксиальной структуры.

5 КЭФ 0,1
60-----
200 КЭС 0,01

Кремниевая эпитаксиальная структура диаметром 60 мм, с толщиной эпитаксиального слоя 5 мкм; материал эпитаксиального слоя - кремний марки КЭФ с удельным сопротивлением 0,1 Ом·см; толщина подложки 200 мкм, подложка из кремния марки КЭС с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см.

Пример условного обозначения двухслойных кремниевых эпитаксиальных структур

60 $\frac{5 \text{ КДБ } 0,03}{80 \text{ КМД } 2Б}$
50 КЭФ 5

Кремниевая эпитаксиальная структура диаметром 60 мм, с толщиной верхнего эпитаксиального слоя 5 мкм; верхний эпитаксиальный слой из кремния марки КДБ с удельным сопротивлением 0,03 Ом·см. Подложка толщиной 80 мкм из кремния марки КМД (моносилановый дюрочный) группы 2Б. Нижний эпитаксиальный слой толщиной 50 мкм из кремния марки КЭФ с удельным сопротивлением 5 Ом·см.

Часто для улучшения параметров элементов полупроводниковых ИМС между эпитаксиальным слоем и подложкой вводится так называемый скрытый слой.

Кремниевые эпитаксиальные структуры со скрытыми слоями

Пример условного обозначения

60 $\frac{10 \text{ КЭФ } 4,5/3,5 \text{ КЭС } 25}{320 \text{ КДБ } 10(11)}$

Кремниевая эпитаксиальная структура диаметром 60 мм, с толщиной эпитаксиального слоя 10 мкм; материал эпитаксиального слоя - кремний марки КЭФ с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см; толщина скрытого слоя 3,5 мкм; скрытый слой представляет собой кремний, легированный сурьмой, марки КЭС с поверхностным сопротивлением 25 Ом/кв; толщина эпитаксиальной структуры 320 мкм; подложка из кремния марки КДБ с удельным

сопротивлением 10 Ом·см и кристаллографической ориентацией в плоскости (111).

Кремниевые эпитаксиальные структуры с комбинированным диэлектриком.

Кремниевые эпитаксиальные структуры данного типа имеют на поверхности диэлектрическое покрытие, образованное чередующимися пленками двуокиси (SiO_2) и нитрида (Si_3N_4) кремния. Эпитаксиальный слой может иметь толщину от 0,5 до 3 мкм, концентрация примесей в нем может составлять от $1,5 \cdot 10^{15}$ до $1,5 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Диэлектрические пленки имеют толщину: нижняя (двуокись кремния непосредственно на эпитаксиальном слое) - от 0,05 до 0,3 мкм, средняя (нитрид кремния) - от 0,05 до 0,35 мкм, верхняя (двуокись кремния) - от 0,5 до 1 мкм. Структуры диаметром 40 мм имеют общую толщину 200 - 300 мкм.

Пример условного обозначения

КСКД0,5 SiO₂

$$\frac{0,05 \text{ Si}_3\text{N}_4}{0,05 \text{ SiO}_2} \cdot \frac{2 \text{ КЭФ } 1 \cdot 10^{16}}{250 \text{ КЭС } 0,01}$$

Кремниевая эпитаксиальная структура с комбинированным диэлектриком, подложка толщиной 250 мкм из кремния марки КЭС 0,01, эпитаксиальный слой толщиной 2 мкм из кремния КЭФ с концентрацией примеси $1 \cdot 10^{16}$ см⁻³, нижняя пленка двуокиси кремния и средняя пленка нитрида кремния толщиной 0,05 мкм, верхняя пленка двуокиси кремния толщиной 0,5 мкм.

Кремниевые гетероэпитаксиальные структуры.

Структуры данного типа представляют собой обычно сапфировую подложку толщиной - 250 мкм, на которой выращен гетероэпитаксиальный слой кремния толщиной от 2 до 20 мкм (для кремния n-типа электропроводности) или 0,6; 0,8; 1,2 мкм (для кремния p-типа электропроводности). Кристаллографическая ориентация гетероэпитаксиальных слоев - (100). Диаметр структур составляет 40 или 60 мм.

Пример условного обозначения

КНС 0,8 КЭФ 40
60С250

Структура типа кремний-на-сапфире (КНС) с гетероэпитаксиальным слоем кремния толщиной 0,8 мкм, электронного типа электропроводности, легированного фосфором с удельным сопротивлением 40 Ом·см. Подложка из сапфира диаметром 60 мм и толщиной 250 мкм.

Кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией элементов (КСДИ)

Кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией элементов микросхем представляют собой подложку из поликристаллического кремния, в которой по

заданной топологии размещены области монокристаллического кремния n -типа проводимости, изолированные диэлектриком. Монокристаллические области могут иметь ориентацию в плоскости (111) или (100) и содержать скрытый n^+ -слой, имеющий выход на поверхность структуры или расположенный только на дне изолированной области.

Условное обозначение КСДИ выражается дробью, в числителе которой первая двузначная цифра означает диаметр структуры в миллиметрах, а последующая двузначная цифра указывает на толщину монокристаллической области в микрометрах, включая толщину n^+ -слоя, если он содержится в структуре. Последующие буквенные обозначения в числителе указывают на марку монокристаллического кремния и кристаллографическую ориентацию (в круглых скобках). В квадратных скобках указывается наличие скрытого n^+ -слоя, выходящего на поверхность, и буквой Ф или М обозначается легирующая примесь (фосфор или мышьяк). Если скрытый n^+ -слой не имеет выхода на поверхность, эти данные располагаются в круглых скобках. В знаменателе дроби первая трехзначная цифра указывает на значение толщины структуры в микрометрах, затем общепринятыми химическими символами обозначается вид диэлектрика и допустимые пределы его толщины в микрометрах.

Пример условного обозначения
КСДИ 60 25 КЭФ 4,5(111) [n^+ - М]

300 SiO₂ 1,5-3,5

Кремниевая структура с диэлектрической изоляцией элементов диаметром 60 мм, толщиной монокристаллических областей 25 мкм из кремния марки КЭФ 4,5 с ориентацией в плоскости (111), содержащая выходящий на поверхность n^+ -слой, легируемый мышьяком. Толщина структуры 300 мкм, монокристаллические области изолированы двуокисью кремния толщиной 1,5 - 3,5 мкм.

В технологии производства полевых транзисторов с управляющим переходом металл - полупроводник используется арсенид галлия. Высокое удельное сопротивление нелегированного арсенида галлия позволяет создавать полуизолирующие подложки микросхем.

Монокристаллический арсенид галлия

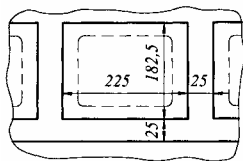
Условное обозначение монокристаллического арсенида галлия включает в себя следующую информацию: сокращенное наименование материала (буквы АГ), тип электропроводности (индексы: Э - электронный, Д - дырочный, П - полуизолирующий), обозначение легирующего элемента (Г - теллур, О - олово, С - сера, Ц - цинк), а также группы цифр, указывающих концентрацию основных носителей заряда. При этом первая цифра или группа цифр является множителем, а вторая группа цифр (через дефис) - показателем степени десятичного порядка. Арсенид галлия, выпускаемый для эпитаксиальных структур, имеет перед условным обозначением индекс Э.

1.3 Интегральный биполярный транзистор

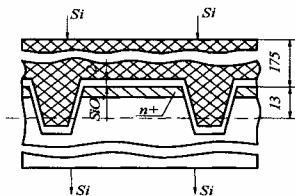
Для нормальной работы ИМС необходимо, чтобы элементы или группы элементов были размещены в электрически изолированных друг от друга областях. Эти области должны иметь следующие электрические и физические свойства: напряжение пробоя изоляции более высокое, чем напряжение питания ИМС, малую паразитную емкость, небольшие токи утечки, высокую теплопроводность, близость температурных коэффициентов резисторов (ТКР) изолирующей области и кремневой подложки, высокую радиационную стойкость, малую площадь. Изоляция элементов ИМС в пределах кристалла может быть решена при выполнении курсового проектирования в двух вариантах с помощью обратного смещения р-п перехода или с помощью изолирующего слоя SiO_2 . Дюдная изоляция технически достигается усложнением трехслойной транзисторной структуры (п-р-п или р-п-р) до четырехслойной п-р-п-р или р-п-р-п. Изоляция обеспечивается р-п переходом между подложкой и коллекторными областями элементов ИМС. При подаче отрицательного потенциала на подложку изолирующей р-п смещается в обратном на направлении и карманы п-типа в которых размещены элементы ИМС оказываются окруженными со всех сторон областями р-типа и изолированными друг от друга обратно смещенными р-п переходами, сопротивление которых по постоянному току велико. Характеристики изоляции могут ухудшаться за счет паразитных емкостей и токов утечки, особенно при работе на высоких частотах и в тяжелых эксплуатационных условиях. Метод дюдной изоляции получил широкое распространение.

Следующим, более совершенным видом изоляции, является изоляция с помощью слоя SiO_2 . Для ее реализации требуется большее число технологических операций. С помощью операции диффузии мышьяка на всей поверхности исходной групповой пластины п-типа кремния создается тонкий низкоомный слой p^+ -типа. С помощью фотолитографии и последующего травления образуются каналы глубиной 20 мкм (рис. 1.1, а), на поверхности пластины выращивается тонкий слой SiO_2 (около 2 мкм). На слой SiO_2 осаждают слой поликристаллического кремния (около 200 мкм), предназначенный в качестве механической основы. После удаления значительной части монокристаллического кремния с помощью шлифовки и полировки получают структуру изолированных карманов п-типа монокристаллического SiO_2 , вкрапленных через слой SiO_2 в поликристаллический кремний (рис. 1.1, б). Последующая структура интегрального транзистора образуется по планарной технологии с помощью избирательной диффузии бора для образования базовых областей (рис. 1.1, в) и операции избирательной диффузии фосфора для образования эмитерных областей и омических контактов к коллекторам (рис. 1.1, г). После избирательного травления поверхностного слоя SiO_2 для окон под контакты операции осаждения металла алюминия (Al) и последующего избирательного травления слоя (Al) образуется схема соединения элементов ИМС (рис. 1.1, д).

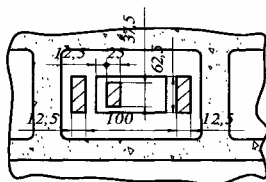
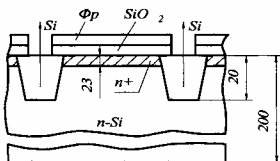
а



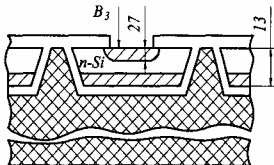
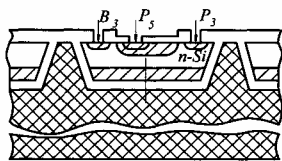
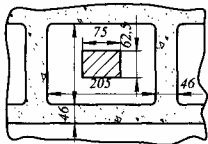
б



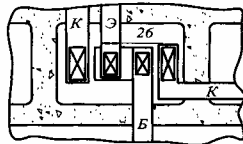
г



в



д



ИМС изготавливается по технологическим процессам, которые определяют типовые структуры в глубь кристалла для всех интегральных элементов. Типовые распределения примесей

в структуре интегральных биполярных транзисторов (ИБТ) с изоляцией с помощью р-п перехода и с помощью слоя представлены на рис. 1.2 и 1.3. Размеры ИБТ на плоскости кристалла определяются электрическими параметрами транзистора и должны быть по возможности минимальными, т.к. при этом увеличивается процент выхода годных элементов и степень интеграции проектируемой ИМС. Преобладающее влияние на размеры ИБТ оказывает рабочий ток (эмиттерный) транзистора. Оптимальная площадь эмиттерного перехода $S_{Эопт}$ определяется по формуле

$$S_{Опт} \approx \frac{5 \cdot W_b \cdot I_э}{q \cdot D_{nб} \cdot n_b} \quad (1.1)$$

где W_b - ширина базы ИБТ;

$I_э$ - рабочий ток эмиттера;

q - $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона;

$D_{nб}$ - коэффициент диффузии неосновных носителей (электронов) через базу, который для типовых структур (рис. 1.2 и 1.3) равен $12 \text{ см}^2/\text{с}$;

n_b - равновесная концентрация электронов в области базы.

Коэффициент диффузии для неосновных носителей определяется по формуле

$$D_{nб} = \frac{KT}{q} \cdot \mu_n \quad (1.2)$$

где $K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/Кл - постоянная Больцмана;

T - температура в градусах Кельвина;

μ_n - подвижность электронов в базе определяемая в зависимости от концентрации примесей в области базы по графику на рис. 1.4.

Размеры $S_{Эопт}$ часто оказываются трудно реализуемыми из-за ограничений в возможностях технологических процессов. При получении линейных размеров элементов (b) по планарной технологии $b_{техн}$ оказывается равной 5 мкм . По этой причине минимальный размер окна в оксиде для контакта составляет $12,5 \times 12,5 \text{ мкм}^2$ минимальное расстояние от контактного окна до края диффузионной области - $6,25 \text{ мкм}$. Минимальный размер эмиттерной области составляет $25 \times 25 \text{ мкм}^2$. При таком размере точность воспроизведения площади эмиттерных областей будет определяться величиной

$$\frac{\Delta S_э}{S_э} = 2 \cdot \frac{\Delta b}{b} = 2 \cdot \frac{5}{25} = 0,4 = 40\% \quad (1.3)$$

что может явиться причиной значительного разброса в параметрах ИБТ. Поэтому следует считать максимальный рабочий размер эмиттера $25 \times 35 \text{ мкм}$. Этот размер является типовым для ИБТ с рабочим током эмиттера до $10\text{-}20 \text{ мА}$. Характеристики ИБТ в значительной степени зависят от размеров различных областей транзистора. Необходимо учитывать, что периметр эмиттера определяет токовые характеристики транзистора, площадь эмиттера - частотные характеристики, площадь базы - емкость перехода база-коллектор и

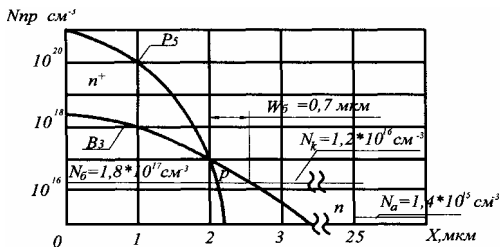


Рис. 1.2. Типовое распределение примесей в структуре ИБТ с изоляцией с помощью р-п перехода

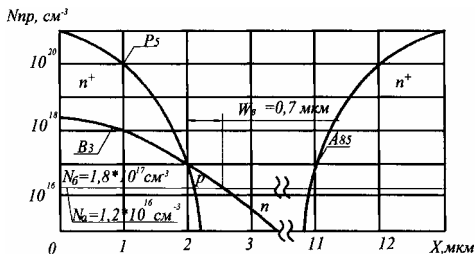


Рис. 1.3. Типовое распределение примесей в структуре ИБТ с изоляцией с помощью слоя двуокиси кремния

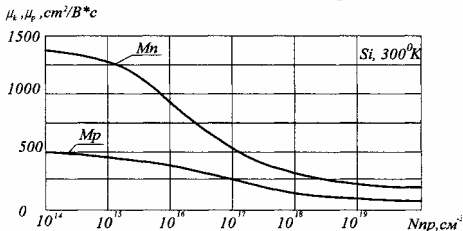


Рис. 1.4. Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примесей в области базы

распределение сопротивления базы, площадь коллектора - емкость перехода коллектор-подложка и последовательное сопротивление коллектора. В микро-мощных (до 0,3 мВт) и маломощных (до 3 мВт) ИМС размеры всех областей транзистора стремятся выполнить минимальными, хотя это и может привести к снижению выхода годных изделий. Для микро-мощных схем наиболее пригодна полосковая конструкция транзистора (рис. 1.5, а). Для получения малого сопротивления коллектора применяют транзисторы с увеличенной контактной областью к коллектору (рис. 1.5, б), малого сопротивления базы и высокого коэффициента усиления используют конструкции с двумя контактами к базовой области (рис. 1.5, в). Многоэмиттерные транзисторы (рис. 1.5, г) применяют во входных цепях схем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Конструкция на рис. 1.5. д используется при формировании двух и более транзисторов, имеющих одинаковый потенциал на коллекторе. Топологию мощного транзистора (более 3 мВт) разрабатывают так, чтобы обеспечить максимальное отношение периметра эмиттера и его площади. Размеры базовой области и области коллектора ИБТ определяются через размер эмиттерной области с учетом числа базовых контактов и конфигурации омического контакта к коллектору.

Основными электрическими параметрами ИБТ являются:

- 1) $I_3(U_{ЭБ})$ - зависимость тока эмиттера от напряжения эмиттер-база ($U_{ЭБ}$);
- 2) коэффициенты усиления по току в режиме общая база (ОБ) - α_0 общий эмиттер (ОЭ) - β_0 и его зависимость в диапазоне частот - $\beta(f)$;
- 3) $U_{кн}$ - падение напряжения на коллекторе в режиме насыщения;
- 4) $U_{пр}$ - напряжение пробоя коллектора в режиме ОЭ.

Зависимость $I_3(U_{ЭБ})$ определяется по формуле (1.4) и показана на рис. 1.6.

$$I_3 = \frac{2q \cdot S_3 \cdot D_{n6} \cdot n_6}{W_6} \cdot e^{qU_{ЭБ}/kT} \quad (1.4)$$

где S_3 - активная площадь перехода эмиттер-база,

n_6 - концентрация электронов в базе, определяемая по выражению (1.5)

$$n_6 = \frac{n_i^2}{p_6} \quad (1.5)$$

где p_6 - концентрация дырок в базе, определяемая из графика на рис. 1.2 и 1.3;

n_i - концентрация собственных носителей заряда в полупроводнике при заданной температуре. При $T=300\text{ К}$ для кремния $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Для кремния n_i^2

определяется по формуле

$$n_i^2 = 2,33 \times 10^3 \cdot T^{3,17} \cdot e^{-1,317/kT} \quad (1.6)$$

Характеристика $I_3(U_{ЭБ})$ имеет явно выраженное напряжение отсечки U_0 , которое определяет ощутимую по току инжекцию электронов в базу. Напряжение отсечки U_0 ориентировочно определяет падение напряжения при прямом включении на переходе эмиттер-база ($U_{ЭБ}$), которое для ИБТ составляет величину в пределах 0,6-0,7 В.

