

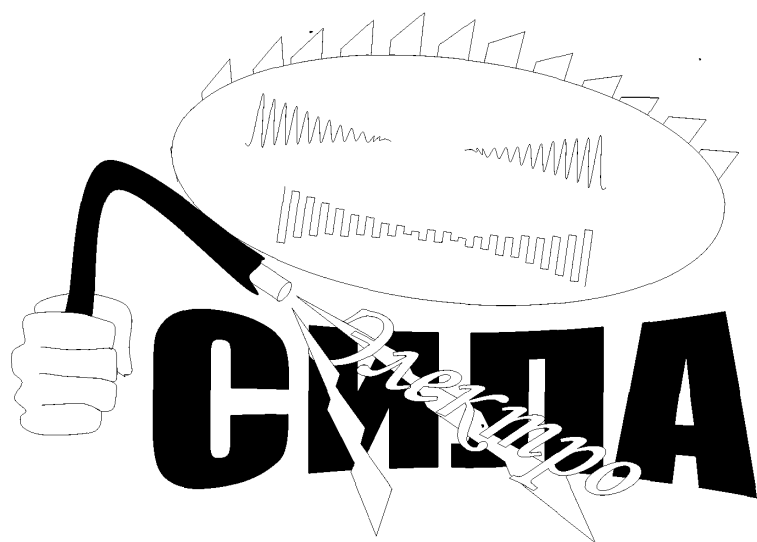
Э. А. МАТСОН
Л. В. КРЫЖАНОВСКИЙ



THE
S

Э. А. МАТСОН,
Д. В. КРЫЖАНОВСКИЙ

СПРАВОЧНОЕ
ПОСОБИЕ
ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ
МИКРОСХЕМ



МИНСК
«ВЫШЭЙШАЯ ШКОЛА»
1982

Рецензенты: В. А. Горохов, зав. кафедрой микроэлектроники и конструирования радиоаппаратуры Московского электротехнического института связи, д-р техн. наук, проф.; Л. А. Коледов, зав. кафедрой микроэлектроники Московского института электронной техники, д-р техн. наук, проф.

**Эдуард Альфредович Матсон
Доремидонт Владимирович Крыжановский
СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ
ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ МИКРОСХЕМ**

Редактор С. С. Голод. Мл. редакторы Р. А. Масловская, В. М. Кушнелевич. Обложка В. Ф. Гринкевича. Худож. редактор Ю. С. Сергачев. Техн. редактор И. П. Тихонова. Корректор И. И. Ганелес.

ИБ № 1150

Сдано в набор 17.11.81. Подписано в печать 06.05.82. АТ 14661. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 14. Усл. кр.-отг. 14. Уч.-изд. л. 15,68. Тираж 19 000 экз. Заказ 2118. Цена 1 р. 10 к.

Издательство «Высшая школа» Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220048, Минск, проспект Машерова, 11. Минское производственное полиграфическое объединение им. Я. Коласа. 220005, Минск, ул. Красная, 23.

Матсон Э. А., Крыжановский Д. В.

М 33 Справочное пособие по конструированию микросхем.— Мн.: Выш. школа, 1982.—224 с., ил.

В пер.: 1 р. 10 к.

Пособие содержит изложение основных вопросов расчета и конструирования интегральных микросхем с привлечением большого количества справочных данных в этой области техники. Значительный объем фактического материала, представленного в виде таблиц и графиков, позволяет сократить время на поиск сведений, необходимых при разработке интегральных микросхем.

Для инженерно-технических работников предприятий радио- и электронной промышленности, может быть также использовано студентами высших и средних специальных учебных заведений при изучении вопросов микроэлектроники.

М 240300000—078 60—82
М 304(05)—82

ББК 32.844.1я2
6Ф2.1

© Издательство «Высшая школа», 1982.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение эффективности производства радиоэлектронной аппаратуры и улучшение ее качества может быть достигнуто лишь на основе широкого применения интегральных микросхем (ИМС). В последние годы производство ИМС вышло за рамки узкоспециализированных предприятий и освоено предприятиями-изготовителями аппаратуры. Круг инженерно-технических работников, занятых разработкой и изготовлением ИМС, значительно расширился.

Для инженерной разработки вопросов, связанных с конструированием и расчетом ИМС, требуется большое количество данных справочного характера. В отечественной литературе, однако, справочников по такой тематике нет. Предлагаемое пособие является первой попыткой обобщения разрозненных справочных данных для сокращения времени на их поиск при конструировании и расчете ИМС. В нем представлены материалы как общего характера, относящиеся к классификации, этапам разработки ИМС, оформлению конструкторской документации, их защите и герметизации, так и конкретные данные, необходимые для разработки микроэлектронных изделий, изготавливаемых по полупроводниковой, тонко- и толстопленочной технологиям. Некоторые материалы, касающиеся расчета полевого транзистора с прямосмещенным $p-n$ -переходом затвора и автоматизированного расчета биполярного транзистора, являются оригинальными.

Пособие включает сведения наиболее универсального характера. Авторы надеются, что оно будет полезным не только специалистам радиоэлектронной промышленности, но также преподавателям и студентам вузов и техникумов соответствующего профиля.

Справочник не претендует на полноту освещения всех вопросов, с которыми может столкнуться конструктор-технолог по ИМС. Кроме того, поскольку микроэлектроника является одной из наиболее быстро развивающихся областей техники, вполне вероятно, что ко времени поступления пособия к читателю в научно-технической литературе могут появиться новые данные.

Главы 1, 4, 5, 6, 7 и предисловие написаны Э. А. Матсоном, главы 2, 3, 8 — Д. В. Крыжановским.

Авторы благодарят рецензентов: зав. кафедрой микроэлектроники Московского института электронной техники доктора технических наук, профессора Л. А. Коледова и зав. кафедрой мик-

роэлектроники и конструирования радиоаппаратуры Московского электротехнического института связи доктора технических наук, профессора В. А. Горохова за ценные советы и замечания, способствовавшие улучшению рукописи.

Большую помощь в оформлении справочного пособия оказали сотрудники кафедры конструирования и производства электронно-вычислительной аппаратуры Минского радиотехнического института Я. И. Воронина, М. Е. Новицкая, С. А. Гузик, Г. В. Комендантова и Т. В. Куксо, за что авторы выражают им свою признательность.

Все замечания и пожелания просим направлять по адресу: 220048, Минск, проспект Машерова, 11, издательство «Вышэйшая школа».

Авторы

1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1.1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Микроэлектроника и микроэлектронные изделия

Микроэлектроника — область электроники, охватывающая проблемы исследования, конструирования, изготовления и применения микроэлектронных изделий.

Микроэлектронное изделие — электронное устройство с высокой степенью миниатюризации.

Интегральная микросхема — микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Элемент ИМС — часть интегральной микросхемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации. Под электрорадиоэлементом понимают транзистор, диод, резистор, конденсатор и др.