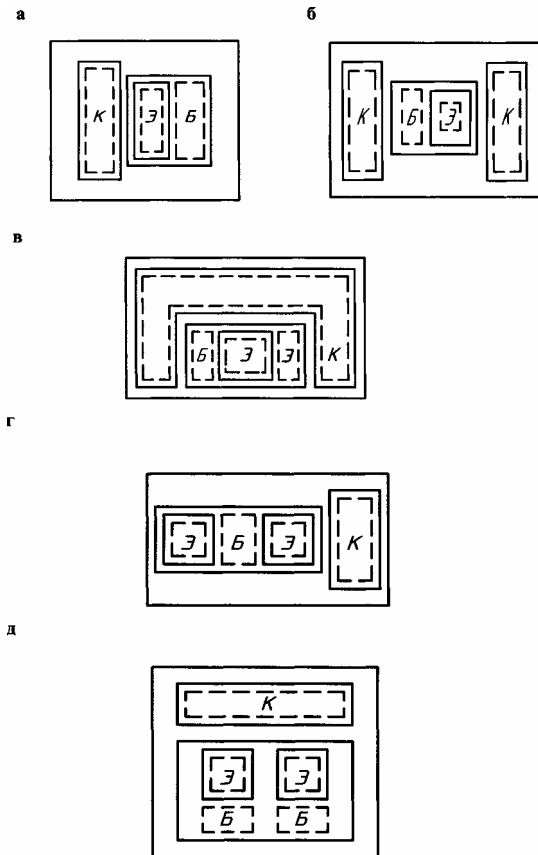


Рис. 1.5. Примеры топологии интегральных биполярных транзисторов

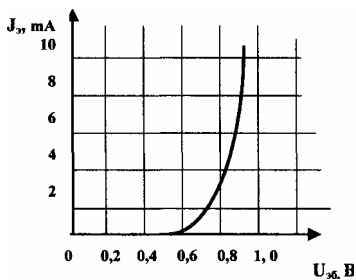


Рис. 1.6. Зависимость тока эмиттера ИБТ от напряжения эмиттер-база

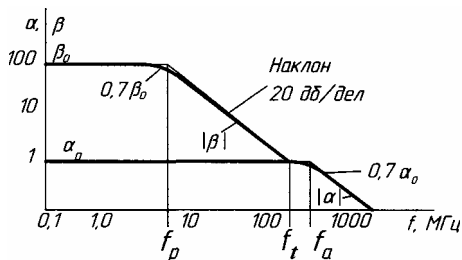


Рис. 1.7. Частотная зависимость коэффициентов усиления по току для планарных ИБТ в режиме ОЭ и ОБ

Напряжение отсечки определяется (для ступенчатых переходов) по формуле

$$U_0 \approx \frac{KT}{q} \cdot \ln \frac{N_D \cdot N_A}{n^2} \quad (1.7)$$

где N_D и N_A соответственно концентрация примеси на переходе.

Для ИБТ $N_D = N_A = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $T = 293 \text{ К}$.

Коэффициент усиления по току в режиме планарных ИБТ определяется как

$$\frac{1}{\beta_0} \approx \frac{R_{с\lambda\text{Э}}}{R_{с\lambda\text{Б}}} + \frac{1}{4} \left(\frac{W_{\text{б}}}{\alpha_{\text{нб}}} \right)^2 \quad (1.8)$$

где $R_{с\lambda\text{Э}}$ и $R_{с\lambda\text{Б}}$ фиксированы типовым распределением примеси (рис. 1.2 и 1.3) и равны 2,5 Ом и 200 Ом; $N_{\text{б}}$ - диффузионная длина неосновных носителей (электронов) в базе для типовых ИБТ $\alpha_{\text{нб}} = 4 \text{ мкм}$.

Коэффициент усиления по току в режиме ОБ равен

$$\alpha_0 = \beta_0 / (1 + \beta_0) \quad (1.9)$$

С увеличением рабочей частоты α_0 и β_0 уменьшаются согласно рис. 1.7. Характер этих зависимостей в логарифмическом масштабе хорошо аппроксимируется прямыми с учетом фиксированных частот $f_{\text{Э}}$ и f_{T} , между которыми существует соотношение

$$f_{\text{T}} = f_{\text{Э}} / (1 + m), \quad (1.10)$$

где f_{T} - частота, при которой модуль коэффициента усиления в схеме с ОЭ равен 1 ($|P| = 1$); $f_{\text{Э}}$ - частота, при которой модуль коэффициента усиления по току в схеме с ОБ равен 0,7 от уровня ($|a| = 0,7 a_0$); величина $m = 0,4$.

Граничная частота $f_{\text{Э}}$ определяется по формуле

$$\frac{1}{f_{\text{Э}}} = 2\pi \left(r_{\text{Э}} \cdot C_{\text{Э}} + \frac{W_{\text{б}}^2}{5D_{\text{нб}}} + \frac{W_{\text{об}}}{V_0} + r_{\text{кв}} \cdot C_{\text{к}} \right), \quad (1.11)$$

где $r_{\text{Э}} = \frac{KT}{q} \cdot \frac{1}{I_{\text{Э0}}}$, сопротивление эмиттера в режиме малого сигнала,

$$C_{\text{Э}} = S_{\text{Э}} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot q \cdot N_{\text{б}}}{2U}}, \text{ диффузионная емкость эмиттер-базового перехода}$$

в прямом смещении; $W_{\text{об}}$ и V_0 - обедненный подвижными носителями слой ба-

за-коллекторного перехода и скорость пролета электрона через обедненный слой $V_0 = 8,5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$; $r_{\text{кв}}$ и $C_{\text{к}}$ - сопротивление коллекторного вывода и емкость, состоящая из емкости изолирующего перехода коллектор-подложка и емкости обедненного слоя база-коллектор.

Расчет сопротивления коллекторного вывода зависит от структуры ИБТ. Для ИБТ с изоляцией с помощью р-п перехода коллекторной области хорошо моделируется через трапециевидные области и $r_{\text{кв}}$ определяется по формуле (1.12)

$$r_{\text{кв}} = \frac{1}{2/r_{\text{к1}} + 2/r_{\text{к2}}} \quad (1.12)$$

где r_{k1} и r_{k2} - сопротивления трапецидальных областей коллектора;

$$r_{k1} = \rho_k \cdot \frac{I_k - I_{\mathcal{E}}}{W_k(b_k - b_{\mathcal{E}})}$$

$$r_{k1} = \rho_k \cdot \frac{b_k - b_{\mathcal{E}}}{W_k(I_k - I_{\mathcal{E}})}$$

ρ_k - удельное сопротивление коллекторной области для типового распределения примесей (рис. 1.2) и составляет $\rho_k = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Для ИБТ, изображенного на рис. 1.1, растекание тока в коллекторной области происходит под действием низкоомного слоя. В этом случае r_{k1} определяется по формуле (1.13)

$$r_{k\text{об}} = r_{k1} + \frac{1}{2} \cdot r_{k2} \quad (1.13)$$

$$r_{k1} = \rho_r \cdot \frac{W_k}{(I_{\mathcal{E}} + W_k) \cdot (b_{\mathcal{E}} + W_k)}$$

$$r_{k1} = \rho_r \cdot \frac{W_k}{(I_k + W_k) \cdot (b_{\mathcal{E}} + W_k)}$$

где r_{k1} и r_{k2} - соответственно сопротивления трапецидальной области под эмиттером и под коллекторным выводом, W_k - зазор между низкоомным захороненным слоем и выводом коллектора.

Величина обедненного слоя база-коллекторного перехода определяется по формуле

$$W_{\text{об}} = \sqrt{[\varepsilon_0 \varepsilon \cdot (U_0 + U_{KB})] / (a \cdot q)} \quad , \quad (1.14)$$

где ε_0 и ε - соответственно диэлектрическая постоянная вакуума и кремния ($\varepsilon = 12$); U_{KB} - внешнее напряжение на переходе коллектор-база; U^*_{0} - контактная разность потенциалов на переходе коллектор-база, ориентировочно может определяться по формуле (); $a = dN/dX$ - градиент концентрации примесей на переходе, определяемый из графика рис. 1.2 и 1.3. Емкость обратно смещенного перехода определяется по формуле для емкости плоского конденсатора

$$C_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S_n}{W_{\text{об}}}$$

По этой формуле определяются емкости переходов коллектор-база C_{KB} и коллектор-подложка C_{KB} . При расчете для структуры с изоляцией p-n перехода следует учитывать неодинаковую величину обедненного слоя на границе подложка-эпитаксиальный слой и на боковых границах за счет изолирующей диффузии. Величина $W_{\text{об}}$ для плавного перехода определяется по формуле (1.14), а для ступенчатого как (1.15)

$$W_{06} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(U_0 + U_n)}{q \cdot N}}, \quad (1.15)$$

где U_n - внешнее напряжение на переходе; N - концентрация примесей со слаболегированной областью. В случае изоляции ИБТ с помощью SiO_2 (рис. 1.1) паразитная емкость состоит из емкости $C_{\text{Сб}}$ и емкости изолирующего слоя SiO_2 ($C_{\text{из}}$), которая определяется

$$C_{\text{из}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S_{\text{кп}}}{d}$$

где 8 - относительная диэлектрическая постоянная для двуокиси кремния равна 4, ad - толщина слоя SiO_2 составляет 2 мкм.

Основным параметром ИБТ в режиме переключения является падение напряжения на коллекторе при насыщении и для транзистора равно (1.16)

$$U_{\text{кэп}} = -\frac{KT}{q} \cdot \ln \frac{\alpha_1 \left(1 - \frac{I_k}{\beta \cdot I_S}\right)}{1 + \frac{I_k}{I_p} (1 - \alpha_1)} + r_{\text{кп}} \cdot I_{\text{кп}}, \quad (1.16)$$

где α_1

- коэффициент усиления в режиме ОБ при инверсном включении ($\alpha_1 = 0,1$), I_k и I_p - токи коллектора и базы. Необходимо отметить, что в режиме насыщения величина $(I_k / (\beta \cdot I_S)) < 1$. Электрическая прочность ИБТ определяется электрической прочностью рабочих p-n переходов, а также комбинации переходов. Напряжение пробоя определяется величиной концентрации примесей в обедненном слое N_{06} . При расчете электрической прочности перехода принимают во внимание лишь концентрацию примесей на переходе со стороны слаболегированной области. Зависимость $U_{\text{пркб}}$ от N_{06} для ступенчатого кремниевого перехода показана на рис. 1.8. Для плавного перехода, который характеризуется градиентом концентрации примеси в обедненном слое ($a = dN/dX$), зависимость пробивного напряжения от величины «а» показана на рис. 1.9. Пробивное напряжение между коллектором и эмиттером $U_{\text{кэпр}}$ зависит от внешнего сопротивления в цепи база-эмиттер R_{65} и определяется как $U_{\text{кэпр}} \approx U_{\text{кэпр}} \text{ при } R_{65} \approx 0$.

$$U_{\text{кэпр}} \approx U_{\text{кэпр}} / \sqrt[3]{\beta_0} \text{ при } R_{65} \rightarrow \infty$$

где $U_{\text{кэпр}}$ пробивное напряжение перехода коллектор-база.

После выбора физической структуры выбирают конфигурацию транзистора. Поскольку характеристики в значительной степени зависят от размеров различных областей транзистора, нужно учитывать, что пример эмиттера определяет токовые характеристики транзистора, площадь эмиттера - частотные характеристики, площадь базы - емкость перехода база - коллектор и распределенное сопротивление базы, площадь коллектора - емкость перехода коллектор - подложка и последовательное сопротивление коллектора

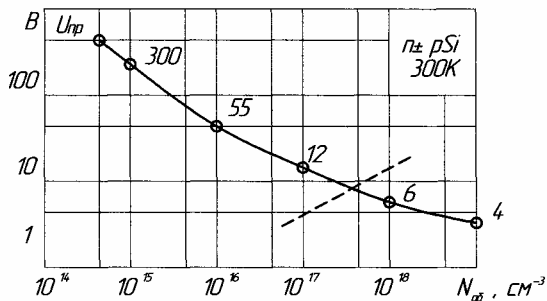


Рис. 1.8. Зависимость электрической прочности перехода юллектор-база от концентрации примесей в обедненном слое для ступенчатого перехода

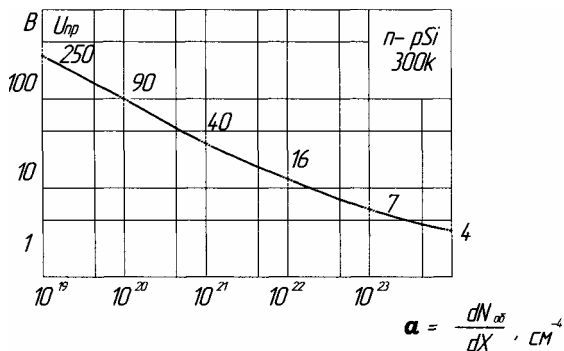


Рис. 1.9. Зависимость электрической прочности перехода юллектор-база от градиента юнцентрации в обедненном слое

В мало мощных ($0,3 < P < 3$ мВт) и микро мощных ($1 < P < 300$ мкВт) цифровых ИМС размеры всех областей транзистора стремятся выполнить минимальными, на пределе возможностей технологии, хотя это может привести к снижению выхода годных изделий.

Обычно анализируют несколько типовых конфигураций транзисторов которые представляют собой банк данных для биполярных транзисторов (приложение 1). На рисунке сплошными линиями обозначены границы диффузионных областей, а пунктирными - границы вскрытия окон в пленке двуокиси кремния для последующего формирования металлических контактов. Для микро мощных схем наиболее пригодны полосковые конструкции транзисторов (приложение 1): для одноэмиттерных (рис. П1, а-ж), многоэмиттерных (рис. П1, з-л) и с общим коллектором (рис. П1, м).

Взаимное расположение контактов в различных областях транзисторной структуры выбирают в зависимости от конкретного топологического рисунка микросхемы и удобства расположения выводов транзистора. Если необходимо получить малое сопротивление коллектора применяют транзисторы с увеличенной юнктажной областью к коллектору (рис. П1, б, г-ж). Для получения малого сопротивления базы и высокого коэффициента усиления используют конструкции с двумя контактами к базовой области (рис. П1, ж). Многоэмиттерные транзисторы (рис. П1, з-к) применяют во входных цепях схем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Конструкция показанная на рис. П1, м, используется при формировании двух (или более) транзисторов, имеющих одинаковый потенциал на коллекторе.

Транзисторы средней ($3 < P < 25$ мВт) и большой ($25 < P < 250$ мВт) мощности работают в режимах высоких плотностей эмиттерного тока ($200 - 3000$ А/см²). Поэтому в мощных схемах целесообразны узкие эмиттеры с большим периметром.

Топологию мощного транзистора разрабатывают так, чтобы обеспечить максимальное отношение периметра эмиттера к его площади. Это значительно увеличивает активную область транзистора и обеспечивает достаточно большой рабочий ток без увеличения размеров всей структуры.

1.4. Интегральные полупроводниковые резисторы

1.4.1. Классификация полупроводниковых резисторов и их характеристики

Резисторы полупроводниковых интегральных микросхем (ПИМС) формируются на основе слоев, полученных диффузией (диффузионные резисторы), эпитаксиальным наращиванием или ионным легированием. Типичные характеристики резисторов приведены в табл. 1.1, а их конструкции представлены на рис. 1.10.

Диффузионный резистор на базовом р-слое (рис. 1.10, а) является более распространенным, чаще всего используемым в составе ИМС. Типичные значения ширины резистора $b = 5,0 - 15$ мкм, длины $L = 0,1 - 1,0$ мм, диапазон номиналов от 100 Ом до 20 Юм. Разброс значений номиналов резисторов в схеме может быть достаточно велик, однако на практике можно получить погрешность отклонения номинальных значений ($\Delta R/R$) порядка $\pm 3\%$ и менее. Эта особенность характерна для всех полупроводниковых резисторов и во многом зависит от качества разработки топологии микросхем.

Диффузионный резистор на эмиттерном слое (рис. 1.10, б) применяется в тех случаях, когда не необходим резистор малого номинала, а также используется для создания на его основе диффузионной перемычки, реализующей избежание пресечения плечочных проводников в полупроводниковой ИМС. Резистор, выполняемый на n^+ -слое, т.е. сильно легированной донорами области полупроводника, имеет малое электрическое сопротивление. Диапазон номиналов в этом случае составляет 0,5 - 100 Ом.

Пинч-резистор, конструкция которого показана на рис. 1.10, в, так как и предыдущие, формируются с помощью диффузии, поэтому он может быть отнесен к диффузионным. При протекании через резистор тока, на его контактах имеется некоторая разность потенциалов, n -слой, который используется для поджатия, т.е. уменьшения толщины резистора, соединяют с помощью металлизации с тем контактом, который имеет более высокий потенциал. Тем самым на n^+ -слой подают напряжение обратного смещения, и обратнсмещенный n^+ -р переход поджимает толщину резистора на р-слое. Пинч-резисторы используются для изготовления резисторов с высокими номиналами сопротивления $R > 50 - 60$ кОм и до сотен кОм. Высокие номиналы таких резисторов обеспечиваются малой площадью сечения (малой толщиной) среднего участка тела резистора, которая находится на некотором удалении от поверхности полупроводника, на глубине залегания n^+ -области, и слабо легирована акцепторной примесью.

Недостатками пинч-резистора являются такие характеристики как повышенная погрешность $(\Delta R/R) > \pm 50\%$ из-за неравномерной толщины тела резистора, большой температурный коэффициент сопротивления (ТКС) из-за невысокой степени легирования слоя резистора, нелинейность вольт-амперной характеристики (ВАХ) при напряжении $U > 1 - 1,5$ В (по аналогии с полевым транзистором), а

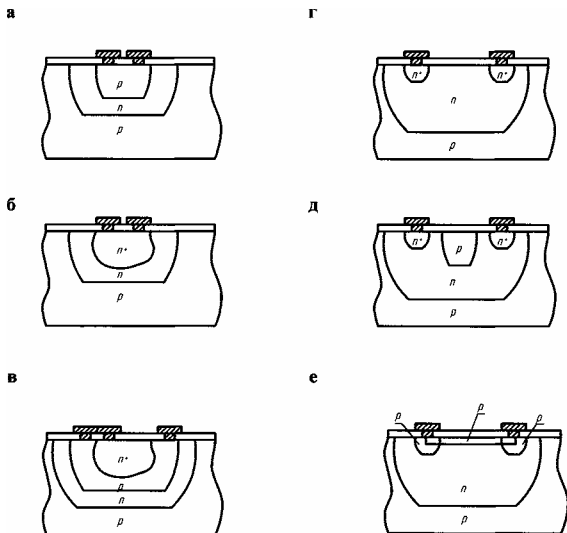


Рис. 1.10. Конструкции полупроводниковых резисторов: а - диффузионного на базовом слое; б - диффузионного на эмиттерном слое; в - пинч-резистора; г, д - эпитаксиального (соответственно обычного эпитаксиального и пинч-резистора); е - ионно-легированного

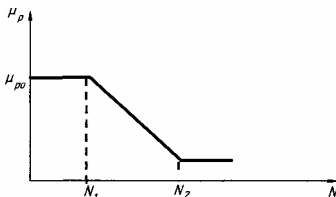


Рис. 1.11. Характеристика зависимости подвижности дырок от концентрации примеси в кремнии

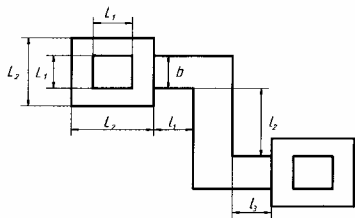
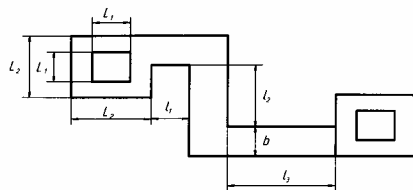
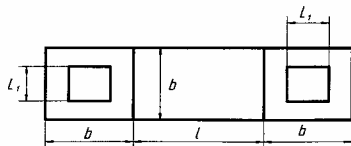
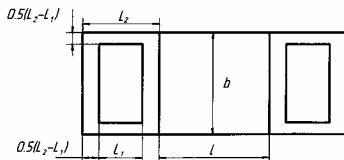
а**б****в****г**

Рис. 1.12. Конфигурация диффузионных резисторов. L_1 - размер контактного окна, L_2 - размер контактной области

также невысокое напряжение пробоя $U_{прб} = 5-7$ В, как у перехода эмиттер-база.

Диффузионный резистор на базовом р-слое (рис. 1.10, а) является более распространенным, чаще всего используемым в составе интегральных микросхем (ИМС). Типичные значения ширины резистора $b = 5,0 - 15$ мкм, длины $L = 0,1 - 1,0$ мм, диапазон номиналов от 100 Ом до 20 кОм. Разброс значений номиналов резисторов в схеме может быть достаточно велик, но на практике удается получить погрешность отклонения номинальных значений ($\Delta R/R$) порядка $\pm 3\%$ и менее. Эта особенность характерна для всех полупроводниковых резисторов во многом зависит от качества разработки топологии ИС.

Конструкции полупроводниковых резисторов на эпитаксиальном слое представлены на рис. 1.10, г. Эпитаксиальный слой выполняет в транзисторе роль коллектора и слабо легирован. Концентрация легирующей примеси в нем постоянна по объему в отличие от диффузионных резисторов. В конструкции, показанной на рис. 1.10, г, площадь сечения уменьшена за счет его поджата р-слоем. В сущности, это есть пинч-резистор на эпитаксиальном слое вопитие от пинч-резистора рис. 1.10, в, где он реализован на базовом слое. Необходимая конфигурация резисторов на эпитаксиальном слое обеспечивается с помощью достаточно продолжительной разделительной диффузии, проводимой на всю глубину эпитаксиального слоя. Погрешность номинала $\Delta R/R$ таких резисторов может быть несколько выше (до $\pm 25\%$), чем у резисторов на базовом слое, что объясняется трудностью регулирования их номинала из-за наличия боковой диффузии под окисел, особенно при толщине эпитаксиальной пленки более 5,0 мкм (боковой уход примеси может составлять 60 - 80 % от толщины эпитаксиального слоя). Резисторы имеют большой ТКС и большие номиналы сопротивления, как правило, десятки и сотни кОм.

Резистор, полученный ионным легированием на р-слое, показан на рис. 1.10, е. Метод ионного легирования позволяет изготавливать такие резисторы малой толщины и с регулируемой концентрацией примеси как на р-, так и на п-слоях. Номиналы их сопротивления обычно составляют десятки и сотни кОм. Они имеют достаточно высокую точность ($\Delta R/R = \pm (15 - 20)\%$), сравнимую с точностью пленочных резисторов, что объясняется особенностями метода ионного легирования. Контактные р-области ионного легированного резистора получают с помощью диффузии, так как без их наличия трудно создать надежные контакты к тонкому р-слою, полученному ионным внедрением примеси в полупроводник (рис. 1.10, е)

1.4.2. Расчет диффузионных резисторов

Представим номинальное значение объемного электрического сопротивления резистора как

$$R = \rho_v \cdot \frac{l}{S}$$

где ρ_v - удельное объемное сопротивление резистора; l - длина пути электрического тока, протекающего через резистор; S - сечение тела резистора.

Известно, что

$$\rho_v = \frac{1}{\sigma} = (en_q\mu_q + en_n\mu_n)^{-1}$$

где a - удельная электропроводность; e - заряд электрона; n_p, n_n, μ_p, μ_n соответственно концентрации и подвижности дырок и электронов. При $N_D \gg N_A$, т.е. когда концентрации доноров значительно больше концентрации акцепторов, справедливо выражение

$$\rho_v \approx \rho_{nV} = (en_n\mu_n)^{-1}$$

Аналогично при $N_A \gg N_D$

$$\rho_v \approx \rho_{pV} = (en_p\mu_p)^{-1}$$

Так как $S = X_{\text{диф}} \cdot b$, где $X_{\text{диф}}$ - глубина (толщина) диффузионного слоя, являющегося телом резистора, а b - ширина тела резистора, то для диффузионного резистора можно записать (1.18)

$$R = \frac{\rho_v}{X_{\text{диф}}} \cdot \frac{1}{b}$$

где ρ_v - среднее удельное объемное сопротивление диффузионного слоя; l и b - длина и ширина участка поверхности, на котором проводилась диффузия.

Отношение $\rho_v / X_{\text{диф}}$ обозначим через ρ_s , где ρ_s - сопротивление участка диффузионного слоя определенной толщины, заключенного между противоположными сторонами квадрата. Размерность ρ_s - Ом и условно размерность ρ_s обозначают как Ом/.

Тогда (1.18) перепишем как (1.19)

$$R = \rho_s \cdot \frac{1}{b}$$

Таким образом, чтобы задать R , необходимо задать значения ρ_s, l, b .

Запишем выражение для среднего удельного объемного сопротивления диффузионного слоя (легированного примесью р-типа)

$$\rho_v = [e\mu(N) \cdot N(x)]^{-1}, \quad (1.20)$$

где $\mu(N)$ - усредненное по концентрации примеси значение подвижности;

$N(x)$ - усредненное по толщине диффузионного слоя значение концентрации примеси.

Подсчитаем выражения $\mu(N), N(x)$

$$\overline{\mu(N)} = \int_{N_1}^{N_2} \mu(N) \frac{dN}{(N_2 - N_1)}$$

$\mu(N)$ может быть аппроксимировано выражениями (1.21) по рис. 1.11

$$\mu(N) = \mu_{p0} \text{ при } N \leq N_1 \quad (1.21)$$

$$\overline{\mu(N)} = \mu_{p0} \left[1 - \lambda \ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right] \text{ при } N_1 \leq N \leq N_2$$

Для типовых транзисторных структур

$$N_k = N_1 = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}, N_{S\delta} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$$\lambda = 0.115; \mu_{p0} = 480 \frac{\text{см}^2}{\text{Вс}}$$

С учетом выражения для $N(x)$, получаемого при базовой диффузии

$$N(x) = \int_0^{x_{\text{диф}}} N(x) \frac{dx}{X_{\text{диф}}} = \frac{1}{X_{\text{диф}}} \cdot \int_0^{x_{\text{диф}}} N_s \cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}} dx$$

или

$$N(x) = \frac{1}{X_{\text{диф}}} \cdot N_s \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\left(\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} d\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \cdot 2\sqrt{Dt}$$

или

$$N(x) = \frac{N_s \sqrt{\pi Dt}}{X_{\text{диф}}} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\left(\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} d\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Поскольку

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\left(\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} d\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = \text{erf}\left(\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$N(x)$ примет окончательный вид

$$\overline{N}(x) = \frac{N_s \sqrt{\pi Dt}}{X_{\text{диф}}} \cdot \text{erf}\left(\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1.22)$$

Подставляя (1.21) и (1.22) в (1.20), получаем

Тогда

$$\overline{\rho}_v = \left[e\mu_{p0} \cdot \left(1 - \lambda \cdot \ln \frac{N_2}{N_1} \right) \cdot N_s \cdot \sqrt{\pi Dt} \cdot \text{erf}\left(\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]^{-1} \cdot X_{\text{диф}}$$

$$\overline{\rho}_s = \frac{\rho_v}{X_{\text{диф}}} = \left[e\mu_{p0} \cdot \left(1 - \lambda \cdot \ln \frac{N_2}{N_1} \right) \cdot N_s \cdot \sqrt{\pi Dt} \cdot \text{erf}\left(\frac{x_{\text{диф}}}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]^{-1}$$

Для базовой диффузионной области

$$\bar{\rho}_{ss} = \left[\epsilon \mu_{p0} \cdot \left(1 - \lambda \cdot \ln \frac{N_{ss}}{N_k} \right) \cdot N_{ss} \cdot \sqrt{\pi D_s t_s} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{X_{\text{дио}}}{2\sqrt{D_s t_s}} \right) \right]^{-1} \quad (1.23)$$

1.4.3. Расчет ширины и длины резистора

Исходными данными для определения геометрических размеров резистора являются: номинал R и допуск на номинал $\gamma_R = \Delta R/R$, удельное поверхностное сопротивление ρ_s , средняя мощность рассеяния P , допустимая мощность рассеяния $P_0 = 1-5$ Вт/мм², минимальный габаритный размер резистора, определяемый разрешающей способностью технологии, температурный диапазон работы резистора: T_{MAX} и T_{MIN} , а также другие конструкторско - технологические ограничения и рекомендации для проектирования. В соответствии с номиналом R выбирается определенная конфигурация резистора. Для высокоомных резисторов (1-10 кОм) рекомендуются конфигурации, приведенные на рис. 1.12, а,б, для низкоомных резисторов (50-200 Ом) - конфигурация, показанная на рис. 1.12,г, для резисторов с номиналом от 200 Ом до 1 кОм - конфигурация, соответствующая изображенной на рис. 1.12, в.

Расчет резисторов начинают с определения ширины резистора. За расчетное значение ширины резистора $b_{\text{рас}}$ принимают наибольшее значение из значений $\{b_{\text{тех}}, b_{\text{ПВ}}, b_p\}$, где $b_{\text{тех}}$ - минимальная технологическая ширина резистора, $b_{\text{тех}} > (4-5)$ мкм; b_p - ширина, определяемая мощностными характеристиками резистора; b определяют в соответствии существующими допусками. Таким образом, $b_p > \{b_{\text{тех}}, b_{\text{ПВ}}, b_p\}$.

Полная относительная погрешность величины сопротивления определяется суммой погрешностей $\gamma_R = \gamma_{K_\Phi} + \gamma_{\rho_s} + \gamma_T$, что соответственно важно представить как

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta K_\Phi}{K_\Phi} + \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} + \alpha_R \cdot \Delta T, \quad (1.24)$$

где K_Φ - коэффициент формы резистора, определяемый как

$$K_\Phi = \frac{l}{b} = \frac{R}{\rho_s}, \quad \gamma_{K_\Phi} = \frac{\Delta K_\Phi}{K_\Phi} \text{ есть относительная погрешность коэффициента}$$

формы резистора; $\gamma_{\rho_s} = \Delta R/R$ - относительная погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления (для типовых технологических процессов планарно-эпитаксиальной технологии она обычно составляет 0,05-0,1; α_R температурный интервал работы резистора, определяемый как $\Delta T = T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}$; относительная температурная погрешность $\gamma_T = \alpha_R \cdot \Delta T$. Находят относительную погрешность коэффициента формы

$$\gamma_{R_s} = \frac{\Delta K_\Phi}{K_\Phi} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - \alpha_R \cdot \Delta T \quad (1.25)$$

после чего определяют (1.26)

$$b_{\text{точн}} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K_{\Phi}}}{\gamma_{K\Phi}}, \quad (1.26)$$

где Δb и Δl - абсолютные погрешности ширины и длины резистивной полоски, обусловленные точностью технологического процесса. Обычно эти погрешности составляют 0,05 - 0,5 мкм.

Ширина, определяемая мощностными характеристиками резистора, находится из выражения (1.27)

$$b_p = \sqrt{\frac{P \cdot \rho_s}{P_0 \cdot K_{\Phi}}} \quad (1.27)$$

Таким образом, из трех значений $b_{\text{охв}}$, $b_{\text{охв}}$, b_p наибольшее и будет $b_{\text{ре}}$. Далее определяют топологическую ширину резистора $b_{\text{топ}}$, так как ее значение используется при проектировании топологического чертежа. Однако при определении $b_{\text{охв}}$ учитывают изменения спроектированных размеров после изготовления резисторов (у реального резистора ширина больше, чем у спроектированного), а также возможность упрощения самой процедуры проектирования, в частности, $b_{\text{топ}} = b_{\text{ре}} - 2(\Delta_{\text{трав}} + \Delta y)$, где $\Delta_{\text{трав}}$ - погрешность, вносимая растраниванием окон перед диффузией, в процессе фотолитографии; Δy - погрешность, вносимая уходом диффузионного слоя под маскирующий окисел в боковые стороны; $\Delta_{\text{трав}} = 0,1-0,3$ мкм; $\Delta y = 0,5-0,7$ мкм.

Окончательно за $b_{\text{топ}}$ принимаются ближайшие к вычисленным целые значения, кратные шагу координатной сетки.

Чтобы максимально уменьшить погрешность номинала резистора, определяют реальную ширину резистора $b_{\text{реал}} = b_{\text{топ}} + 2(\Delta_{\text{трав}} + \Delta y)$. После этого определяют расчетную длину резистора (1.28)

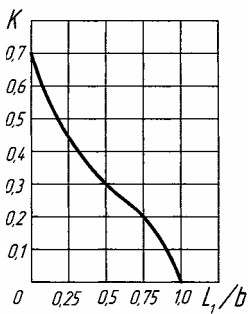
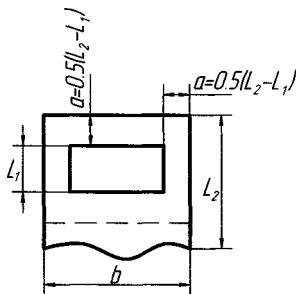
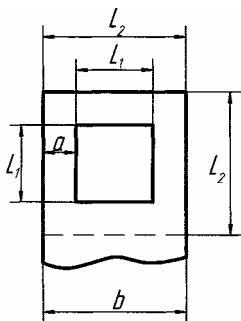
$$l_{\text{ре}} = b_{\text{реал}} \cdot (K_{\text{т}} \cdot n \cdot K), \quad (1.28)$$

где n - количество контактных окон у резистора, обычно $n = 2$; K - поправочный коэффициент, учитывающий сопротивление, обусловленное растеканием электрического тока у контактных областей резистора. K определяется из номограмм $K(L_1 / b)$, $K(L_2 / b)$, $K(b/L_2)$ при заданных соотношениях $L_1 : b$ и $L_1 : L_2$ на рис. 1.12, а - г соответственно для иных конструкций контактных областей резисторов; L_1 и L_2 - размеры контактных областей (рис. 1.13 и 1.14).