Компонент ИМС — часть интегральной микросхемы, реализующая функции какого-либо электрорадиоэлемента, которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Полупроводниковая ИМС — интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

Пленочная ИМС — интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в виде пленок. Частными случаями пленочных интегральных микросхем являются тонкопленочные и толстопленочные ИМС.

Тонкопленочная ИМС — интегральная микросхема с толщиной пленок до 1 мкм, элементы которой изготавливаются преимущественно методами вакуумного распыления и осаждения.

Толстопленочная ИМС — интегральная микросхема с толщиной пленок 10—70 мкм, элементы которой изготавливаются методами трафаретной печати (сеткография).

Гибридная ИМС — интегральная микросхема, содержащая, кроме элементов, компоненты и (или) кристаллы. Частным случаем гибридной интегральной микросхемы является многокристальная интегральная микросхема.

Аналоговая ИМС — интегральная микросхема, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Частным случаем аналоговой ИМС является микросхема с линейной характеристикой (линейная микросхема).

Цифровая ИМС — интегральная микросхема, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискрет-

ной функции. Частным случаем цифровой микросхемы является логическая микросхема.

Корпус ИМС — часть конструкции интегральной микросхемы, предназначенная для защиты микросхемы от внешних воздействий и для соединения с внешними электрическими цепями посредством выводов.

Подложка ИМС — заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных интегральных микросхем, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

Плата ИМС — часть подложки (подложка) гибридной (пленочной) интегральной микросхемы, на поверхности которой нанесены пленочные элементы микросхемы, межэлементные и межкомпонентные соединения и контактные площадки.

Полупроводниковая пластина — заготовка из полупроводникового материала, используемая для изготовления полупроводниковых интегральных микросхем.

Кристалл ИМС — часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы элементы полупроводниковой микросхемы, межэлементные соединения и контактные площадки.

Контактная площадка ИМС — металлизированный участок на плате или на кристалле, служащий для присоединения выводов компонентов и интегральных микросхем, перемычек, а также для контроля ее электрических параметров и режимов.

Бескорпусная ИМС — интегральная микросхема, не защищенная корпусом и предназначенная для использования в гибридных интегральных микросхемах, микросборках, герметизируемых блоках и аппаратуре.

Вывод бескорпусной ИМС — проводник, соединенный с контактной площадкой кристалла интегральной микросхемы и предназначенный для электрического соединения и механического крепления бескорпусной интегральной микросхемы при ее соединении с внешними электрическими цепями. Выводы бескорпусной ИМС могут быть жесткими (шариковые, столбиковые, балочные) и гибкими (лепестковые, провололочные). Гибкие выводы бескорпусной ИМС для механического крепления не применяются.

Плотность упаковки ИМС — отношение числа элементов и компонентов интегральной микросхемы к ее объему (объем выводов не учитывается).

Степень интеграции ИМС — показатель степени сложности микросхемы, характеризуемый числом содержащихся в ней элементов и компонентов. Определяется формулой $k = \lg N$, где k — коэффициент, определяющий степень интеграции, округляемый до ближайшего большего целого числа; N — число элементов и компонентов, входящих в ИМС.

Серия ИМС — совокупность типов интегральных микросхем, которые могут выполнять различные функции, имеют единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначены для совместного применения.

Микросборка — микросистемное изделие, выполняющее определенную функцию и состоящее из элементов, компонентов и (или) интегральных микросхем (в корпусах или бескорпусных) и других электрорадиоэлементов, находящихся в различных сочетаниях, разрабатываемое и изготавливаемое производителями конкретной радиоэлектронной аппаратуры для улучшения показателей ее миниатюризации.

Микроблок — микросистемное изделие, которое, кроме микросборок, может содержать интегральные микросхемы и (или) компоненты.

Уровень миниатюризации — количественная мера совокупности технических решений, направленных на эффективное использование

объема, веса и потребляемой энергии аппаратуры при обеспечении характеристик, определяющих пригодность ее применения по заданному назначению.

Критериями уровня миниатюризации являются: показатель соответствия РЭА современному уровню развития микросистемных изделий; показатель соответствия применяемых в РЭА изделий современному уровню их развития; показатель эффективности комплексной миниатюризации аппаратуры; показатель технической совместимости изделий электронной техники и электротехники с интегральными микросхемами.

Физические элементы полупроводниковых приборов

Электрический переход — переходный слой в полупроводниковом материале между двумя областями с различными типами электропроводности или разными значениями удельной электрической проводимости (одна из областей может быть металлом).

Электронно-дырочный переход — электрический переход между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электропроводность n -типа, а другая p -типа.

Электронно-электронный переход — электрический переход между двумя областями полупроводника n -типа, обладающими различными значениями удельной электрической проводимости.

Дырочно-дырочный переход — электрический переход между двумя областями полупроводника p -типа, обладающими различными значениями удельной электрической проводимости.

Резкий переход — электрический переход, в котором толщина области изменения концентрации примеси значительно меньше толщины области пространственного заряда (под толщиной области понимают ее размер в направлении градиента концентрации примеси).

Плавный переход — электрический переход, в котором толщина области изменения концентрации примеси сравнима с толщиной области пространственного заряда.

Плоскостной переход — электрический переход, у которого линейные размеры, определяющие его площадь, значительно больше толщины.

Диффузионный переход — электрический переход, полученный в результате диффузии атомов примеси в полупроводнике.

Планарный переход — диффузионный переход, образованный в результате диффузии примеси сквозь отверстие в защитном слое, нанесенном на поверхность полупроводника.

Конверсионный переход — электрический переход, образованный в результате конверсии типа электропроводности полупроводника, вызванной обратной диффузией примеси в соседнюю область или активацией атомов примеси.

Сплавной переход — электрический переход, образованный в результате сплавления в полупроводник и последующей рекристаллизации металла или сплава, содержащего донорные и (или) акцепторные примеси.

Выращенный переход — электрический переход, образованный при выращивании полупроводника из расплава.

Эпитаксиальный переход — электрический переход, образованный эпитаксиальным наращиванием (эпитаксиальное наращивание — создание на монокристаллической подложке слоя полупроводника, сохраняющего кристаллическую структуру подложки).

Гомогенный переход — электрический переход, образованный в результате контакта полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны.

Гетерогенный переход — электрический переход, образованный в результате контакта полупроводников с различной шириной запрещенной зоны.

Переход Шоттки — электрический переход, образованный в результате контакта между металлом и полупроводником.

Выпрямляющий переход — электрический переход, электрическое сопротивление которого при одном направлении тока больше, чем при другом.

Омический переход — электрический переход, сопротивление которого не зависит от направления тока в заданном диапазоне значений токов.

Эмиттерный переход — электрический переход между эмиттерной и базовой областями полупроводникового прибора.

Коллекторный переход — электрический переход между базовой и коллекторной областями полупроводникового прибора.

Базовая область — область полупроводникового прибора, в которую инжектируются неосновные для этой области носители заряда.

Эмиттерная область — область полупроводникового прибора, назначением которой является инжекция носителей заряда в базовую область.

Коллекторная область — область полупроводникового прибора, назначением которой является экстракция носителей из базовой области.

Активная часть базовой области биполярного транзистора — часть базовой области биполярного транзистора, в которой накопление или рассасывание неосновных носителей заряда происходит за время перемещения их от эмиттерного перехода к коллекторному.

Пассивная часть базовой области биполярного транзистора — часть базовой области биполярного транзистора, в которой для накопления или рассасывания неосновных носителей заряда необходимо время большее, чем время их перемещения от эмиттерного перехода к коллекторному.

Проводящий канал — область в полупроводнике, в которой регулируется поток носителей заряда (данное понятие не следует смешивать с «каналом утечки», возникающим в месте выхода $p-n$ -перехода на поверхность кристалла).

Исток — электрод полевого транзистора, через который в проводящий канал втекают носители заряда.

Сток — электрод полевого транзистора, через который из проводящего канала вытекают носители заряда.

Затвор — электрод полевого транзистора, на который подается электрический сигнал.

Структура полупроводникового прибора — последовательность граничащих друг с другом областей полупроводника, различных по типу электропроводности или по значению удельной проводимости, обеспечивающая выполнение полупроводниковым прибором его функций.

Структура металл — диэлектрик — полупроводник — структура, состоящая из последовательного сочетания металла, диэлектрика и полупроводника.

Структура металл — окисел — полупроводник — структура, состоящая из последовательного сочетания металла, окисла на поверхности полупроводника и полупроводника.

Мезоструктура — структура, имеющая форму выступа, образованного удаленным периферийных участков кристалла полупроводника либо наращиванием.

Обедненный слой — слой полупроводника, в котором концентрация основных носителей заряда меньше разности концентраций ионизованных доноров и акцепторов.

Запирающий слой — обедненный слой между двумя областями полупроводника с различными типами электропроводности или между полупроводником и металлом.

Обогащенный слой — слой полупроводника, в котором концентрация основных носителей заряда больше разности концентраций ионизованных доноров и акцепторов.

Инверсный слой — слой у поверхности полупроводника, в котором тип электропроводности отличается от типа электропроводности в объеме полупроводника в связи с наличием электрического поля поверхностных состояний, внешнего электрического поля у поверхности или поля контактной разности потенциалов.

Явления в полупроводниковых приборах

Прямое направление включения $p-n$ -перехода — направление приложения напряжения, при котором происходит понижение потенциального барьера в $p-n$ -переходе.

Обратное направление включения $p-n$ -перехода — направление приложения напряжения, при котором происходит повышение потенциального барьера в $p-n$ -переходе.

Пробой $p-n$ -перехода — явление резкого увеличения дифференциальной проводимости $p-n$ -перехода при достижении обратным напряжением (током) критического для данного прибора значения (необратимые изменения в переходе не являются необходимым следствием пробоя).

Электрический пробой $p-n$ -перехода — пробой $p-n$ -перехода, обусловленный лавинным размножением носителей заряда или туннельным эффектом.

Лавинный пробой $p-n$ -перехода — электрический пробой $p-n$ -перехода, вызванный лавинным размножением носителей заряда под действием сильного электрического поля.

Туннельный пробой $p-n$ -перехода — электрический пробой $p-n$ -перехода, вызванный туннельным эффектом.

Тепловой пробой $p-n$ -перехода — пробой $p-n$ -перехода, вызванный ростом числа носителей заряда в результате нарушения равновесия между выделяемым в $p-n$ -переходе и отводимым от него теплом.

Модуляция толщины базы — изменение толщины базовой области, вызванное изменением толщины запирающего слоя при изменении значения обратного напряжения, приложенного к коллекторному переходу.

Эффект смыкания — смыкание обедненного слоя коллекторного перехода в результате его расширения на всю толщину базовой области с обедненным слоем эмиттерного перехода.

Накопление неравновесных носителей заряда в базе — увеличение концентрации и величины зарядов, образованных неравновесными носителями заряда в базе в результате увеличения инжекции или генерации носителей заряда.

Рассасывание неравновесных носителей заряда в базе — уменьшение концентрации и величины зарядов, образованных неравновесными носителями заряда в базе в результате уменьшения инжекции или рекомбинации.

Виды полупроводниковых приборов и пассивных электрорадиоэлементов

Полупроводниковый прибор (ПП) — прибор, действие которого основано на использовании свойств полупроводника.

Набор полупроводниковых приборов — совокупность полупроводниковых приборов, собранных в единую конструкцию, не соединенных электрически или соединенных по одноименным выводам (матрица полупроводниковых приборов).

Полупроводниковый диод — полупроводниковый прибор с одним электрическим переходом и двумя выводами.

Туннельный полупроводниковый диод — полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике при прямом направлении тока участка отрицательной дифференциальной проводимости.

Обращенный полупроводниковый диод — полупроводниковый диод на основе полупроводника с критической концентрацией примеси, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

Сверхвысокочастотный полупроводниковый диод — полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования и обработки сверхвысокочастотного сигнала.

Лавинно-пролетный полупроводниковый диод — полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного размножения носителей заряда при обратном смещении электрического перехода и предназначенный для генерации сверхвысокочастотных колебаний.

Инжекционно-пролетный полупроводниковый диод — полупроводниковый диод, работающий в режиме инжекции носителей заряда в область запиорного слоя и предназначенный для генерации сверхвысокочастотных колебаний.

Переключательный полупроводниковый диод — полупроводниковый диод, предназначенный для применения в устройствах управления уровнем сверхвысокочастотной мощности.

Диод Ганна — полупроводниковый диод, действие которого основано на появлении отрицательного объемного сопротивления под воздействием сильного электрического поля, предназначенный для генерирования и усиления сверхвысокочастотных колебаний.

Диод Шоттки — полупроводниковый диод, выпрямительные свойства которого основаны на взаимодействии металла и обедненного слоя полупроводника.

Варикап — полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости емкости от обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

Параметрический полупроводниковый диод — варикап, предназначенный для применения в диапазоне сверхвысоких частот в параметрических усилителях.

Полупроводниковый стабилизатор — полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя при обратном смещении слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения.

Полупроводниковый стабилитрон — полупроводниковый диод, напряжение на котором в области прямого смещения слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения.

Биполярный транзистор — полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими переходами и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда (работа биполярного транзистора зависит от носителей обеих полярностей).

Бездрейфовый транзистор — биполярный транзистор, в котором перенос неосновных носителей заряда через базовую область осуществляется в основном посредством диффузии.

Дрейфовый транзистор — биполярный транзистор, в котором перенос неосновных носителей заряда через базовую область осуществляется в основном посредством дрейфа.

Лавинный транзистор — биполярный транзистор, действие которого основано на использовании режима лавинного размножения носителей заряда в коллекторном переходе.