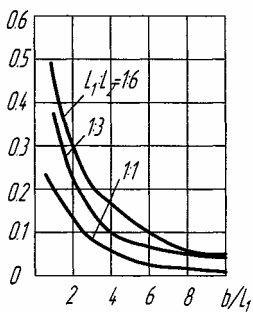
Если резистор изогнут, либо имеет форму меандра, то его расчетная длина определяется из соотношения

$$l_{\text{рас}} = b_{\text{реал}} \cdot \left(\frac{R}{\rho_s} - n_1 K_1 - n_2 K_2 - \dots - n_i K_i - N_{\text{изг}} \cdot 0,55 \right), \quad (1.29)$$

где $N_{\text{изг}}$ - количество изгибов в резисторе под углом $\pi/2$; n - число контактных окон



а



б

Рис. 1.13. Значения коэффициентов K для расчета высокоомных диффузионных резисторов

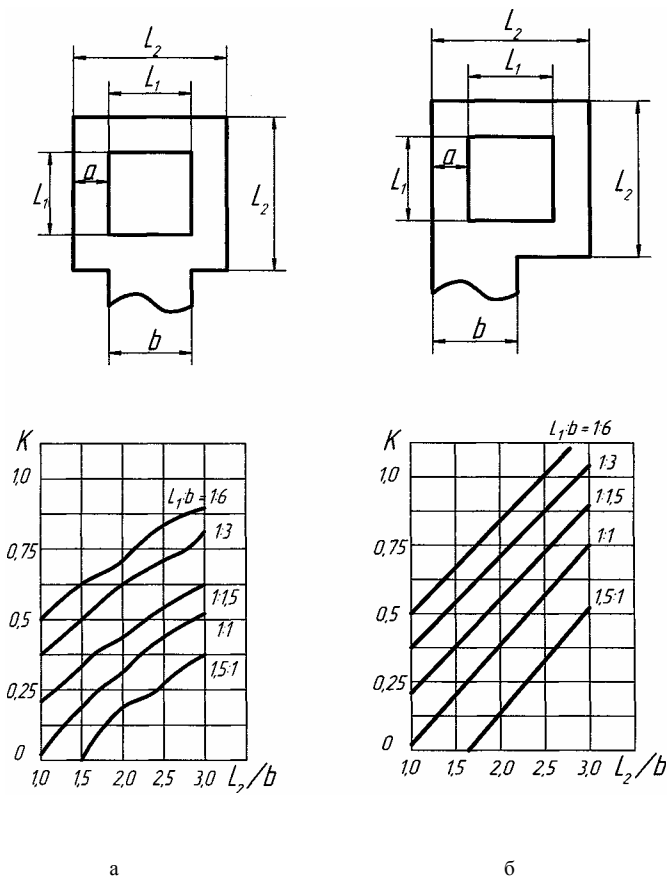


Рис. 1.14. Значения коэффициентов K для расчета низкоомных диффузионных резисторов

резистора одинаковой конфигурации (обычно $n > 2$, если имеется соединение двух или более тел резисторов), K - поправочный коэффициент, учитывающий сопротивление растекания у контактной пластины, который находится аналогично ранее описанному из рис. 1.12, 1.13, 1.14, где i - номер контактного окна. Для проектирования топологического чертежа определяют топологическую длину резистора (1.30)

$$L_{\text{топ}} = l_{\text{рас}} + 2(\Delta_{\text{грн}} + \Delta y), \quad (1.30)$$

при этом погрешность изготовления резистора увеличивается, так как реально полученный резистор будет иметь меньшую длину, чем спроектированный. Окончательно за $l_{\text{топ}}$ принимают ближайшие к вычисленным целые значения, кратные шагу координатной сетки, что упрощает проектирование топологии резисторов. Реальная длина резистора определяется из соотношения

$$l_{\text{реал}} = l_{\text{рас}} - 2(\Delta_{\text{грн}} + \Delta y)$$

После определения топологических размеров резисторов проводят поворочный расчет, пользуясь критерием $\gamma_R > \gamma_{R_{\text{рас}}}$, т.е. если заданная погрешность номинала резистора больше реальной, то расчет выполнен правильно, если неравенство не выполняется, то расчет топологических размеров следует провести заново. Для определения $\gamma_{R_{\text{рас}}}$ резистора без изгибов надо найти (1.31)

$$R_{\text{реал}} = \rho_s \left(\frac{l_{\text{реал}}}{b_{\text{реал}}} + 2K \right), \quad (1.31)$$

а для резистора в виде меандра с $n = 2$

$$R_{\text{реал}} = \rho_s \left(\frac{l_{\text{реал}}}{b_{\text{реал}}} + 2K + 0,55N_{\text{изг}} \right), \quad (1.32)$$

$$\Delta R_{\text{реал}} = R - R_{\text{реал}}, \text{ тогда } \gamma_{R_{\text{реал}}} = \frac{\Delta R_{\text{реал}}}{R_{\text{реал}}}.$$

1.5. Интегральные полупроводниковые конденсаторы

В качестве конденсаторов полупроводниковых ИМС чаще всего используются обратносмещенные р-п переходы. Кроме них применяются структуры типа металл - диэлектрик - полупроводник (МДП), в том числе и в биполярных микросхемах. На рис. 1.15. представлены структуры таких конденсаторов.

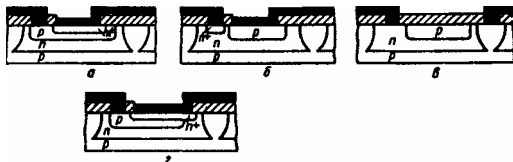


Рис. 1.15. Структуры конденсаторов полупроводниковых ИМС на основе переходов Э-Б (а), К-Б (б), К-П (в) и параллельно включенных переходов Э-Б и К-Б (г)

1.5.1. Конденсаторы на основе р-п перехода

Исходными данными для расчета конденсаторов на основе р-п перехода являются: необходимое значение емкости C и допуск на него ΔC ; рабочее напряжение U , В; интервал рабочих температур ΔT °С; рабочая частота f , Гц; основные технологические и конструктивные ограничения.

При расчете необходимо выбрать тип и конструкцию конденсатора, определить его геометрические размеры, занимаемую площадь.

На рис. 1.15, а-г представлены структуры конденсаторов полупроводниковых ИМС.

Емкость диффузионного конденсатора прямоугольной формы на основе обратносмещенного р-п перехода может быть представлена в виде

$$C = C_{\text{дон}} + C_{\text{бок}} = C_0 ab + C_{0б}(a+b)x_j, \quad (1.33)$$

где C_0 и $C_{0б}$ - удельные емкости донной и боковых частей р-п перехода; a , b и x_j - геометрические размеры р-п перехода.

Соотношение слагаемых зависит от отношения a/b . Оптимальным является отношение $a/b = 1$, при этом доля «боковой» емкости, оказывается минимальной. Для курсового проектирования достаточно определить C_0 и $C_{0б}$.

По заданным значениям C , C_0 , $C_{0б}$, x_j находят геометрические размеры конденсатора квадратной формы; если для топологии ИМС требуется конденсатор прямоугольной формы, то один из размеров прямоугольника выбирают, исходя из конструктивных соображений. Расчет еще более упрощается, если значением $C_{0б}$ можно пренебречь. Для расчета ΔC необходимо учесть погрешности технологии при выполнении геометрических размеров диффузионных слоев и отклонения емкости от номинального значения за счет изменения температуры.

1.5.2. Конденсаторы на основе МДП структуры

На рис. 1.16 показана структура МДП конденсатора. Одной из обкладок является n^+ -слой 1 толщиной 0,3 ... 1 мкм, другой - слой металла (алюминия) 2, а диэлектриком - слой 3 диоксида кремния.

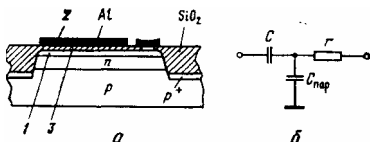


Рис. 1.16. Структура МДП транзистора

Такой конденсатор применяют в полупроводниковых микросхемах при незначительном усложнении технологического процесса (требуются дополнительные операции литографии и окисления для создания слоя 3). Слой 1 формируется с помощью той же операции легирования, что и эмиттеры биполярных транзисторов или истоки и стоки n -канальных МДП транзисторов. Топологическая конфигурация конденсатора - квадратная или прямоугольная. Для увеличения удельной емкости толщина d слоя 3 выбирается минимально возможной исходя из условия отсутствия пробоя: $d \geq U_{\text{проб}}/E_{\text{проб}}$,

где $E_{\text{проб}}$ есть электрическая прочность слоя 3, т. е. напряженность электрического поля при которой начинается пробой (около 600 В/мкм). Поэтому максимальная удельная емкость $C_0 = \epsilon \epsilon_d / d = \epsilon_0 \epsilon_d E_{\text{проб}} / U_{\text{проб}}$. Например, при $U_{\text{проб}} = 50 \text{ В}$ получаем $C_0 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ нФ/мкм}^2$.

На рис. 1.16, б приведена эквивалентная схема конденсатора, где r - сопротивление слоя 1, $C_{\text{пар}}$ - паразитная емкость между слоем 1 и подложкой (барьерная емкость изолирующего p - n перехода), которая в 4 ... 7 раз меньше полезной емкости C . Если обкладка 1 в схеме не соединена с общей шиной микросхемы, то высококачественный сигнал, проходящий через конденсатор, ослабляется емкостным делителем в $(1 + C_{\text{пар}}/C) \approx 1, 15 \dots 1, 25$ раза. Сопротивление r определяет добротность на высокой частоте: $Q = (2\pi C \cdot r f)^{-1}$.

При квадратной конфигурации $r \approx 2 \text{ Ом}$, тогда для $C = 10 \text{ пФ}$ и $f = 10 \text{ МГц}$ имеем $Q = 750$. На более высоких частотах из-за скин-эффекта r возрастает. Так как толщина скин-слоя $\delta \sim 1/\sqrt{f}$, то $r \sim \sqrt{f}$ и $Q \sim f^{-3/2}$, т. е. добротность уменьшается быстрее, чем по закону $1/f$. Например, на частоте 1 ГГц получаем $r = 20 \text{ Ом}$ и $Q = 0,75$. Поэтому МДП-конденсаторы неприменимы в диапазоне СВЧ. В этом случае надо использовать тонкопленочные конденсаторы. В отдельных случаях в качестве конденсаторов в полупроводниковых микросхемах на бипо-

лярных транзисторах применяют р-п переходы. Такие конденсаторы могут работать только при одной полярности приложенного напряжения (обратном напряжении на р-п переходе). Добротность мала как на низких частотах (из-за влияния обратного сопротивления р-п перехода), так и на высоких (сопротивления обкладок больше, чем в структуре рис. 1.16, а).

1.6. Интегральные полупроводниковые диоды

Банк данных диодных структур, выполненных по планарно-эпитаксиальной технологии, представлен на рис. 1.17 и рис. 1.18.

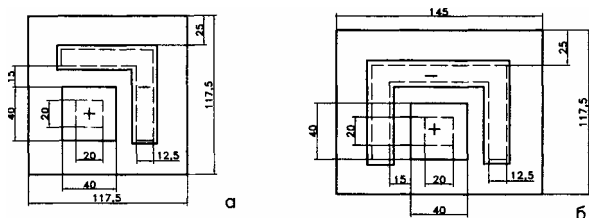


Рис. 1.17. Банк данных о топологии интегральных диодов на переходе Б-К (а, б)

Диоды, сформированные на основе перехода эмиттер - база (рис. 1.18, в), характеризуются наименьшими значениями обратного тока за счет самой малой площади и самой узкой области объемного заряда. Обычно структурам диодов соответствующим

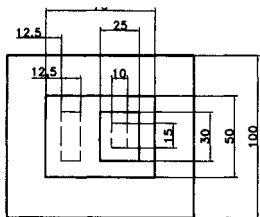


Рис. 1.18. Банк данных о топологии диодов на переходе Б-Э (в)

для перехода эмиттер - база при условии, что переход коллектор - база замкнут, так как при такой диодной структуре заряд накапливается только в базовом слое. В других структурах заряд накапливается не только в базе, но и в коллекторе и время восстановления обратного сопротивления составляет 50-100 нс.

Объемный заряд
пределом (0,1 - 50,0) мА. Наименьшей паразитной емкостью (~1,2 пФ) также обладают диодные структуры на основе перехода эмиттер - база. Для других структур значение паразитной емкости порядка 3 пФ.

Быстродействие диодов кроме паразитной емкости характеризуется временем восстановления обратного сопротивления, т. е. временем переключения диода из открытого состояния в закрытое. Оно минимально (около 10 нс)

Из анализа параметров диодов можно заключить, что диод на основе транзисторной структуры с замкнутым переходом база - коллектор предпочтительнее использовать в цифровых ИМС, поскольку он обеспечивает наибольшее быстродействие. Диод на основе перехода эмиттер - база применяют в цифровых схемах в качестве накопительного диода. Диоды с замкнутым переходом база - эмиттер и диоды на основе перехода база - коллектор, имеющие наибольшие напряжения пробоя, могут быть использованы в качестве диодов общего назначения.

1.7. Ориентировочный расчет топологических размеров диффузионных перемычек

Диффузионные перемычки (т.е. низкоомные резисторы), как было отмечено ранее, реализуются при эмиттерной диффузии в n^+ - слое (рис. 1.10, б), поэтому исходными параметрами для ориентировочного расчета будут параметры эмиттерного слоя $\rho_{\text{эф}} = 2 \text{ Ом/}\mu\text{м}$ (табл. 1.1) и $R_{\text{эф}} \leq 1 \text{ Ом}$. Кроме того, при эскизной прорисовке топологии известно, что по длине перемычки надо разместить на ее изолированной поверхности в одном случае одну проводящую дорожку (рис. 1.19, а), а в другом - две дорожки (рис. 1.19, б).

Поэтому ориентировочный расчет начинают с определения топологической длины перемычки из учета минимальной ширины проводящей дорожки, которая равна 4 мкм, минимального расстояния между проводниками a , которое также равно 4 мкм.

Таким образом, если надо провести одну проводящую дорожку, то длина перемычки $l_{\text{эф}} = 4 + 2 \cdot a = 4 + 2 \cdot 4 = 12 \text{ мкм}$. Если надо провести две проводящих дорожки, то $l_{\text{эф}} = 2 \cdot 4 + 3 \cdot a = 8 + 12 = 20 \text{ мкм}$. Далее определяют коэффициент формы перемычки

$$K_{\Phi} = \frac{l_{\text{эф}}}{b_{\text{эф}}} = \frac{R_{\text{эф}}}{\rho_{\text{эф}}} = 0,5$$

Если $l_{\text{эф}}$ известна (для двух случаев - 12 мкм и 20 мкм соответственно), то $b_{\text{эф}}$ легко определить, зная K_{Φ} , т.е. $b_{\text{эф}} = l_{\text{эф}} / K_{\Phi}$. Следовательно, $b_{\text{эф}} = 12 / 0,5 = 24 \text{ мкм}$ (если нужно провести через перемычку одну дорожку) и $b_{\text{эф}} = 20 / 0,5 = 40 \text{ мкм}$ (если надо провести через перемычку две проводящие дорожки).

Форма контактных окон перемычек выбирается аналогично форме, приведенной на рис. 1.13, б.

Подобным образом проводится ориентировочный расчет для определения топологических размеров перемычек с учетом развязки от пересечений и более двух электропроводящих дорожек.

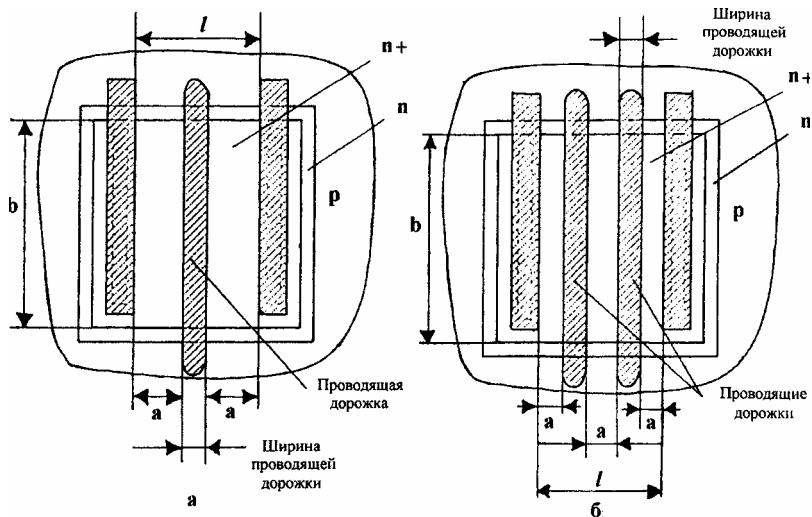


Рис. 1.19. Топология перемычки для случая, когда над ней проходит одна дорожка (а) и когда проходят две дорожки (б)

2. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА МДП ТРАНЗИСТОРАХ

2.1. Конструкции и основные параметры МДП транзисторов

МДП транзисторы относятся к униполярным приборам, т.е. принцип их действия основан на использовании только основных носителей заряда. По основному признаку - способу формирования канала - различают МДП транзисторы с индуцированным каналом (канал между истоком и стоком появляется (индуцируется) под действием напряжения на затворе) и с встроеным каналом (канал между истоком и стоком заранее выполнен (встроен) с помощью диффузии). По типу электропроводности канала различают n-канальные и p-канальные транзисторы.

Полупроводниковая область, от которой начинается дрейф основных носителей заряда, называется истоком, а область, к которой под действием поля движутся (дрейфуют) носители - стоком. Область, где осуществляется дрейф носителей заряда и амплитудная модуляция дрейфового тока, называется каналом. Металлическая или полупроводниковая область, используемая для создания модуляции дрейфового тока, называется затвором. Наконец, подложка является конструктивной основой МДП транзистора. Конструкции МДП транзисторов представлены на рис. 2.1. Пока мы также области транзисторов и знаки подаваемых напряжений. В МДП интегральных схемах МДП транзистор является основным и единственным элементом. Он может выполнять функции активных приборов (ключевой транзистор в инверторе, усилительный транзистор) и пассивных элементов (нагрузочный транзистор в инверторе, конденсатор в элементе памяти). Наружные МДП - элементы используют в составе ИС в качестве резисторов. Необходимый номинал сопротивления достигается конструктивно - выбором размеров канала и схемотехнически - подачей на затвор потенциала определенной величины. В качестве конденсаторов в МДП-транзисторе могут быть использованы емкости и обратносмещенных p-n переходов $C_{ин}$ и $C_{ст}$ а также емкость МДП конденсатора $C_{зп}$.

На рис. 2.2 изображен p-канальный МДП транзистор с индуцированным каналом, здесь же показаны его основные конструкторские параметры: d - толщина подзатворного диэлектрика, L - длина канала, Z - ширина канала. Остальные конструкторские параметры (размеры затвора, истока и стока, толщины истока и стока и т.д.) являются вспомогательными и определяются при проектировании по технологическим ограничениям на размеры МДП - структуры.