Полевой транзистор — полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем (действие полевого транзистора обусловлено носителями заряда одной полярности).

Полевой транзистор с изолированным затвором — полевой транзистор, имеющий один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала.

Полевой транзистор типа металл — диэлектрик — полупроводник — полевой транзистор с изолированным затвором, в котором в качестве изоляционного слоя между каждым металлическим затвором и проводящим каналом используется диэлектрик.

Полевой транзистор типа металл — окисел — полупроводник — полевой транзистор с изолированным затвором, в котором в качестве изоляционного слоя между металлическим затвором и проводящим каналом используется окисел.

Тиристор — полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три или более перехода, который может переключаться из открытого состояния в закрытое и наоборот.

Диодный тиристор — тиристор, имеющий два вывода, через которые протекает как основной ток, так и ток управления.

Триодный тиристор — тиристор, имеющий два основных и один управляющий вывод.

Запираемый тиристор — тиристор, который может переключаться из закрытого состояния в открытое, и наоборот, при подаче на управляющий электрод сигналов соответствующей полярности.

Оптоэлектронный полупроводниковый прибор — полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании явлений излучения, передачи или поглощения в видимой, инфракрасной и (или) ультрафиолетовой областях спектра.

Излучающий оптоэлектронный полупроводниковый прибор — оптоэлектронный полупроводниковый прибор с одним или несколькими $p-n$ переходами, в котором осуществляется непосредственное преобразование электрической энергии в энергию некогерентного излучения.

Оптопара — оптоэлектронный полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми имеется оптическая связь, обеспечивающая электрическую изоляцию между входом и выходом.

Светоизлучающий диод — полупроводниковый прибор с одним переходом, в котором осуществляется непосредственное преобразование электрической энергии в энергию светового излучения за счет рекомбинации

электронов и дырок, предназначенный для использования в устройствах визуального представления информации.

Полупроводниковый знаковый индикатор — полупроводниковый прибор, состоящий из нескольких светоизлучающих диодов, предназначенный для использования в устройствах визуального представления информации в качестве индикатора знаков.

Полупроводниковое знаковое табло — полупроводниковый прибор, состоящий из нескольких знаковых индикаторов, предназначенный для использования в устройствах визуального представления информации.

Резистор — элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрического сопротивления.

Пленочный резистор представляет собой резистивную пленку, нанесенную на электронизоляционное основание. По материалу резистивного элемента пленочные резисторы подразделяются на: углеродистые, керметные, металлоокисные, металлизированные, композиционные.

Композиционный резистор — резистор, резистивный элемент которого представляет собой композицию из проводящих и диэлектрических материалов.

Терморезистор — полупроводниковый резистор, основное свойство которого заключается в способности значительно изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Варистор — полупроводниковый резистор, основное свойство которого заключается в способности значительно изменять свое электрическое сопротивление при изменении подаваемого на него напряжения.

Конденсатор — элемент электрической цепи, предназначенный для использования его емкости.

Керамический конденсатор — конденсатор, диэлектриком которого служит керамика.

Стеклянный конденсатор — конденсатор, диэлектриком которого служит стекло.

Оксидный конденсатор — конденсатор, диэлектриком которого служит оксидная пленка. В зависимости от материала анода оксидные конденсаторы подразделяются на алюминиевые, танталовые, ниобиевые и др.

Объемно-пористый конденсатор — оксидный конденсатор, анод которого представляет собой объемно-пористое тело, а катод — электролит.

Оксидно-полупроводниковый конденсатор — оксидный конденсатор, катод которого представляет собой пленку полупроводника, нанесенную непосредственно на оксидную пленку.

Элементы конструкций корпусов полупроводниковых приборов

Корпус полупроводникового прибора — часть конструкции полупроводникового прибора, предназначенная для защиты от воздействия окружающей среды, а также для присоединения прибора к внешним схемам с помощью выводов.

Вывод полупроводникового прибора — элемент конструкции корпуса полупроводникового прибора, необходимый для соединения соответствующего электрода с внешней электрической цепью.

Катодный вывод полупроводникового прибора — вывод, от которого прямой ток течет во внешнюю электрическую цепь.

Анодный вывод полупроводникового прибора — вывод, к которому прямой ток течет из внешней электрической цепи.

Управляющий вывод полупроводникового прибора — вывод, через который течет только ток управления.

Бескорпусный полупроводниковый прибор — полупроводниковый прибор, не защищенный корпусом и предназначенный для использования в гибридных интегральных микросхемах, герметизируемых блоках и аппаратуре.

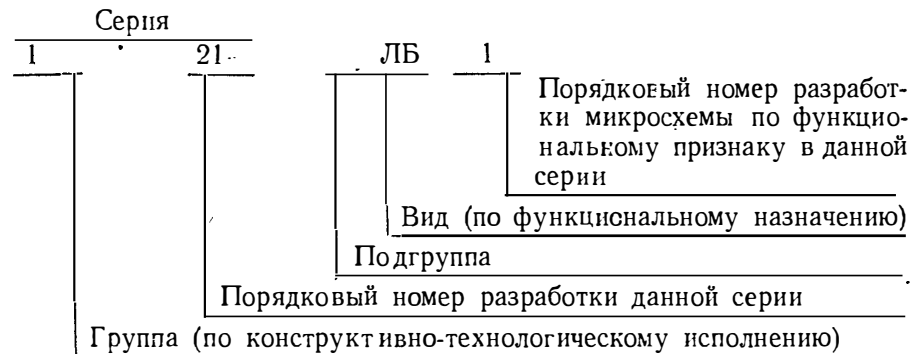
1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И СИСТЕМА УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

По конструктивно-технологическим признакам интегральные микросхемы разделяют на три группы: полупроводниковые, гибридные и пр. К прочим относят пленочные, вакуумные и керамические ИМС.

По функциональным признакам интегральные микросхемы подразделяют на подгруппы и виды (табл. 1.1).

Условное обозначение ИМС состоит из четырех элементов. Первый элемент — цифра, соответствующая классификации по конструктивно-технологическим признакам: полупроводниковые — 1, 5, 7; гибридные — 2, 4, 6, 8; прочие — 3. Второй элемент — две цифры, присвоенные данной серии ИМС как порядковый номер разработки серии. Таким образом, первые два элемента в виде набора трех цифр составляют полный номер серии ИМС. Третий элемент — две буквы, обозначающие подгруппу и вид ИМС (см. табл. 1.1). Четвертый элемент — порядковый номер разработки конкретной ИМС в данной серии, в которой может быть несколько одинаковых по функциональным признакам ИМС.

Ниже приведен пример условного обозначения интегральной полупроводниковой логической ИМС И-НЕ/ИЛИ-НЕ с порядковым номером разработки серии 21, порядковым номером разработки данной схемы в серии по функциональному признаку 1:



В конце условного обозначения может добавляться буква, указывающая на разброс электрических параметров ИМС в пределах данного типонаименования.

Для ИМС, используемых в устройствах широкого применения, в начале обозначения указывается буква К. После буквы К, перед номером серии, может быть приведено условное обозначение корпуса, в котором изготовлена ИМС. Например, буквы П и И обозначают соответственно пластмассовый и керамический корпусы, буква Б — бескорпусный вариант ИМС.

Для бескорпусных ИС в условное обозначение через дефис вводится цифра, соответствующая конструктивному исполнению: с гибкими выводами — 1; с паучковыми, в том числе на полиимидной пленке, — 2; с жест-

Табл. 1.1. Функциональная классификация ИМС и условные обозначения

Продолжение табл. 1.1

Подгруппа		Вид		Буквенное обозначение типоминнала
наименование	буквенное обозначение	наименование	буквенное обозначение	
1	2	3	4	5
Генераторы	Г	Гармонических сигналов	С	ГС
		Прямоугольных сигналов (в том числе автоколебательные мультивибраторы, блокинг-генераторы и др.)	Г	ГГ
		Линейно-изменяющихся сигналов	Л	ГЛ
		Сигналов специальной формы	Ф	ГФ
Детекторы	Д	Шума	М	ГМ
		Прочие	П	ГП
		Амплитудные	А	ДА
		Импульсные	И	ДИ
Коммутаторы и ключи	К	Частотные	С	ДС
		Фазовые	Ф	ДФ
		Прочие	П	ДП
		Тока	Т	КТ
		Напряжения	Н	КН
		Прочие	П	КП
		Элемент И-НЕ	А	ЛА
		Элемент ИЛИ-НЕ	Е	ЛЕ
		Элемент И	И	ЛИ
		Элемент ИЛИ	Л	ЛЛ
Логические элементы	Л	Элемент НЕ	Н	ЛН
		Элемент И-ИЛИ	С	ЛС
		Элемент И-НЕ/ИЛИ-НЕ	Б	ЛБ
		Элемент И-ИЛИ-НЕ	Р	ЛР
		Элемент И-ИЛИ-НЕ/И-ИЛИ	К	ЛК
		Элемент ИЛИ-НЕ/ИЛИ	М	ЛМ
		Расширители	Д	ЛД
		Прочие	П	ЛП
		Аналоговые	А	ХА
		Цифровые	Л	ХЛ
Многофункциональные схемы	Х	Комбинированные	К	ХК
		Прочие	П	ХП
		Амплитудные	А	МА
		Частотные	С	МС
Модуляторы	М	Фазовые	Ф	МФ
		Импульсные	И	МИ
		Прочие	П	МП
		Диодов	Д	НД
Наборы элементов	Н	Транзисторов	Т	НТ
		Резисторов	Р	НР
		Конденсаторов	Е	НЕ
		Комбинированные	К	НК
		Прочие	П	НП
		Частоты	С	ПС
Преобразователи	П	Фазы	Ф	ПФ
		Длительности	Д	ПД
		Напряжения	Н	ПН
		Мощности	М	ПМ
		Уровня (согласователи)	У	ПУ
		Код — аналог	А	ПА

1	2	3	4	5
Схемы вторичных источников питания	Е	Аналог — код	В	ПВ
		Код — код	Р	ПР
		Прочие	П	ПП
		Выпрямители	В	ЕВ
Схемы задержки	Б	Преобразователи	М	ЕМ
		Стабилизаторы напряжения	Н	ЕН
		Стабилизаторы тока	Т	ЕТ
		Прочие	П	ЕП
Схемы селекции и сравнения	С	Пассивные	М	БМ
		Активные	Р	БР
		Прочие	П	БП
		Амплитудные (уровня сигналов)	А	СА
Триггеры	Т	Временные	В	СВ
		Частотные	С	СС
		Фазовые	Ф	СФ
		Прочие	П	СП
		Типа $j-k$	В	ТВ
		Типа $R-S$	Р	ТР
		Типа d	М	ТМ
		Типа Т	Т	ТТ
		Динамические	Д	ТД
		Шмидта	Л	ТЛ
Усилители	У	Комбинированные (типов $d-T$, $R-S-T$ и др.)	К	ТК
		Прочие	П	ТП
		Высокой частоты*	В	УВ
		Промежуточной частоты*	Р	УР
		Низкой частоты*	Н	УН
		Импульсных сигналов*	И	УИ
		Повторители	Е	УЕ
		Считывания и воспроизведения	Л	УЛ
		Индикации	М	УМ
		Постоянного тока*	Т	УТ
Фильтры	Ф	Операционные и дифференциальные*	Д	УД
		Прочие	П	УП
		Верхних частот	В	ФВ
		Нижних частот	Н	ФН
Формирователи	А	Полосовые	Е	ФЕ
		Режекторные	Р	ФР
		Прочие	П	ФП
		Импульсов прямоугольной формы (ждущие мультивибраторы, блокинг-генераторы и др.)	Г	АГ
Элементы заподающих устройств	Р	Импульсов специальной формы	Ф	АФ
		Адресных токов (формирователи напряжения или токов)	А	АА
		Разрядных токов (формирователи напряжения или токов)	Р	АР
		Прочие	П	АП
Элементы заподающих устройств	Р	Матрицы-накопители:		
		ОЗУ	М	РМ
		ПЗУ	В	РВ

* Усилители напряжения или мощности (в том числе маломощные).

1	2	3	4	5
Элементы арифметических и дискретных устройств	И	ОЗУ со схемами управления	У	РУ
		ПЗУ (масочные) со схемами управления	Е	РЕ
		ПЗУ со схемами управления и с однократным программированием	Т	РТ
		ПЗУ со схемами управления и с многократным программированием	Р	РР
		АЗУ со схемами управления	А	РА
		Прочие	П	РП
		Регистры	Р	ИР
		Сумматоры	М	ИМ
		Полусумматоры	Л	ИЛ
		Счетчики	Е	ИЕ
		Шифраторы	В	ИВ
		Дешифраторы	Д	ИД
		Комбинированные	К	ИК
Прочие	П	ИП		

кни выводами — 3; неразделенные на пластине — 4; разделенные без потери ориентации (например, наклеенные на пленку) — 5; без выводов — 6, например, КБ198НТ1-6.

2. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ И ДОКУМЕНТАЦИЯ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

2.1. ЕСКД. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Правила выполнения, оформления и обращения конструкторских документов в различных отраслях народного хозяйства регламентируются стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД). Эта система не только формулирует правила выполнения и оформления конструкторских документов, но и обеспечивает их единство для одинакового понимания на различных предприятиях страны, а также способствует сокращению количества документов, обуславливает возможность применения упрощенных чертежей, схем, устраняет из документации дублирующие данные и т. п. ЕСКД способствует также применению средств вычислительной техники при обработке информации, содержащейся в документации. Кроме того, стандарты ЕСКД обеспечивают преемственность при обработке документации в различных сферах (конструирование, снабжение, эксплуатация и т. д.) и содержат также правила обозначения документации, которые максимально сокращают время поиска ранее спроектированных изделий и их составных частей.