К основным электрическим параметрам и характеристикам МДП транзисторов относятся:

- 1) выходная вольт-амперная характеристика (ВАХ) $I_c(U_c)$ при $U_g = \text{const}$ (стоковая ВАХ) (рис. 2.3);
- 2) переходная ВАХ (сточно-затворная) $I_c(U_g)$ при $U_c = \text{const}$ (рис. 2.4);
- 3) пороговое напряжение U_0 , V - минимальное напряжение на затворе (для p-канального транзистора оно отрицательное), при котором возникает ток меж-

ду истоком и стоком, т.е. образуется канал. Этот параметр имеет место только для МДП транзисторов с индуцированным каналом;

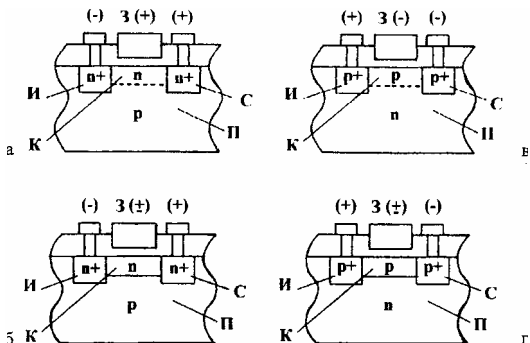


Рис. 2.1. Конструкция МДП транзистора: n - канальных (а, б); p - канальных (в, г); с индуцируемым каналом (а, в); со встроенным каналом (б, г); И - исток, С - сток; З - затвор; К - канал; П - подложка

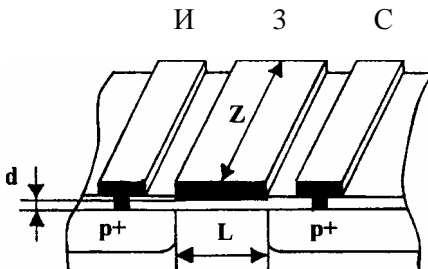


Рис. 2.2. Конструкция p - канального МДП транзистора

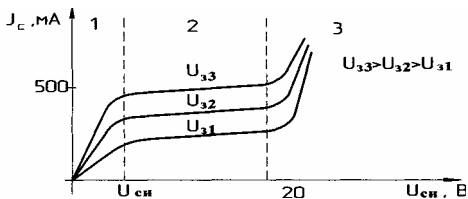


Рис.2.3. Выходная ВАХ р - канального МДП транзистора с индуцированным каналом. Области ВАХ: 1 - активный режим, 2 - режим насыщения, 3 - пробой

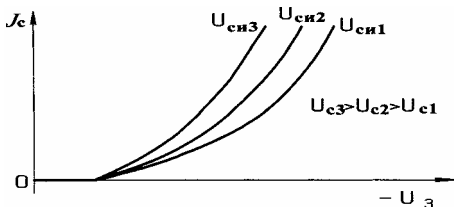


Рис. 2.4. Стоко-затворная ВАХ р - канального МДП транзистора с индуцированным каналом

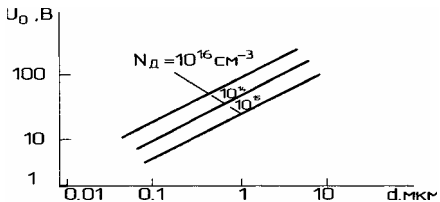


Рис. 2.5. Зависимость порогового напряжения от d и N_d

4) входное сопротивление $R_{вх}$, МОм;

5) паразитные межэлектродные емкости $C_{зп}$, $C_{зк}$, $C_{кп}$, $C_{кн}$, $C_{пк}$, пФ;

6) крутизна стоко-затворной характеристики

$$S = \frac{\delta J_c}{\delta U_3} / U_c = \text{const} \quad (2.1)$$

7) коэффициент усиления

$$K = \frac{\delta U_c}{\delta U_3} / J_c = \text{const} \quad (2.2)$$

8) сопротивление канала

$$R_k = \frac{\delta U_c}{\delta J_c} / U_3 = \text{const} \quad (2.3)$$

9) удельная или нормированная крутизна

$$b = \frac{\mu \cdot C_{03} \cdot Z}{L}, \quad (2.4)$$

где c - подвижность носителей заряда в канале; $C_{03} = \epsilon \epsilon_0 \mu / d$ - удельная емкость затвора.

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость материала подзатворного диэлектрика;

ϵ - электрическая постоянная вакуума.

Параметры (2.1) - (2.3) взаимосвязаны:

$$K = S \cdot R_k \quad (2.5)$$

10) τ_s - постоянная времени канала, характеризующая инерционность R-C системы $\tau_s = R_k \cdot C_3$, где C_3 - полная емкость затвора, $C_3 = L \cdot Z \cdot \epsilon \epsilon_0 / d$;

10) $f_{гр}$ - граничная частота, характеризующая предельные частотные возможности транзистора.

$$f_{гр} = \frac{1}{2\pi\tau_s}$$

Область 1 выходной ВАХ (рис.2.3) называется активной областью работы транзистора, область 2 - областью насыщения, область 3 - областью пробоя. Для области 1 ВАХ запишется как

$$J_c = b \left[(U_3 - U_0)^2 - \frac{1}{2} U_c^2 \right] \quad (2.6)$$

Для области 2 ВАХ описывается уравнением

$$J_c = \frac{1}{2} b (U_3 - U_0)^2 \quad (2.7)$$

Значение крутизны S для области 2 ВАХ

$$S = \frac{\delta J_c}{\delta U_3} / U_c = \text{const} = b(U_3 - U_0) \quad (2.8)$$

Отсюда следует взаимосвязь крутизны (2.8) и нормированной крутизны (2.4):

$$S = 2 \sqrt{\frac{2Jc}{b}} = 2\sqrt{2b \cdot Jc} \quad (2.9)$$

Из (2.9) следует, что в отличие от нормированной крутизны b крутизна S зависит от электрического режима работы транзистора (от J). Выражение для коэффициента усиления K можно получить, выразив K через крутизну и емкость затвора

$$K = 2 \sqrt{\frac{Uc}{Jc}} \cdot \sqrt{\frac{e \cdot N_d \cdot \mu \cdot C_3}{\epsilon \epsilon_0}}, \quad (2.10)$$

где e - заряд электрона, а N_d - концентрация донорной примеси в подложке. Сопротивление канала для области 2 ВАХ

$$R_k = \frac{1}{b} (U_3 - U_0) \quad (2.11)$$

Используя понятие τ_s , получим выражение для постоянной времени транзистора

$$\tau_s = R_k \cdot C_3 = \frac{1}{b(U_3 - U_0)} \cdot \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot Z \cdot L}{d} = \frac{L^2}{\mu(U_3 - U_0)} \quad (2.12)$$

Зная τ_s , можно вычислить граничную частоту транзистора:

Величина порогового напряжения U_0 зависит от материала и толщины подзатворного диэлектрика d , от материала и степени легирования подложки (N_d , для p -канального МДП-транзистора). Эта зависимость показана на рис. 2.5 для наиболее характерного случая, когда диэлектриком служит SiO_2 , а материалом подложки является кремний. Величина порогового напряжения зависит также от кристаллографической ориентации поверхности полупроводниковой пластины, в которой выполнен МДП транзистор. Чаще всего используют пластины с ориентацией (100). Именно для этого случая и приведены графики зависимости $U_0(d, N_d)$ на рис. 2.5.

При конструировании МДП транзисторов задаются параметрами S , τ_s или $f_{\text{пр}}$. Далее находят конструкторские параметры транзистора (Z , L , d). Пассивные элементы в МДП - ИС выполняются на базе МДП структур (емкостные и резистивные элементы). Такие МДП транзисторы называются нагрузочными, а МДП транзисторы, работающие в активном режиме, являются усилительными приборами и могут быть использованы в качестве ключевых схем.

2.2. Резисторы на основе МДП транзистора

В ИМС на основе МДП транзисторов в качестве резисторов обычно используются сами МДП транзисторы. Сопротивление слоев диффузионных областей в р-канальных транзисторах R_S обычно равно 50-150 Ом/, в то время как удельное сопротивление слоев канала составляет десятки килоом на квадрат. Это позволяет существенно уменьшить площадь, занимаемую резистором.

При использовании таких резисторов МДП транзистор включается по схеме с общим стоком. На стоке поддерживается напряжение E_C , а на затворе E_3 - Различают два случая: $|E_3 - U_0| \leq |E_C|$ и $|E_3 - U_0| > |E_C|$. В первом МДП транзистор работает в пологой области ВАХ, во втором в - крутой. Используя выражения (2.13) и (2.14),

$$C_{0д} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_a \cdot d}{d_d}, \quad (2.13)$$

$$b = \epsilon_d \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_p \cdot Z / (L d_d), \quad (2.14)$$

а также выражение для дифференциального сопротивления транзистора R_i на крутом участке

$$R_i = [b \cdot |U_{зп} - U_0 - U_{сн}|]^{-1} \quad (2.15)$$

и выражение для сопротивления канала R_0 при $|U_{сн}| \ll |U_{зп} - U_0|$

$$R_0 = [b \cdot |U_{зп} - U_0|]^{-1} \quad (2.16)$$

получаем величины дифференциального сопротивления МДП резистора (R_d): для пологого участка ВАХ

$$R_{дп} = L [Z \cdot \mu \cdot C_{0д} \cdot |U_0| \cdot (U_{сн} / U_0 - 1)]^{-1} \quad (2.17,а)$$

для крутого участка ВАХ

$$R_{дп} = L [Z \cdot \mu \cdot C_{0д} \cdot |U_0| \cdot (U_{сн} / U_0 - 1)]^{-1}, \quad (2.17,б)$$

где $\Delta E = E_3 - E_C$.

Для увеличения R_d значение L/Z должно находиться в пределах значений (1-10). Из (2.17) видно, что выражение (б) отличается от (а) сдвигом характеристики при $(U_{сн}/U_0) = 0$ на величину $\Delta E / U_0$. Из (2.17) также следует нелинейная зависимость сопротивлений от напряжения. Однако этот недостаток, если он оказывает отрицательное влияние, исправляется схемотехнически.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС

Разработка топологии ИМС - творческий процесс, и его результаты существенно зависят от индивидуальных способностей разработчика, его навыков и знаний. Сущность работы по созданию топологии ИМС сводится к нахождению такого оптимального варианта взаимного расположения элементов схемы, при котором обеспечиваются высокие показатели эффективности производства и качества ИМС: низкий уровень бракованных изделий, низкая стоимость, материалоемкость, высокая надежность, соответствие получаемых электрических параметров заданным. Приводимые здесь правила проектирования являются обобщением опыта проектирования ИМС на биполярных транзисторах.

К разработке топологии приступают после того, как количество, типы и геометрическая форма элементов ИМС определены.

3.1. Правила проектирования изолированных областей

Количество и размеры изолированных областей оказывают существенное влияние на характеристики ИМС, поэтому:

- 1) суммарная площадь изолирующих р-п переходов должна быть минимальной, так как их емкость является паразитной. Минимальные размеры изолированной области определяются геометрическими размерами находящихся в ней элементов и зазорами, которые необходимо выдерживать между краем изолированной области и элементами и между самими элементами, размещенными в одной изолированной области;
- 2) к изолирующим р-п переходам всегда должно быть приложено напряжение обратного смещения, что практически осуществляется подсоединением подложки р-типа, или области разделительной диффузии р-типа, к точке схемы с наиболее отрицательным потенциалом. При этом суммарное обратное напряжение, приложенное к изолирующему р-п переходу, не должно превышать напряжения пробоя;
- 3) диффузионные резисторы, формируемые на основе базового слоя, можно располагать в одной изолированной области, которая подключается к точке схемы с наибольшим положительным потенциалом. Обычно такой точкой является контактная площадка ИМС, на которую подается напряжение смещения от коллекторного источника питания;
- 4) резисторы на основе эмиттерного и коллекторного слоев следует располагать в отдельных изолированных областях;
- 5) транзисторы типа п-р-п, коллекторы которых подсоединены непосредственно к источнику питания, целесообразно размещать в одной изолированной области вместе с резисторами;
- 6) транзисторы типа п-р-п, которые включены по схеме с общим коллектором, можно располагать в одной изолированной области;
- 7) все другие транзисторы, кроме упомянутых в п. 5 и 6, необходимо распола-

гать в отдельных изолированных областях, т. е. все коллекторные области, имеющие различные потенциалы, должны быть изолированы;

8) для уменьшения паразитной емкости между контактными площадками и подложкой, а также для защиты от короткого замыкания в случае нарушения целостности пленки окисла под ними при приварке проволочных выводов под каждой контактной площадкой создают изолированную область, за исключением контактных площадок с наиболее отрицательным потенциалом;

9) количество изолированных областей для диодов может сильно изменяться в зависимости от типа диодов и способов их включения. Если в качестве диодов используются переходы база - коллектор, то для каждого диода требуется отдельная изолированная область, так как каждый катод (коллекторная область p-типа) должен иметь отдельный вывод. Если в качестве диодов используются переходы эмиттер - база, то все диоды можно поместить в одной изолированной области. При этом все катоды диодов (эмиттерные области) сформированы отдельно в общем аноде (базовой области). Аноды диодов с помощью соединительной металлизации закорачивают на изолированную (коллекторную) область;

10) для диффузионных конденсаторов требуются отдельные изолированные области. Исключение составляют случаи, когда один из выводов конденсатора является общим с другой изолированной областью;

11) для диффузионных перемычек всегда требуются отдельные изолированные области.

3.2. Правила размещения элементов ИМС на площади кристалла

После определения количества изолированных областей приступают к их размещению в нужном порядке, размещению элементов, соединению элементов между собой и с контактными площадками, руководствуясь следующими правилами:

1) при размещении элементов ИМС и выполнении зазоров между ними необходимо строго выполнять ограничения, соответствующие типовому технологическому процессу;

2) резисторы, у которых нужно точно выдерживать отношения номиналов, должны иметь одинаковую ширину и конфигурацию и располагаться рядом друг с другом. Это относится и к другим элементам ИМС, у которых требуется обеспечить точное соотношение их характеристик;

3) резисторы с большой мощностью не следует располагать вблизи активных элементов;

4) диффузионные резисторы можно пересекать проводящей дорожкой поверх слоя окисла кремния, покрывающего резистор;

5) форма и место расположения конденсаторов не являются критичными;

6) соединения, используемые для ввода питания, заземления, входной и выходной выводы необходимо выполнять в виде широких и коротких полосок, что уменьшает паразитные сопротивления;

7) для улучшения развязки между изолированными областями контакт к подложке следует располагать рядом с мощным транзистором или как можно ближе к входу или выходу схемы;

8) число внешних выводов в схеме, а также порядок расположения и обозначения контактных площадок выводов ИМС на кристалле должны соответствовать выводам корпуса;

9) коммутация в ИМС должна иметь минимальное количество пересечений и минимальную длину проводящих дорожек. Если полностью избежать пересечений не удастся, их можно осуществить, используя обкладки конденсаторов, формируя дополнительные контакты к коллекторным областям транзисторов, применяя диффузионные перемычки и, наюнец, создавая дополнительный слой изоляции между пересекающимися проводниками;

10) первую контактную площадку располагают в нижнем левом углу кристалла и отличают от остальных по ее положению относительно фигур совмещения или заранее оговоренных элементов топологии. Нумерацию остальных контактных площадок проводят против часовой стрелки. Контактные площадки располагают в зависимости от типа выбранного корпуса по периметру кристалла или по двум противоположным его сторонам;

И) фигуры совмещения располагают одной-двумя группами на любом свободном месте кристалла;

12) при разработке аналоговых ИМС элементы входных дифференциальных каскадов должны иметь одинаковую топологию и быть одинаково ориентированными в плоскости кристалла. Для уменьшения тепловой связи входные и выходные каскады должны быть максимально удалены, а для уменьшения высокочастотной связи через подложку контакт к ней следует осуществлять в двух точках - вблизи входных и выходных каскадов.

3.3. Рекомендации по разработке эскиза топологии

Для обеспечения разработки эскиза топологии рекомендуется с самого начала вычертить принципиальную электрическую схему так, чтобы ее выводы были расположены в необходимой последовательности. Каждая линия, пересекающая резистор на принципиальной электрической схеме, будет соответствовать металлизированной дорожке, пересекающей диффузионный резистор по окислу на топологической схеме.

На этапе эскизного проектирования топологии необходимо предусмотреть решение следующих задач:

1) расположить как можно большее число резисторов в одной изолированной области;

2) подать наибольший потенциал на изолированную область, где расположены резисторы;

3) подать наиболее отрицательный потенциал на подложку вблизи мощного транзистора выходного каскада;

- 4) рассредоточить элементы, на которых рассеиваются большие мощности;
- 5) расположить элементы с наименьшими размерами и с наименьшими запасами на совмещение в центре эскиза топологии;
- 6) сократить число изолированных областей и уменьшить периметр каждой изолированной области.

На основе эскиза разрабатывают предварительный вариант топологии, который вычерчивают на миллиметровой бумаге в выбранном масштабе, обычно 100:1 или 200:1 (выбирают масштабы, кратные 100). Топологию проектируют в прямоугольной системе координат. Каждый элемент топологии представляет собой замкнутую фигуру со сторонами, состоящими из отрезков прямых линий, параллельных осям координат. Придание элементам форм в виде отрезков прямых линий, не параллельных осям координат, допустимо только в тех случаях, когда это приводит к значительному упрощению формы элемента. Например, если форма элемента состоит из ломаных прямых, составленных в виде «ступенек» с мелким шагом, рекомендуется заменить их одной прямой линией. Координаты всех точек, расположенных в вершинах углов ломаных линий, должны быть кратны шагу координатной сетки.