Требования стандартов ЕСКД распространяются на все виды конструкторских документов; учетно-регистрационную документацию и документацию по внесению изменений в конструкторские документы; нормативно-техническую и технологическую документацию, а также научно-техническую и учебную литературу лишь в той ее части, которая не регламентируется специальными стандартами и нормативами.

Комплексу стандартов ЕСКД присвоен номер второго государственного стандарта, т. е. нумерация стандартов, входящих в систему, начинается с цифры 2. Затем в обозначении стандарта (после точки) следует цифра, соответствующая цифру классификационной группы стандартов. Распределение стандартов ЕСКД по классификационным группам регламентирует ГОСТ 2.001—70. По данному ГОСТу, например, группе стандартов «Общие положения» присвоен шифр 0, группе «Основные положения» — 1 и т. д. После шифра классификационной группы в обозначении стандарта указывают его номер в группе (двузначная цифра). В заключение (после тире) приводят двузначную цифру, соответствующую году регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта «Общие требования к текстовым документам» выглядит следующим образом:

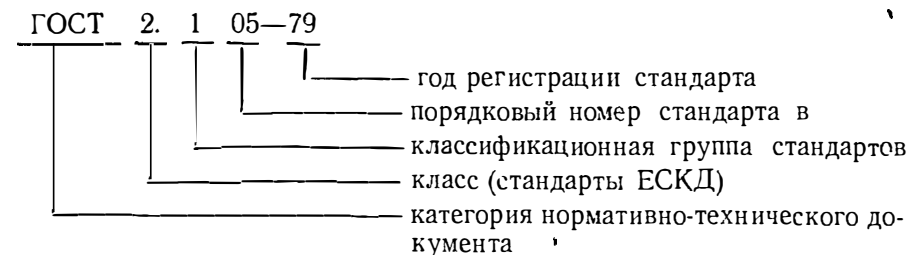


Табл. 2.1. Перечень стандартов ЕСКД, применяемых при разработке, оформлении и обращении конструкторской документации на интегральные микросхемы

Окончание табл. 2.1

Номер ГОСТа	Наименование
1	2
2.001—70	ЕСКД. Общие положения
2.101—68	ЕСКД. Виды изделий
2.102—68	ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов
2.103—68	ЕСКД. Стадии разработки
2.104—68	ЕСКД. Основные надписи
2.105—79	ЕСКД. Общие требования к текстовым документам
2.106—68	ЕСКД. Текстовые документы
2.108—68	ЕСКД. Спецификация
2.109—73	ЕСКД. Основные требования к чертежам
2.111—68	ЕСКД. Нормоконтроль
2.112—70	ЕСКД. Ведомость держателей подлинников
2.113—75	ЕСКД. Групповые конструкторские документы
2.114—70	ЕСКД. Технические условия. Правила построения, изложения и оформления
2.116—71	ЕСКД. Карта технического уровня и качества продукции
2.118—73	ЕСКД. Техническое предложение
2.119—73	ЕСКД. Эскизный проект
2.120—73	ЕСКД. Технический проект
2.301—68	ЕСКД. Форматы
2.302—68	ЕСКД. Масштабы
2.303—68	ЕСКД. Линии
2.304—68	ЕСКД. Шрифты чертежные
2.305—68	ЕСКД. Изображения — виды, разрезы, сечения
2.306—68	ЕСКД. Обозначения графические материалов и правила их нанесения на чертежах
2.307—69	ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений
2.308—79	ЕСКД. Указание на чертежах предельных отклонений формы и расположение поверхностей
2.309—73	ЕСКД. Нанесение на чертежах обозначений шероховатости поверхностей
2.310—68	ЕСКД. Нанесение на чертежах обозначений покрытий, термической и других видов обработки
2.312—72	ЕСКД. Условные изображения и обозначения швов сварных соединений
2.313—68	ЕСКД. Условные изображения и обозначения швов неразъемных соединений
2.314—68	ЕСКД. Указания на чертежах о маркировании и клеймении изделий
2.316—68	ЕСКД. Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц
2.413—72	ЕСКД. Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготавливаемых с применением электрического монтажа
2.417—78	ЕСКД. Правила выполнения чертежей печатных плат
2.501—68	ЕСКД. Правила учета и хранения
2.502—68	ЕСКД. Правила дублирования
2.503—74	ЕСКД. Правила внесения изменений
2.701—76	ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
2.702—75	ЕСКД. Правила выполнения электрических схем
2.708—72	ЕСКД. Правила выполнения схем цифровой вычислительной техники
2.721—74	ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения

1	2
2.728—74	ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы
2.730—73	ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые
2.743—72	ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Двоичные логические элементы

Перечень стандартов ЕСКД, которые находят наиболее широкое применение при разработке, оформлении и обращении конструкторской документации на микросхемы, приведен в табл. 2.1.

2.2. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

ГОСТ 2.103—68 устанавливает следующие стадии разработки конструкторской документации на изделия всех отраслей промышленности: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработку рабочей документации. Процесс разработки конструкторской документации на интегральные микросхемы в зависимости от вида их производства содержит все или часть перечисленных стадий.

Одним из основных документов на разработку конструкции микросхемы является *техническое задание* (ТЗ). ТЗ определяет назначение, технические характеристики, показатели качества, технико-экономические, конструктивно-технологические и другие специальные требования, предъявляемые к изделию, а также предусматривает необходимые стадии разработки и состав конструкторской документации, порядок испытаний и приемки опытных образцов.

Стадия разработки ТЗ характеризуется следующими этапами работ: разработкой ТЗ; согласованием и утверждением ТЗ.

На стадии разработки *технического предложения* осуществляется конкретизация ТЗ, определяется принципиальная возможность создания микросхемы и формулируются общие рекомендации по разработке нескольких возможных вариантов конструкции. На основе изучения и анализа технической и патентной литературы, стандартов, нормалей и других материалов, относящихся к разрабатываемой микросхеме, при сравнении полученных результатов выбирается окончательный вариант конструктивного исполнения микросхемы, а также намечается круг задач, которые необходимо решать на этапе эскизного проектирования.

Стадия разработки *технического предложения* включает следующие этапы работ: подбор материалов; разработку технического предложения по результатам анализа технического задания с присвоением документам литеры П; рассмотрение и утверждение технического предложения.

Основная цель разработки *эскизного проекта* заключается в обосновании конструктивного решения, позволяющего составить представление о возможности получения образца микросхемы с параметрами, соответствующими техническому заданию. На стадии эскизного проектирования микросхемы в первую очередь осуществляется выбор для нее элементной базы, технологического процесса изготовления и типа корпуса. Кроме того, в процессе эскизного проектирования определяется площадь, зани-

масная плночными элементами и навесными компонентами, а также ориентировочные размеры подложки, по которым можно выбрать корпус микросхемы необходимого типоразмера.

В общем случае стадия эскизного проектирования предусматривает следующие этапы работ: разработку эскизного проекта с присвоением документам литеры Э; изготовление и испытание макетов; рассмотрение и утверждение эскизного проекта.

Технический проект представляет собой совокупность конструкторских документов, в которых содержатся окончательные технические решения, позволяющие составить полное представление о разрабатываемой микросхеме. На стадии технического проектирования ведется уточненный расчет пленочных элементов, осуществляется их размещение на подложке, а также оценивается качество разработанной топологии. На этой стадии подготавливается конструкторская документация на микросхему, по которой можно было бы реализовать ее макетный образец. После изготовления и испытания макетного образца производится корректировка конструкторской документации.

На стадии разработки технического проекта предусматриваются следующие этапы: рассмотрение технического проекта с присвоением документам литеры Т; изготовление и испытание макетов; рассмотрение и утверждение технического проекта.

Заключительной стадией конструирования микросхемы является стадия *разработки рабочей документации*. На этой стадии разрабатывается полный комплект конструкторской документации для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии), установочных серий, а также установившегося серийного или массового производства. Следует отметить, что конструкторским документам опытного производства присваивается литера О, конструкторским документам на изделия установочной серии — литера А, а конструкторским документам, окончательно отработанным и проверенным в производстве изготовлением изделий по зафиксированному и полностью оснащеному технологическому процессу, — литера Б.

2.3. КОМПЛЕКТ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ИНТЕГРАЛЬНУЮ МИКРОСХЕМУ

Общие положения. В зависимости от стадии разработки микросхемы на нее выпускается совокупность конструкторских документов. В общем случае виды и комплектность этих документов регламентируются стандартами ЕСКД. В частности, ГОСТ 2.102—68 устанавливает следующую комплектность конструкторских документов:

основной конструкторский документ (для деталей — чертеж деталей, для сборочных единиц — спецификация);

основной комплект конструкторских документов, включающий конструкторские документы, составленные на все изделие в целом;

полный комплект конструкторских документов, включающий основной комплект конструкторских документов на данное изделие и основные комплекты конструкторских документов на все составные части данного изделия.

Наиболее часто встречаются в различных комплектах следующие виды документов:

чертеж детали — документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;

сборочный чертеж — документ, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки и контроля;

Табл. 2.2. Комплектность конструкторской документации на микросхему

Шифр документа	Наименование документа	Отметка о выпуске
—	Чертеж детали	+
СБ	Сборочный чертеж	+
ГЧ	Габаритный чертеж	+
Э2	Схема электрическая функциональная	—
Э3	Схема электрическая принципиальная	+
Э5	Схема электрическая подключения	—
Э7	Схема электрическая расположения	—
—	Спецификация	+
ВС	Ведомость спецификаций	+
ВД	Ведомость ссылочных документов	—
ВП	Ведомость покупных изделий	—
ДП	Ведомость держателей подлинников	—
ТУ	Технические условия	+
КУ	Карта технического уровня и качества	+
ТБ	Таблицы	—
ДІ	Справочный лист	+
ПФ	Патентный формуляр	+
ЭТ	Этикетка	+

Условные обозначения: «+» — документ обязательный; «—» — документ составляется по усмотрению разработчика.

габаритный чертеж — документ, содержащий контурное изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;

схема электрическая принципиальная — документ, определяющий полный состав элементов изделия и электрические связи между ними;

спецификация — документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта;

технические условия — документ, содержащий требования к изделию, его изготовлению, контролю, приемке и поставке, которые нецелесообразно указывать в других конструкторских документах;

карта технического уровня и качества изделия — документ, содержащий данные, определяющие технический уровень качества изделия и соответствие его технических и экономических показателей достижениям науки и техники, а также потребностям народного хозяйства;

патентный формуляр — документ, содержащий сведения о патентной чистоте объекта, а также о созданных и использованных при его разработке отечественных изобретениях.

Конструкторская документация, выпускаемая в процессе разработки микросхем, должна соответствовать требованиям не только государственных стандартов ЕСКД, но и отраслевых нормативных документов. Правила выполнения конструкторской документации на интегральные микросхемы в значительной мере конкретизирует ОСТ 11 0.000.028—73.

В зависимости от стадии разработки конструкторские документы подразделяются на проектные (техническое предложение, эскизный проект и технический проект) и рабочие (рабочая документация). Комплектность конструкторской документации на микросхему на стадии разработки рабочей документации представлена в табл. 2.2. При этом на микросхему, не подлежащую поставке, допускается не составлять габаритный чертеж, технические условия, справочный лист, патентный формуляр и этикетку.

Наименование микросхемы в конструкторской документации должно состоять из слова «Микросхема» и ее условного обозначения в соответствии с ГОСТ 18682—73 (более подробно о системе условных обозначений микросхем сказано в § 1.2).

Порядок разработки конструкторских документов на микросхему не совпадает с тем порядком, в каком указанные документы располагаются в комплекте. В настоящем пособии конструкторские документы рассматриваются в порядке их разработки.

Схема электрическая принципиальная. Процесс конструирования микросхемы начинается с вычерчивания ее электрической принципиальной схемы, которая является обязательным документом комплекта конструкторской документации. На электрической принципиальной схеме должны быть показаны не только все плечные или полупроводниковые элементы, но и навесные компоненты, если они имеются, а также связи между ними.

Каждый элемент изделия на схеме представляется в виде условного графического обозначения, которое устанавливается соответствующим стандартом ЕСКД, например условные обозначения общего применения регламентируются ГОСТ 2.721—74, условные обозначения резисторов и конденсаторов — ГОСТ 2.728—74, условные обозначения полупроводниковых приборов — ГОСТ 2.730—73, условные обозначения двоичных логических элементов — ГОСТ 2.743—72 и т. д.

Каждый элемент, представленный на электрической принципиальной схеме, должен иметь буквенно-цифровое позиционное обозначение. Такое обозначение, как правило, состоит из одной или нескольких букв и цифр, которые проставляются после букв, причем цифры соответствуют порядковому номеру элемента. Нумерация элементов схемы производится в следующем порядке: сверху вниз и слева направо.

Все элементы микросхемы должны быть занесены в перечень элементов. Перечень элементов оформляется в соответствии с требованиями, установленными ГОСТ 2.702—75, и помещается преимущественно на поле чертежа. Однако допускается перечень элементов выполнять и в виде отдельного документа на листах формата И1. Возможно также некоторое упрощение перечня. В частности, графу «Зона» в перечень можно не вводить.

Элементы в перечень записывают группами в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений. Если на схеме применяют позиционные обозначения, составленные из букв латинского и русского алфавитов, то в перечень вначале записывают элементы с позиционными обозначениями, составленными из букв латинского алфавита, а затем из русского. В пределах каждой группы, имеющей одинаковые буквенные позиционные обозначения, элементы располагают по возрастанию их порядковых номеров. Для облегчения внесения изменений допускается оставлять несколько незаполненных строк между отдельными группами элементов.