При вычерчивании чертежа топологии на миллиметровой бумаге принимают минимальный шаг координатной сетки, равный 0,5 мм. Можно выбрать другой шаг, но он должен быть кратным минимальному шагу. Действительный (на кристалле) размер шага координатной сетки зависит от выбранного масштаба топологии.

При вычерчивании общего вида топологии рекомендуется использовать линии разного цвета для различных слоев ИМС: эмиттерного - черный, базового - красный, разделительного (коллекторного) - зеленый, вертикального - черный пунктирный, скрытого - зеленый пунктирный, металлизации - желтый, окна в окисле для контакта к элементам - синий пунктирный, окна в пассивирующем (защитном) окисле - синий сплошной.

В процессе вычерчивания топологии для получения оптимальной компоновки возможно изменение геометрии пассивных элементов, например пропорциональное увеличение длины и ширины резисторов или их многократный изгиб, позволяющие провести над резистором полоски металлической разводки или получить более плотную упаковку элементов.

При изменении формы пассивных элементов в процессе их размещения проводят корректировочные расчеты. При проектировании слоя металлизации размеры контактных площадок и проводников следует брать минимально допустимыми, а расстояния между ними - максимально возможными.

После выбора расположения элементов и контактных площадок, создания рисунка разводки необходимо разместить на топологии фигуры совмещения, тестовые элементы (транзисторы, резисторы и т. д. - приборы, предназначенные для замера электрических параметров отдельных элементов схемы), реперные знаки. Фигуры совмещения могут иметь любую форму, чаще всего квадрат или крест, причем следует учесть, что на каждом фотошаблоне, кроме первого и последнего, имеются две фигуры, расположенные рядом друг с другом. Меньшая

фигура предназначена для совмещения с предыдущей технологической операцией, а большая - с последующей. На первом фотошаблоне расположена только большая фигура, а на последнем - только меньшая.

При разработке топологии важно получить минимальную площадь кристалла ИМС. При размерах стороны кристалла до 1 мм ее величину выбирают кратной 0,05 мм, а при размерах стороны кристалла 1-2 мм - кратной 0,1 мм.

Если после уплотненного размещения всех элементов на кристалле выбранного размера осталась незанятая площадь, рекомендуется перейти на меньший размер кристалла. Если этот переход невозможен, то незанятую площадь кристалла можно использовать для внесения в топологию изменений, направленных на снижение требований к технологии изготовления полупроводниковой ИМС. Например, можно увеличить размеры контактных площадок и расстояния между контактными площадками, ширину проводников и расстояние между ними, по возможности выпрямить элементы разводки, резисторы, границы изолированных областей.

В заключение проводят контрольно-проверочные расчеты полученной топологии микросхемы, включающие в себя оценку теплового режима и паразитных связей.

4. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС

4.1. Требования к защите интегральных микросхем

В процессе хранения и эксплуатации ИМС подвергаются внешним воздействиям, которые обусловлены чаще всего изменением температуры или влажности окружающей среды, увеличением или уменьшением атмосферного давления, присутствием активных веществ в окружающей атмосфере, наличием вибраций, ударов и другими факторами. Для защиты микросхем от таких воздействий предусматривается комплекс специальных мер. Наиболее широкое распространение в настоящее время получили два способа защиты микросхем: бескорпусная защита и корпусная (с использованием различных типов корпусов).

Выбор конструктивно-технологического варианта исполнения бескорпусной защиты определяется в первую очередь назначением и требованиями, предъявляемыми к защищаемой микросхеме. Если бескорпусная микросхема выпускается в виде самостоятельного изделия, то её защита осуществляется с учетом всего комплекса климатических механических воздействий, предусмотренных техническими условиями на данную схему.

Особые требования в случае бескорпусной защиты предъявляются к химической чистоте и термостойкости герметизирующих покрытий, к их физико-механическим свойствам, влагопоглощению. Кроме того, герметизирующие материалы должны обеспечивать не только высокую жесткость создаваемой конструкции, но и устойчивость ее к различным видам воздействий.

Если в процессе эксплуатации или хранения микросхем требуется защита,

обеспечивающая их работоспособность в течение длительного промежутка времени, то в этом случае рекомендуется применять корпусную защиту. Причем корпуса должны отвечать следующим основным требованиям: обладать достаточной механической прочностью и коррозионной стойкостью; иметь минимальные размеры; обеспечивать чистоту окружающей микросхемы среды; позволять легко и надежно выполнять электрическое соединение между элементами микросхемы и печатной платы, на которую устанавливается микросхема; обеспечивать минимальные паразитные емкости и индуктивности конструкции; обеспечивать надежную изоляцию между токопроводящими элементами; быть герметичными и предотвращать проникновение влаги к защищаемой микросхеме; обеспечивать минимальное тепловое сопротивление между микросхемой, размещенной внутри корпуса и окружающей средой; защищать микросхему от воздействий электромагнитного поля и радиоактивного излучения; обеспечивать возможность автоматизации процесса сборки; иметь минимальную стоимость и др.

В зависимости от используемых материалов корпуса делятся на металлостеклянные, стеклянные, металлокерамические, керамические, металлополимерные и полимерные (пластмассовые).

Металлостеклянные корпуса состоят из металлической крышки и металлического основания, в которое, используя изоляторы, впаяны выводы. В качестве изоляторов применяют стеклянные бусы (при изоляции каждого вывода в отдельности) или стеклотаблетки (при изоляции группы выводов). Для обеспечения качественного металлостеклянного спая подбирают сочетаемые материалы таким образом, чтобы температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) стекла и металла были одинаковыми или близкими.

В стеклянных корпусах основание формируют из стекла. В процессе изготовления основания в него впаивают выводы. Крышки таких корпусов могут быть как стеклянными, так и металлическими.

В металлокерамических корпусах дно и крышку формируют из металла, а основание - из керамики, которое в данном случае выполняет функцию подложки.

В керамических корпусах в качестве подложки используется не только основание, но и крышка. Разделяются они между собой керамической рамкой. Герметизация корпуса осуществляется либо стеклоэмалью, либо стеклоприпоем, либо клеем.

Металлополимерные корпуса состоят обычно из металлической капсулы (дна), в которую устанавливается плата. Изоляция выводов и герметизация корпуса осуществляются заливкой компаундом.

В полимерных (пластмассовых) корпусах выводы впрессованы в основание из полимера, а крышка изготавливается, как правило из такого же материала, что и основание, и приклеивается к нему. К пластмассовым корпусам относятся также корпуса, которые не имеют ни крышки, ни основания. Герметизация микросхемы и изготовление корпуса в данном случае происходит одновременно.

Кроме перечисленных разновидностей корпусов, на практике встречаются также керамико-полимерные, керамико-стеклянные и др.

Сборка и монтаж - это часть общего технологического процесса изготовле-

ния БИС, в результате проведения которого получают готовую конструкцию ИМС (БИС), т.е. готовые изделия.

Процессы и операции сборки и монтажа являются наиболее трудоемкими в технологии производства ИМС. Если при изготовлении кристаллов широко применяются высокопроизводительные групповые методы, то при сборке и монтаже оперируют с каждой отдельной ИМС.

Технологическим процессом сборки ИМС (БИС) называют совокупность операций по ориентированному разделению пластин и подложек со сформированными элементами на кристаллы или платы, закрепление их на основаниях корпусов, посадочных площадках выводных рамки т.д.

Технологическим процессом монтажа ИМС, в том числе БИС, называют совокупность операций, направленных на получение электрических соединений кристалла со следующим коммутирующим уровнем, т.е. с выводами рамок, гибких носителей, оснований корпусов, либо с контактными площадками подложек плат. Герметизация ИМС входит в число монтажных операций только в том случае, если она является бескорпусной, и сводится к формированию защитных покрытий путем заливки смонтированного кристалла (как правило, его рабочей поверхностью) специальным герметизирующим покрытием.

4.2. Конструктивные исполнения бескорпусных БИС

Использование бескорпусных БИС в микроэлектронной аппаратуре (МЭА) позволяет обеспечить значительное уменьшение ее массогабаритных характеристик, снижение значений переходных сопротивлений, паразитных индуктивностей и емкостей, повышение надежности. Бескорпусные БИС обладают универсальностью применения при пониженной материалоемкости.

Бескорпусные БИС изготавливают с гибкими проволочными выводами, на полиимидном носителе и с объемными выводами. На коммутационной плате БИС на полиимидном носителе занимают площадь, в 4 - 10 и более раз меньшую по сравнению с микросхемами в корпусе. Для монтажа на плату выводы БИС в этом случае имеют вид квадратных контактных площадок, расположенных в периферийных областях кристалла.

Применение бескорпусных БИС на полиимидных носителях позволяет повысить надежность МЭА за счет: уменьшения количества сварных и паянных соединений в расчете на одну контактную площадку БИС (для корпусных - три - четыре соединения, для бескорпусных - два - три), улучшения условий отвода теплоты при установке кристалла непосредственно на теплоотводящий пьедестал, снижения механических напряжений в кристалле БИС и небольшой массы.

Бескорпусные БИС с объемными выводами представляют собой кристаллы БИС, на контактных площадках которых образованы шариковые (или столбиковые) выводы. Объемные выводы (ОВ) изготавливают из золота, облуженной или позолоченной меди и сплава олово - серебро. Такие БИС занимают на

коммутационной плате площадь, в 16-40 раз меньшую, чем корпусные БИС, и в 4 - 1 0 раз меньшую чем бескорпусные БИС на полиимидном носителе. Сопротивление их выводов в 20 - 100 раз, паразитная индуктивность в 60 - 200 раз и межвыводная емкость в 9 - 50 раз ниже, чему корпусных БИС [2].

Объемные выводы на контактных площадках кристалла БИС могут быть сформированы двумя различными способами. В первом способе, называемом "мокрым", используют процессы вакуумного осаждения барьерного слоя (хром - медь, хром - никель, ванадий - медь), на котором гальванически выращивают припойные шарики. Барьерный слой создают из металлов, имеющих хорошую адгезию к алюминию кристалла БИС и не образующих с ним выпрямляющих контактов, т.е. не влияющих на электрические параметры БИС. К недостаткам "мокрого" способа относят трудность нанесения однородного покрытия необходимой толщины, сложность контроля за составом припоя и выдерживанием размеров ОВ из-за гальванического разрастания, а также ухудшение параметров БИС, особенно на МДП-структурах.

Чтобы избежать недостатков "мокрого" способа формирования ОВ, применяют "сухой" способ. Сущность его заключается в ультразвуковом присоединении шариков из золотой проволоки и последующей обрезке проволоки непосредственно над шариком. "Сухой" способ прост и практически не влияет на параметры БИС.

Объемные выводы формируют на кристаллах, находящихся в составе пластины, до ее разделения. При этом "сухой" способ обеспечивает избирательность в формировании ОВ: они создаются на контактных площадках только годных, предварительно проверенных по электрическим параметрам кристаллов БИС.

Полиимидные носители с алюминиевыми бабочными выводами присоединяют к алюминиевым контактным площадкам кристаллов БИС ультразвуковой микросваркой. В этом случае при взаимодействии материалов вывода и контактной площадки образуется надежное однокомпонентное микросварное соединение.

Присоединять медные, покрытые олово-висмутом, бабочные выводы полиимидного носителя к контактным площадкам кристаллов сложнее, так как медь и алюминий технически несовместимы при микросварке и пайке. Поэтому перед их соединением на контактных площадках кристалла или ленточных выводах носителя формируют объемные выводы, на кристалле - золотые или припойные, на носителе - золотые.

Присоединение носителя может быть осуществлено пайкой или термокомпрессионной сваркой. Объемные золотые выводы на носителе формируют импульсной пайкой с образованием золото-оловянного эвтектического сплава, термокомпрессионной сваркой с золотым покрытием медной бабки, а также лазерной импульсной пайкой или сваркой.

В оловянное покрытие медных бабочных выводов вводят висмут (до 10 %) или свинец (до 40 %) с целью предотвращения образования хрупкой фазы интерметаллида AuSn_4 . При добавлении висмута толщина интерметаллида после пайки при температуре 250 °С и времени выдержки 30 с составляет 0,5 - 2 мкм. Легирование припоя свинцом при пайке в таких же условиях приводит к образованию слоя ин-

терметаллида толщиной 4-5 мкм, который способствует образованию прочных паянных соединений. Дальнейшее увеличение его толщины вызывает уменьшение прочности.

Перед присоединением полиимидного носителя или перед установкой на коммутационную плату пластина с кристаллами БИС закрепляется на эластичной адгезионной пленке и разделяется на отдельные кристаллы на всю толщину, что исключает необходимость в дальнейшем разламывания пластины, и объемные выводы не повреждаются.

4.3. Расчет теплового режима ИМС

При работе ИМС происходит её нагрев до определенной температуры. Поэтому при выборе корпуса ИМС необходимо учитывать рассеиваемую мощность, на которую он рассчитан. Если корпус рассчитан на малую рассеиваемую мощность, то будет происходить перегрев ИМС и ее температура может превысить допустимую, т.е. $T_{\max} > T_{\text{доп}}^{\circ}$, где $T_{i\max}^{\circ}$ - максимальная температура; $T_{\text{доп}}^{\circ}$ - максимально допустимая температура кремниевого р-п перехода (150-175 °С).

Если $T_{i\max}^{\circ} > T_{\text{доп}}^{\circ}$, то необходимо выбрать другой корпус или предусмотреть радиатор, который может быть выполнен на печатной плате. Источниками тепла в ИМС являются транзисторы, диоды, резисторы, выделяемая мощность ΣP_i в которых определяется при расчете схемы по постоянному току.

Тепловые потоки развиваются от источников тепла и могут иметь разные пути (рис.4.1). Анализируя эти потоки, можно выделить основные, которые будут определять тепловую модель конструкции (рис. 4.2). Так., например, потоком $P_{в2}$ во внутренний газовый объем можно пренебречь из-за малого градиента температур в объеме корпуса и плохой теплопроводности и малого замкнутого воздушного объема. Основными можно считать потоки:

- от источников в ножку корпуса (P_k и P_n);
- от центра на периферию ножки корпуса (P_n),
- с поверхности крышки в окружающее пространство (P_A).

Исходя из главных потоков, учитывая высокую теплопроводность кремния и малый градиент температур внутри кристалла, ИМС тепловая модель конструкции будет иметь вид, представленный на рис. 4.1. Источники тепла и их температура соответственно обозначены через P_i и T_i° . Температура основания кристалла, центра ножки корпуса, крышки корпуса и окружающей воздушной среды обозначены соответственно через T_0° , T_i° , T_k° и T_A° . Тепловые сопротивления (отношение разности температур к скорости теплового потока, по аналогии с электросопротивлением) от источника через ограниченный объем кристалла в основание (рис. 4.2) от основания кристалла через соединительный слой в ножку корпуса и от крышки в окружающее пространство обозначены, соответственно, через R_{T_0} , $R_{П1}$, $R_{П2}$, $R_{Тк}$.

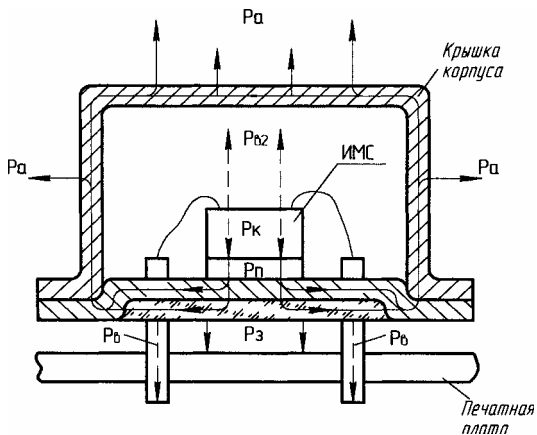


Рис. 4.1. Основные тепловые потоки ИМС, учитываемые при расчете тепловой модели

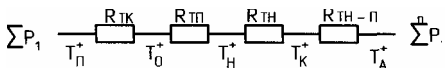


Рис. 4.2. Упрощенная тепловая модель

Расчет тепловых сопротивлений выполняется по формулам

$$R_{\text{тк}} = \left(\frac{h}{\lambda \cdot S} \right)_{\text{к}}, \quad (4.1)$$

$$R_{\text{тп}} = \left(\frac{h}{\lambda \cdot S} \right)_{\text{п}}, \quad (4.2)$$

$$R_{\text{тп}} = \frac{1}{2\pi C \cdot d} \ln \frac{D}{d}, \quad d = \sqrt{\frac{a \cdot S}{\pi}}, \quad (4.3)$$

$$R_{\text{тр-а}} = \frac{1}{a \cdot S_{\text{к}}}, S_{\text{к}} = \frac{\pi}{L} D^2 + \pi D h, \quad (4.4)$$

где $(h, \lambda,$

$S)_{\text{к}}$ - соответственно, толщина, коэффициент теплопроводности материала и площадь кристалла; $(h, \lambda, S)_{\text{п}}$ - те же параметры, но для соединительного слоя (припоя); λ, C, D, d - соответственно коэффициент теплопроводности материала ножки корпуса (ковар), его толщина, диаметр крышки корпуса и приведенный диаметр ИМС; $a, S_{\text{к}}, h$ - соответственно коэффициент теплоотдачи на конвекцию и излучение с поверхности крышки корпуса, площадь этой поверхности и высота корпуса (ориентировочно $a = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Максимальная температура элементов ИМС определяется по формуле

$$T_{\text{и max}} = T_{\text{АМАХ}} + (R_{\text{к}} + R_{\text{п}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{тк}}) \cdot \Sigma P_{\text{и}},$$

где $\Sigma P_{\text{и}}$ - суммарная мощность, выделяемая ИМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии, в доступной для самостоятельной работы форме, изложены вопросы расчета и конструирования полупроводниковых интегральных микросхем. Представлены справочные данные по технологии изготовления ИМС, таблицы и графики, что позволяет сократить время на расчет и разработку интегральных микросхем.

Данное учебное пособие может быть использовано студентами для самостоятельной работы и при выполнении курсового проекта по дисциплине «Проектирование и технология интегральных микросхем».

Приложение 1

Банк данных о топологии интегральных биполярных транзисторов

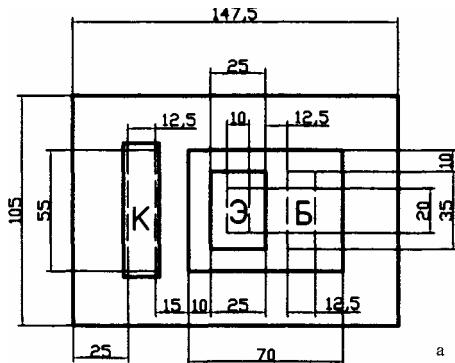


Рис. II. 1а

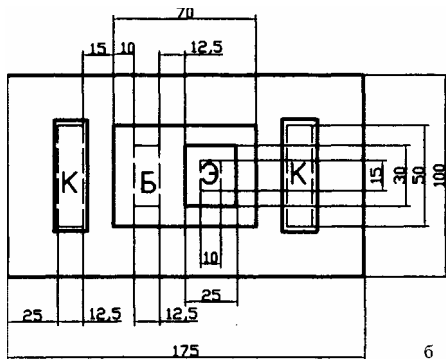


Рис. II 1,б

Продолжение 1 приложения 1

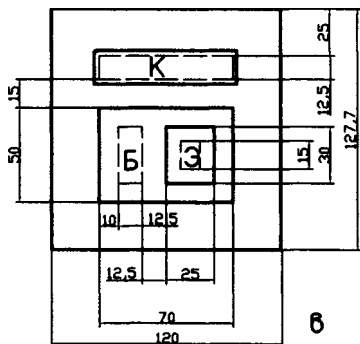


Рис. П.1, в

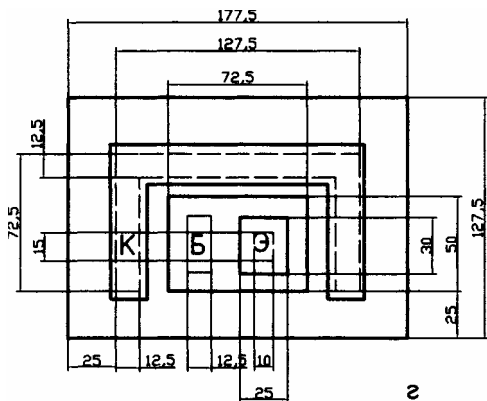


Рис. П.1, г

Рис. П.1, д

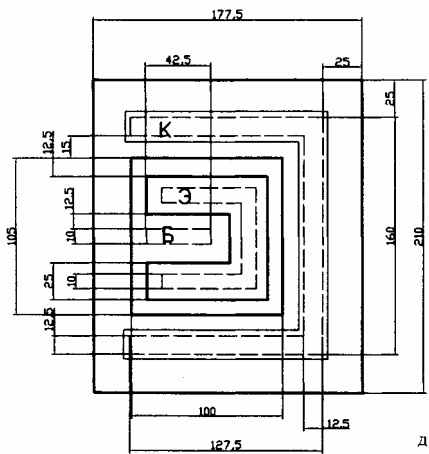
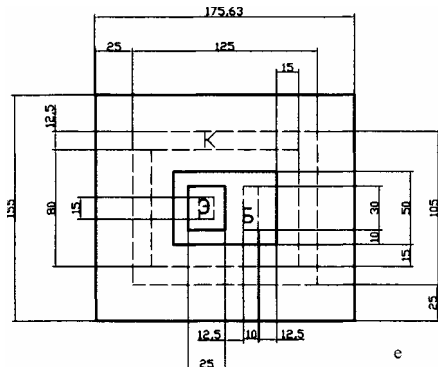


Рис. П.1, е



Продолжение 3 приложения 1

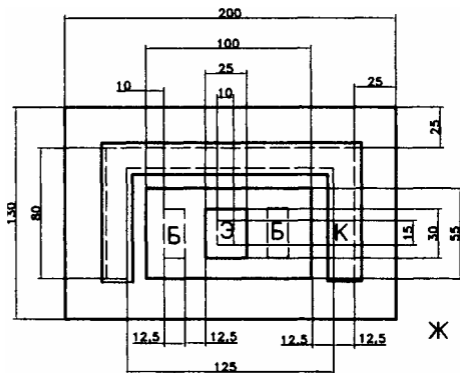


Рис. П.1ж

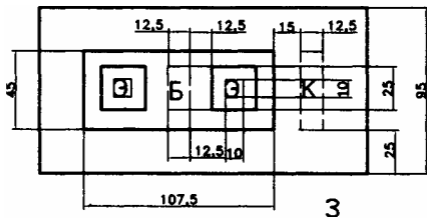


Рис П 1,з

Продолжение 5 приложения 1

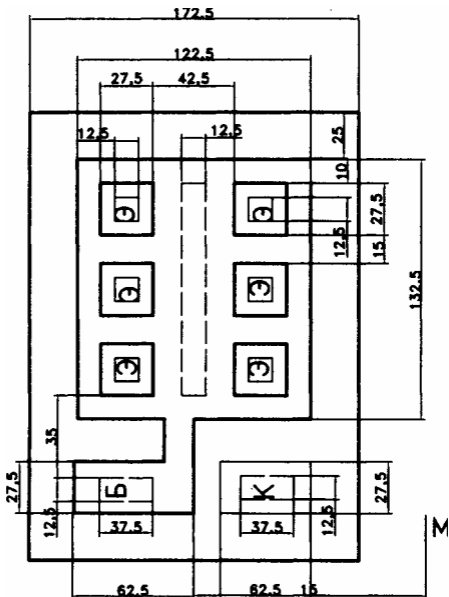


Рис. П.1, м

Приложение 2.

Основные сведения об элементах структур полупроводниковых интегральных схем

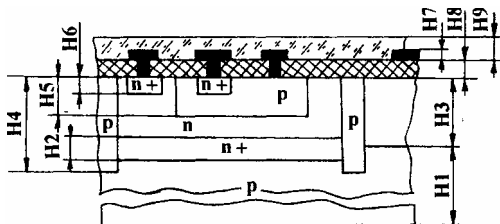


Рис. П2.1. Структура базового элемента интегральной схемы типа 155 ЛАЗ

Таблица П2.1

Сведения об элементах структур полупроводниковых ИС и БИС

Элементы структуры	Тип проводимости	Основные технологические материалы	Толщина элементов (мкм) и её обозначение	Удельное поверхностное сопротивление, Ом/	Способ формирования
Подложка из монокристаллического кремния	p	Очищенный монокристаллический Si, легирующая примесь	H1=325±25	-	Из слитка марки КДБ 10, который получают направленной кристаллизацией на затравку из объема расплава
Скрытый слой	n	Сурьма кристаллическая	H2=3,5±0,2	25±5	Диффузия
Эпитаксиальный слой	n	SiCl ₄ и H ₂	H3=7,9±0,2	2500±5	Осаждение из газовой фазы (хлористый металл)
Разделительная область	p	ВВг ₃	H4= 10±0,2	90±8	Диффузия (для ИС), сочетание ионного легирования и диффузии (для БИС)
Базовая область	p* p**	ВВг ₃	H5=1,65±0,1	180±10* 110±10**	Диффузия (для ИС), сочетание ионного легирования и диффузии (для БИС)

Продолжение таблицы П2.1

Эмиттерная область	n	POCl_3	$\text{H6}=1,2\pm 0,1$	$2\pm 0,5$	Диффузия
Слой металлизации	-	Сплав Al+1,2% Si	$\text{H7}=0,6\pm 0,1$ $1,0\pm 0,1^{***}$	-	Нанесение в вакууме, например, методом ионно-плазменного распыления
Изолирующий слой SiO_2	-	Сухой O_2 -пары воды	$\text{H8}=0,8\pm 0,05^*$	-	Термическое окисление пластин кремния
Пассивирующий слой ФСС	-	SiH_4 , PH	$\text{H9}=0,7\pm 0,05$	-	Осаждение из газовой фазы (пиролиз)
Вертикальный слой **	n	POCl_3	$\text{H10}=6,8\pm 0,2$	45 ± 5	Диффузия
SiO_2 межслойная изоляция	n	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ O_2	$\text{H11}=1,0\pm 0,1$	-	Плазмохимическое осаждение

* для ИС

** для БИС

*** для второго слоя металлизации

Приложение 3

Основные операции технологического маршрута изготовления структуры ИС на биполярных транзисторах (изделие 1 -133ЛА3)

Таблица ПЗ

№ п/п	Операция	Контролируемые параметры технологической среды	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
1	Химическая обработка пластин кремния (типа КДБ 10)	Время t обработки в разных средах, температура T технологической среды (T_C)	Внешний вид пластин после очистки (по количеству светящихся точек в темном поле микроскопа)	Толуол, смесь Каро ¹ , перекисно-аммиачная смесь, вода деионизованная марки А, кислота фтористо-водородная, спирт этиловый ректификованный; багист отбеленный мерсеризованный	Линия «Лада - Электроника» для химической обработки; микроскоп, например, типа НУ-2Е
2	Окисление пластин кремния (выращивание SiO_2) по системе: сухой O_2 -пары воды - сухой O_2 при $T= 1050\text{ }^\circ\text{C}$	T, t, M_r^2	Толщина окисла	Кислород газообразный, азот газообразный, вода деионизованная марки А, 10%-ная HF, фильтр обеззоленный багист отбеленный мерсеризованный	Печь диффузионная типа ДОМ, прибор для измерения толщины окисла, например, эллипсометр

3	<p>Фотолиграфия 1 для вскрытия окон под диффузию сурьмы</p> <p>а) подготовка поверхности пластиц</p> <p>б) нанесение фоторезиста (ФР)</p> <p>в) сушка слоя ФР</p> <p>г) совмещение и экспонирование</p> <p>д) проявление ФР</p> <p>е) задубливание ФР</p> <p>ж) травление SiO_2</p> <p>з) удаление ФР</p>	$T, t, M_{\text{ж}}^3$ $C^4, n_{\text{ц}}$	<p>Внешний вид</p> <p>линейные</p> <p>размеры</p>	<p>Фоторезист позитивный ФП-РН-7, диметилформамид гексаметилдисилазан⁶, травильный раствор (для травления SiO_2), раствор для проявления (0,6%-ная КОН), вода деионизованная марки А</p> <p>смесь Каро спирт этиловый ректификованный, фильтр обеззоленный</p> <p>батист отбеленный мерсеризованный</p>	<p>Линия фотолиграфии «Лада-Электроника»</p>
---	---	---	---	--	--

Смесь Каро - это смесь H_2SO_4 и H_2O_2

² $M_{\text{г}}$ - расход газов

³ $M_{\text{ж}}$ - расход жидких химических реактивов

⁴ c - доза фоторезиста при нанесении.

⁵ $n_{\text{ц}}$ - число оборотов центрифуги в минуту.

⁶ Гексаметилдисилазан - адгезив для фоторезиста

Продолжение 1 таблицы ГВ

№ п/п	Операция	Контролируемые параметры технологической среды	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
4	<p>Диффузия сурьмы для формирования скрытых p-слоев а) первая стадия диффузии (загонка примеси) при $T=1150^{\circ}\text{C}$</p> <p>б) удаление сурьмяносиликатного стекла в) вторая стадия диффузии (разгонка примеси в глубь полупроводника) при $T=1200^{\circ}\text{C}$</p>	T, t, M _r	<p>Внешний вид, удельное поверхностное сопротивление p_с, глубина залегания p-n перехода</p> <p>Х</p>	<p>Азот газообразный (или аргон), сурьма кристаллическая, раствор для выявления p-n перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректифицированный, вода деионизированная марки А, багист отбеленный мерсеризованный, фильтр обеззоленный, фильтр обеззоленный, алмазная паста (на основе тонкого микропорошка)</p>	<p>Печь диффузионная типа ДОМ, установка для измерения Р_с (четырёхзондовая) типа ЦИУС, микроскоп типа МИМ-7, приспособление для получения шарового шлифа, модуль для травления пластин линии химической обработки «Лада-Электроника»</p>
5	<p>Удаление SiO₂ поверхности пластин (после диффузии сурьмы)</p>	T, t	Внешний вид	<p>Травитель (65%-ная HF), вода деионизованная марки А, багист отбеленный мерсеризованный</p>	<p>Модули линии фотолитографии «Лада-Электроника»</p>

Продолжение 2 таблицы ГВ

№ п/п	Операция	Контролируемые параметры технологической среды	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
6	Эпитаксиальное наращивание слоя кремния p - Si при T= 1200°C	T, t, M _r	Толщина эпитаксиального слоя, удельное объемное сопротивление ρ _v ПЛОТНОСТЬ дислокаций (дефектов упаковки линии скольжения)	Тетрахлорид кремния, водород газообразный, азот газообразный, хлор газообразный, травитель для выявления дислокаций вода деионизованная марки А, батист огбеленный мерсеризованный	Установка эпитаксиального наращивания типа «Эпиквар», установка измерения удельного объемного сопротивления ЦИУС, многолучевой интерферометр типа МИСС. микроскоп типа
7	Окисление пластин кремния по системе: сухой O ₂ - пары воды - сухой O ₂ при T=1100°C	Аналогично операции 2			
8	Фотолитография 2 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием разделительных областей): а) - з) аналогично	Аналогично операции 3			

Продолжение3 таблицы ПВ

№ п/п	Операция	Контролируемые параметры технологической среды	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
9	<p>Диффузия бора для формирования разделительных р-областей:</p> <p>а) первая стадия диффузии (загонка примеси) при $T=950^{\circ}\text{C}$</p> <p>б) удаление борсиликатного стекла (БСС) и SiO_2</p> <p>в) вторая стадия диффузии (ра згонка примеси) с одновременным окислением пластин по системе сухой O_2 - пары воды - сухой O_2 при $T=1150^{\circ}\text{C}$</p>	<p>T, t, M_f</p>	<p>Внешний вид. $P_n X_j$</p>	<p>Грехромистый бор, азот газообразный, кислород газообразный, раствор для выявления р-п перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификованный, вода деионизованная марки А, батист отбеленный мерсеризованный</p>	<p>Аналогично операции 4</p>

Продолжение 4 таблицы ПЗ

№ п/п	Операция	Контролируемые параметры технологической среды	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологический и защитных сред	Технологическое оборудование
10	Фотолитография 3 для вскрытия окон под диффузию бора(перед формированием базовых р-областей а)-э)аналогично операции 3	Анал опично операции 3			
И	Диффузия бора для формирования базовых р-областей а)первая стадия диффузии (загонка примеси) при T =950 °С; б)удаление БСС в)вторая стадия диффузии (разгонка примеси в сухом O ₂) при T=1156°С	Анал опично операции 9			
12	Фотолитография 4 для вскрытия окон под диффузию фосфора: а)-э)аналогично операции 3	Анал опично операции 3			
13	Диффузия фосфора для формирования эмиттерных и приконтактных коллекторных п+-областей: а) первая стадия диффузии (загонка примеси) при T= 1000°С; б)термообработка в сухом кислороде при T=1000°С	T, t, M _r	Внешний вид P _s , X _J	Хлорокись фосфора POCl ₃ , кислород газообразный, травильный раствор спирт этиловый ректификованный, батист отбеленный мерсеризованный	Печь диффузионная типа ДОМ, установка для измерения p _s (четырёхзондовая) типа ЦИ-УС, микроскоп типа МИМ-7, модуль (для травления пластин из линии химической обработки «Лада-Электроника»

Продолжение 5 таблицы ПЗ

№ п/п	Операция	Контролируемые параметры технологической среды	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
14	Фотолитография 5 для вскрытия окон под контакты к элементам ИС: а) - аналогично операции 3	Аналогично операции 3			
15	Нанесение в вакууме слоя металлизации	р _с параметры определяющие режим осаждения слоя металлизации	Внешний вид толщина слоя металлизации	Мишень из сплава Al - 1.2 % Si, аргон газообразный, азот жидкий, сжатый воздух	Установка вакуумного напыления «Оратория-5», многолучевой интерферометр типа МИСС
16	Фотолитография по слою металлизации для формирования коммутации элементов ИС: а) - е) з) аналогично операции 3 ж) травление слоя	Аналогично операции 3	Внешний вид, линейные размеры, ВАХ по тестовым структурам	Фоторезист позитивный ФП-РН-7, диметилформамид, гексаметилдисульфид, травильный раствор (для травления сплава Al - Si) раствор для проявления, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификованный, фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный	Линия фотолитографии «Лада-Электроника», микроскоп тив УИМ-25.1, специальный стенд с многозондовой головкой для измерения ВАХ

Продолжение 6 таблицы ПЗ

№ п/п	Операция	Контролируемые параметры технологической среды	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
17	Осаждение из газовой фазы (или пиролитическое) пассивирующего слоя ФСС при T=450°C	T, t, M _r	Внешний вид ИСС	Фосфин PH ₃ , моносилан Si H ₄ , аргон газообразный, кислород газообразный, спирт этиловый ректификованный, батист отбеленный мерсеризованный	Установка типа «Изотрон», интерферометр типа МИИ-4
18	Фотолитография 7 в слое ФСС для вскрытия окон к [контактным площадкам ИС: а)-з) аналогично операции 3	Аналогично операции 3			
19	Термообработка пластин для вжигания металлизации при T=450°C	T, t, M _r	Внешний вид	Азот газообразный	Печь диффузионная типа ДОМ, м [микроскоп типа НУ-2Е
20	функциональный контроль и разбраковка ИС	Выходные параметры измерительных установок	Электрические параметры ИС ⁷	Краска маркировочная, спирт этиловый ректификованный, батист отбеленный мерсеризованный	Измерительные установки для контроля и разбраковки ИС

Электрические параметры ИС - статические и динамические по техническим условиям

Приложение 4.

Виды и причины наиболее типичных дефектов на операциях технологического маршрута изготовления пластин и структур полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах

Таблица П.4

Операция	Виды дефектов	Причины дефектов	Примечания
Резка слитка кремния на пластины	Неплоскостность отрезаемых пластин более допустимой (а)*; сколы, трещины (на поверхности пластины) с размерами более допустимых (б); геометрические параметры и глубина нарушенного слоя поверхности пластины не соответствуют допустимым (в); отклонение от кристаллографической ориентации более допустимого (г)	Изменение режущего инструмента в процессе резки (а); увеличение радиального биения режущей кромки более допустимого (б); неоптимально выбраны режимы резания (такие как скорость резания, рабочая подача слитка и расход смазочно-охлаждающей жидкости) (в); неточность разворота оправки от носителя режущего инструмента (г)	Причины дефектов указаны для резки слитков алмазным кругом с внутренней режущей кромкой. Для слитков Диаметр более 150 мм применяют резку алмазной ленточной пилой, режущую кромку которой изготавливают либо по всей протяженности ленты, либо в виде отдельных сегментов. Последнее, как и сам способ реализации резки, в этом случае при определенных условиях существенно влияет на качество получаемых пластин. После резки слитка шероховатость поверхности пластин составляет 2,0-3,0 мкм
Шлифование пластин кремния	Дефекты геометрической формы пластины (неплоскостность, непараллельность сторон, прогиб, разброс по толщине) более допустимых (а), наличие сколов на кромках пластин (б)	Износ шлифовальных кругов более допустимого (а), нарушение режима шлифования (рабочего давления на пластины, скорости вращения шлифовального круга, постоянства температуры в зоне шлифования либо постоянства вязкости абразивной суспензии во времени) (а, б); отсутствие контроля состояния сепараторов удерживающих пластины при шлифовании (б)	В случае крепления пластин к шлифовальной головке (при шлифовании несвободным абразивом) причиной дефектов могут быть также неравномерность толщины клеящего слоя, недопустимый разброс толщины одновременно шлифуемых пластин и др. После шлифования шероховатость пластин составляет 0,2 - 0,5 мкм

*Обозначения в скобках следует понимать: дефект (а) в графе "Виды дефектов" вызван причиной (а) в графе "Причины дефектов" и

Продолжение 1 таблицы П4

Операция	Виды дефектов	Причины дефектов	Примечания
Полирование пластин	Геометрические параметры пластин (диаметр, толщина, длина базового среза, непараллельность сторон, плоскостность, прогиб) не соответствуют допустимым (а), отклонение от кристаллографической ориентации более допустимого (б); количество и суммарная длина рисок более допустимых (в); количество частиц загрязнений на пластине более допустимого (г)	Износ полировальника более допустимого; неплоскостность установки полировальника (либо план-шайбы) более допустимой (а, б); внесение инородных частиц и пузырьков воздуха под пластину при ее наклеивании на план-шайбу (а, б); наличие уплотненных загрязнений на поверхности полировальника (а, б); нестабильности (снижение) температуры при финишном полировании (в); наличие структурных нарушений (г)	Структурные нарушения, вносимые абразивной обработкой (поверхностный рельеф, трещины, пластически деформированные области и т.д.) выявляются и минимизируются на этапе обработки данной технологической операции. Шероховатость поверхности пластин после финишного (химико-механического) полирования составляет менее 0,05 мкм
Химическая обработка пластин	Остатки загрязнения в виде разводов, пятен подтеков и т.д. (а); количество точечных инородных включений (в том числе адсорбированных) более допустимого (б), количество гидрофобных загрязнений более допустимого (в)	Нарушение режимов финишной промывки проточной и деионизованной водой и сушки пластин (а); некачественная отмывка в кислотных растворах (б); нарушение режимов очистки в неполярном органическом растворителе и промежуточной промывки (в)	Степень чистоты поверхности пластин после очистки в условиях производства определяется количеством светящихся точек в поле зрения микроскопа (обычно в темном поле при косом освещении); наличие жировых (гидрофобных) загрязнений оценивают по времени смачиваемости (либо углу смачивания) поверхности пластины. Очистка - многократно повторяющаяся операция на разных этапах изготовления микросхем, поэтому очистительные среды могут быть разными в зависимости от типа загрязнений, вносимых и остающихся а предыдущей операции

Продолжение 2 таблицы П4

Операция	Виды дефектов	Причины дефектов	Примечания
Диффузия примесей кремния в	<p>Величина боковой диффузии более допустимой (а), наличие эрозии (б); неравномерность диффузионного фронта по глубине более допустимой (в); образование промежуточных фаз на поверхности диффузионных областей (г); значения ρ, χ и их разброс по пластине не соответствуют допустимым (д)</p>	<p>Скопление дислокаций в приповерхностном слое (а, в, д), завышение расхода диффузанта в технологической среде при отсутствии кислорода (б, в, г); неоптимальный температурно-временной режим процесса диффузии</p>	<p>На границах диффузионных областей при высоком уровне легирования возможно появление неконформных дислокаций несоответствия, краевые и винтовые дислокации возможны, если уровень напряжений кристаллической решетки (из-за различия размеров атомов примеси и полупроводника) превышает предел текучести материала, микродефекты и линии скольжения выявляют селективным травлением и определяют их среднюю плотность по подсчетам числа микродефектов в нескольких полях зрения микроскопа; структурные дефекты обычно выявляют и минимизируют при отработке технологического процесса</p>
Эпитаксиальное наращивание слоя кремния	<p>Плотность дефектов упаковки и дислокаций более допустимой (а), значения ρ и толщины эпитаксиального слоя не соответствуют допустимым (б)</p>	<p>Наличие на поверхности пластины различного рода загрязнений, механических нарушений, и т.д. (а, б), кристаллографическое несоответствие разная степень легирования пластины и эпитаксиальной пленки а также высокий уровень механических и термических напряжений (а, б) несоблюдение режима процесса эпитаксии (а, б)</p>	

Продолжение 3 таблицы П4

Операция	Виды дефектов	Причины дефектов	Примечания
Термическое окисление пластин	Толщина окисла не соответствует заданной (а); наличие матовости в пленках SiO_2 (б), наличие разводов, инородных включений (в)	Нарушение температурно-временных режимов процесса окисления (а), повышенная дефектность исходной пластины (б, в); несоблюдение чистоты проводимого процесса (в частности технологической среды) (б, в)	Другие дефекты, например повышенную пористость, недопустимые электрофизические характеристики границы раздела Si-SiO_2 , линии скольжения, коробление пластин контролируют и устраняют на этапе обработки технологического процесса
Фото литография по слою SiO_2	Несовмещение топологического рисунка более допустимого (а); нарушения геометрии топологических элементов более допустимых (б), наличие неотравленных участков SiO_2 в зонах травления (в); наличие макродефектов (царапин и др.) в слое SiO_2 (г), расправливание краев окисла (ширина клина травления) более допустимого (д), уход линейных размеров топологических элементов более допустимого (е), воспроизводимость размеров контролируемых элементов не соответствует заданной точности (ж)	Сбой в работе системы контроля точности совмещения (либо ошибка оператора) (а), дефекты фотшаблона либо загрязнения (б, в, г), нарушение технологии процесса травления (б, в, д); недопустимо большой зазор между фотошаблоном и пластиной (д, е); нарушение режима проявления (д, е), недостаточная адгезия фоторезиста к пластине (е, ж); разброс по толщине слоя фоторезиста более допустимого (ж), посторонние включения в слое фоторезиста (в, е, ж)	При температуре задубливания более 145 °С в слое фоторезиста происходят терморезистивные превращения, в результате которых он теряет способность растворяться в органических растворителях, что усложняет удаление использованной маски

Продолжение 4 таблицы П4

Операция	Виды дефектов	Причины дефектов	Примечания
Ионное легирование кремния с последующей термообработкой	Локально аморфизированные участки в легированных областях (а); удельное поверхностное спрогибление не соответствует допустимому (б)	Энергия ионного пучка превышает требуемую (а), доза облучения и плотность тока ионного пучка не соответствуют допустимым значениям (б)	Другие дефекты, например, скопления вакансий, дислокации и т.д. обнаруживаются с помощью электронной микроскопии либо рентгеноструктурного анализа на этапе обработки технологических режимов ионного легирования
Вакуумное напыление слоя металлизации	Разброс по толщине слоя металлизации и p_s не соответствуют допустимым (а), структура пленки не соответствует эталонной (б), адгезионная прочность менее допустимой (в); пятна, разводы, инородные включения, пустоты, царапины с размерами более допустимых на единицу площади пластины (г)	Наличие загрязнений и дефектов на пластине перед напылением (а, б, в, г), остаточное давление в рабочей камере выше допустимого (а, б, в), наличие градиентов температуры по поверхности пластины (а, б, в); неоптимально выбрана скорость осаждения (а, б, в), неоптимальны энергия и плотность молекулярного потока (а, б, в, г)	Причины появления дефектов при вакуумном напылении могут также быть связаны со способом переноса материала металлизации и спецификой конструкции рабочей камеры

Продолжение 5 таблицы П4

Операция	Виды дефектов	Причины дефектов	Примечания
Фото-лито-графия по слою металлизации	Геометрические размеры проводящих элементов не соответствуют допустимым (а) "перемычки" между элементами металлизации (недогравленные участки) с размерами более допустимых (б), несомещение элементов металлизации с контактными окнами и другими элементами структуры микросхемы более допустимого (в), пустоты или царапины с размерами более допустимых на элементах металлизации (проводящих дорожках, контактных площадках и т.д.) (г), признаки коррозии отслаивания элементов металлизации(д)	Нарушение режима задубливания фоторезиста (недостаточная его адгезия к проводящему слою) (а): неправильное соотношение компонентов в травителе либо нарушение режима травления (а, б); протекание электрохимических процессов в системе Al - Si - травитель (д); некачественное проявление (а, г); дефекты фотомаски (а, б, г); увеличение межоперационного времени хранения (д), наличие локальных загрязнений и инородных включений, внесенных на начальных операциях фотолитографии и (или) перед напылением проводящего слоя (д) отсутствие должного контроля точности совмещения (в)	При выполнении фотолитографии особое значение имеет чистота атмосферы производственного помещения. Требуется (не хуже 10 или 100 классов чистоты, так как осаждение загрязнений (посторонних частиц) из атмосферы на объект производства и фотомаски приводит к переносу и суммированию дефектов после экспонирования фоторезиста и до завершения технологического цикла

Продолжение 6 таблицы П4

Операция	Виды дефектов	Причины дефектов	Примечания
Осаждение межслойного диэлектрика и защитного покрытия	Разброс по толщине слоя более допустимого (а), пустоты, царапины, каналы, кристаллические включения, инородные включения с размерами более допустимых на единицу площади пластины (б)	Наличие повышенных температурных градиентов на осаждаемой поверхности в процессе формирования данных покрытий (а, б); несоблюдение технологии (а, б); отсутствие контроля чистоты материалов в технологических сред (б)	Параметры, характеризующие изолирующие и пассивирующие свойства диэлектрических покрытий, оценивают и стараются оптимизировать при обработке технологий осаждения диэлектрических покрытий
Функциональный контроль микросхем	Функциональные параметры микросхем не соответствуют заданным по техническим условиям	Проявление в присутствии электрического поля эффектов типа электромиграции частиц алюминия, дрейфа ионов инородных примесей туннелирования, разрастания кристаллитов, например, алюминия, и др., приводящих к утечкам тока в диэлектриках и p-n переходах, к проколу p-n переходов, разрывам разводки в элементах, повышению контактного сопротивления, коротким замыканиям между уровнями металлизации и др. Появление структурных дефектов в полупроводнике в результате влияния градиентов температуры и механических напряжений, что приводит к появлению дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне и соответственно к неуправляемому изменению проводимости, времени жизни, генерации и рекомбинации носителей заряда	Для повышения качества готовых структур микросхем обычно осуществляют межэстажонный (промежуточный) контроль (при изготовлении структуры ИС или БИС) по тестовым элементам микросхемы, на которых измеряют ВАХс применением измерительных установок, оборудованных специальными зондовыми головками. По виду ВАХ можно не только выявлять и классифицировать дефекты, но и судить о настроенности и работоспособности всего технологического процесса изготовления

Приложение 5.

Конструктивно-технологические ограничения при конструировании ИМС на би-полярных транзисторах, выполненных по планарно-эпитаксиальной технологии с использованием изоляции p-n переходом

Таблица П5

Минимально допустимые размеры, мкм

Ширина линии скрайбирования слоя	60
Расстояние от центра скрайбирующей полосы до края слоя металлизации или до края диффузионной области.....	50- 100
Размер контактных площадок для термокомпрессионной приварки проводников d_1	100x100
Расстояние между контактными площадками d_2	70
Размер контактных площадок тестовых элементов рабочей схемы.....	50x50
Ширина проводника d_3 :	
при длине ≤ 50 мкм.....	4
при длине ≥ 50 мкм	6
Расстояние между проводниками d_4 :	
при длине ≤ 50 мкм.....	3
при длине ≥ 50 мкм	4
Ширина области разделительной диффузии d_5	4
Расстояние от базы до области разделительной диффузии d_6 ..	10
Расстояние между краем области подлегирования коллекторного контакта и краем разделительной области d_7	10
Расстояние между краем разделительной области и краем скрытого p ⁺ -слоя d_8	10
Расстояние между краем контактного окна в окисле к коллектору и краем базы d_9	7
Расстояние между краем контактного окна в окисле к базе и краем базы d_{10}	3
Расстояние между эмиттерной и базовой областями d_{11}	3
Расстояние между краем контактного окна в окисле к эмиттеру и краем эмиттера d_{12}	3
Расстояние между контактным окном к базе и эмиттером d_{13}	4
Расстояние между базовыми областями, сформированными в одном коллекторе.....	9
Расстояние между эмиттерными областями, сформированными в одной базе.....	6

Расстояние между контактными окнами к коллектору и областью разделительной диффузии d_{14}	10
Размеры контактного окна к базе d_{15}	4x6
Размеры контактного окна к эмиттеру d_{16}	4 x 4 или 3x5
Ширина области подлегирования n^{+} - слоя в коллекторе d_{17}	8
Ширина контактного окна к коллектору d_{18}	4
Ширина резистора d_{19}	5
Размеры окна вскрытия в окисле.....	2,5x2,5
Перекрытие металлизацией контактных окон в окисле элементов ИМС d_{20}	2
Расстояние от края контактного окна kr^{+} -разделительным областям для подачи смещения до края области разделения d_{21}	6
Расстояние от края контактного окна к изолированным областям n -типа для подачи смещения до края области разделения d_{22}	6
Ширина диффузионной перемычки.....	3
Размер окна в пассивирующем окисле d_{23}	100x100
Расстояние от края окна в пассивации до края контактной площадки d_{24}	6
Расстояние между соседними резисторами d_{25}	7
Расстояние между диффузионными и ионно-легированными резисторами.....	4
Расстояние между контактной площадкой и проводящей дорожкой d_{26}	20
Ширина скрытого n^{+} - слоя.....	4
Расстояние между контактными площадками тестовых элементов.....	40

Приложение 6
Типичные характеристики интегральных полупроводниковых резисторов
 Таблица П6

Тип резистора	Толщина, мкм	Удельное поверхностное электрическое сопротивление R_s , Ом/	Погрешность номинала сопротивления γ_R %	ТКС, α_R град ⁻¹	Удельная паразитная емкость $C_{ст}$, пф/мм ²
1. Диффузионный на базовом слое	2,5 - 3,5	100 - 300	$\pm(10-20)$	$\pm(0,5-3) \cdot 10^{-3}$	150-350
2. Диффузионный на эмиттерном слое	1,5-2,5	2-5	$\pm(10-20)$	$\pm(1-5) \cdot 10^{-3}$	$(1-1,5) \cdot 10^3$
3. Пинч-резистор	0,5-1,0	$(2-15) \cdot 10^3$	± 50	$\pm(1,5-3) \cdot 10^{-3}$	$(1-1,5) \cdot 10^3$
4. На эпитаксиальном слое	7-10	$(0,5-5) \cdot 10^3$	$\pm(15-25)$	$\pm(2-4) \cdot 10^{-3}$	80-100
5. Ионно-лепированный p-типа	0,1-2	$(0,5-1) \cdot 10^3$	$\pm(15-20)$	$\pm(1,5-5) \cdot 10^{-3}$	200 - 350

Б И Б Л И О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С П И С О К

1. Конструирование и технология микросхем, курсовое проектирование/
Под ред. Л.А. Коледова. - М: Высш. шк, 1984
2. Матсон Э.А. Конструирование и технология микросхем. - Минск: Высш. шк, 1985
3. Матсон Э.А., Крыжановский Д.В. Справочное пособие по конструированию микросхем. - Минск: Высш. шк, 1982 .
4. Алексеенко А.Г., Шадрин И.И. Микросхемотехника. - М.: Радио и связь, 1990.
5. Березин А.С., Мочапкина О.Р. Технология и конструирование микросхем. - М.: Радио и связь, 1983.
6. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники. - М.: Радио и связь, 1983.
7. Коледов Л.А., Патрик Н.И. Конструирование и технология полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах. Уч. пособие. - М.: Изд-во МИЭТ, 1983,
8. Симонов Б.М., Заводяна А.В., Грушевский А.М. Конструкторско - технологические аспекты разработки ИС и микросборок. Уч. пособие - М.: Изд-во МИЭТ, 1998.

Учебное издание

РОМАНОВА Маргарита Петровна

Проектирование и технология
микросхем

Учебное пособие

Подписано в печать 27.10. 2005. Формат 60 x 84/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,12

Уч.- изд. л. 5,00 Тираж 150 экз. Заказ 1071,

Ульяновский государственный технический университет
432 027 г. Ульяновск ул. Сев. Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец д. 32