Сведения о плечных элементах и навесных компонентах в перечень записывают в следующем порядке. В графе «Поз. обозначение» указывают позиционное обозначение элемента (компонента). В графе «Наименование» для плечного элемента указывают наименование, расчетный номинал и допуск, а также величину максимальной мощности рассеяния (для резистора) и максимального рабочего напряжения (для конденсатора), для навесного компонента записывают его наименование в соответствии с документом, на основании которого этот компонент применен, и обозначение (номер) данного документа. В графе «Кол.» указывается количество однотипных элементов (компонентов).

При выполнении чертежа электрической принципиальной схемы на полупроводниковую интегральную микросхему перечень элементов не составляется. При этом параметры элементов, допуски на них, а также другие данные рекомендуется указывать рядом с условными обозначениями элементов или на поле чертежа.

На электрической принципиальной схеме обозначения внешних выводов должны соответствовать нумерации выводов корпуса микросхемы.

Пример выполнения чертежа схемы электрической принципиальной гибридной интегральной микросхемы показан на рис. 2.1, а полупроводниковой интегральной микросхемы — на рис. 2.2.

Топологический чертеж. Это документ, определяющий ориентацию и взаимное расположение всех элементов и компонентов микросхемы на подложке. Он регламентирует форму и размеры плечных элементов и соединения между ними. Данный документ предопределяет оптимальное размещение элементов на подложке и обеспечивает изготовление микросхемы с заданными техническими и электрическими параметрами. Топологический чертеж является основным документом, по которому можно оценить возможный характер и величину паразитных связей в микросхеме, рассчитать ее тепловые режимы.

Так как топологический чертеж относится к чертежам деталей, то на его оформлении в полной мере распространяются требования ГОСТ 2.109—73 (раздел «Чертежи деталей»). Специфические требования, предъявляемые к топологическим чертежам, регламентируются ОСТ 11 0.000.028—73.

Для достаточной наглядности взаимного расположения элементов на подложке топологические чертежи рекомендуется выполнять в следующих масштабах:

гибридных интегральных микросхем — 5 : 1, 10 : 1, 20 : 1 и в других масштабах увеличения, кратных десяти;

полупроводниковых интегральных микросхем — 100 : 1, 200 : 1 и кратных ста.

Для наглядности допускается не выдерживать масштаб при изображении толщины слоев на топологических чертежах полупроводниковых микросхем.

Топологический чертеж, как правило, выполняется на нескольких листах, причем на первом листе всегда изображается подложка со всеми нанесенными на нее слоями. Кроме того, на этом листе приводятся условные позиционные обозначения элементов в соответствии с электрической принципиальной схемой, а также проставляются номера контактных площадок. Нумерация расположенных по контуру периферийных контактных площадок начинается с одного из углов платы (преимущественно с левого нижнего) и ведется в направлении, противоположном направлению движения часовой стрелки. Характерно, что данная нумерация должна соответствовать нумерации аналогичных внешних выводов электрической принципиальной схемы и сборочного чертежа. Контактные площадки, расположенные внутри контура, ограниченного периферийными контактными площадками, нумеруются очередными порядковыми номерами. Обход их осуществляется в направлении сверху вниз и слева направо.

На последующих листах топологического чертежа помещают послойное изображение элементов отдельно для каждого слоя. В случае двустороннего расположения элементов на подложке вид на одну из ее сторон помещается на втором листе топологического чертежа.

Иногда для удобства вычерчивания элементов микросхемы на топологическом чертеже используется координатная сетка, которая может иметь

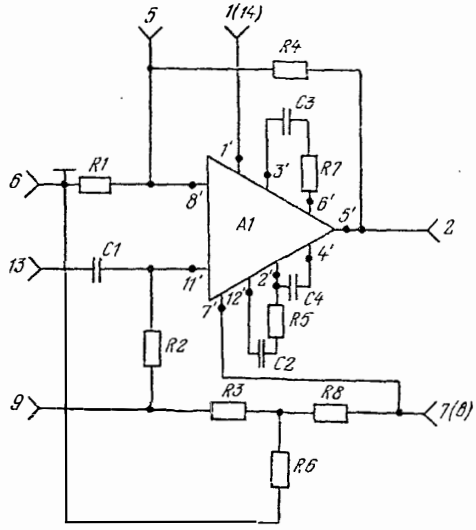
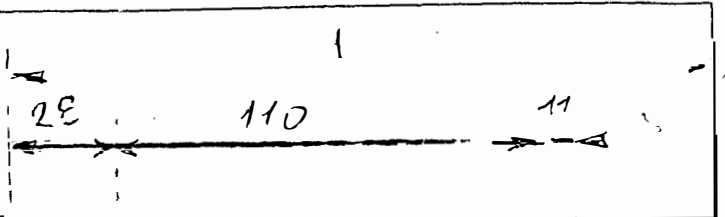


Рис. 2.1. Пример выполнения чертежа схемы электрической прип

шаг 0,01; 0,05; 0,1 или 0,2 мм. При нанесении координатной сетки вершины фигур элементов необходимо располагать в точках пересечения линий сетки.
 Кроме основного вида, на первом листе топологического чертежа приводят технические требования и таблицы, в которых помещают данные об изготовлении отдельных слоев и величинах электрических параметров элементов микросхемы.



Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
A1	Микросхема 140 УД5А ХХХ.ХХХ.ХХХ ТУ	1	
C1	Конденсатор К10-9-0,15±20% ХХХ.ХХХ.ХХХ ТУ	1	
C2, C3	Конденсатор К10-17В-56±5% ХХХ.ХХХ.ХХХ ТУ	2	
C4	Конденсатор 1,5лФ ±20%; 10В	1	
R1	Резистор 1кОм ±5%; 5·10 ⁻² мВт	1	
R2	Резистор 1,1мОм ±10%; 3,6 мВт	1	
R3	Резистор 9,1кОм ±10%; 0,15 мВт	1	
R4	Резистор 2,1кОм ±5%; 0,5 мВт	1	R4/R1=9±0,005
R5	Резистор 5,1кОм ±5%; 0,5 мВт	1	
R6	Резистор 1 кОм ±10%; 1,5 мВт	1	
R7	Резистор 3,1кОм ±5%; 0,5 мВт	1	
R8	Резистор 2,1кОм ±10%; 13,6 мВт	1	

А5ВГЗ 410 001 33				17	12
Изм.	Вкл.	И.д.	Вкл.	Лист	Масса
Рис. 2.1				1	
Проект				Лист	Листов 1
И. контр.					
Угб.					

ципальной гибридной интегральной микросхемы.

Технические требования излагаются в определенной последовательности, приведенной ниже, и включают следующие пункты: указание о размерах для справок; специфические требования к изготовлению подложки и указания о возможной замене ее материала; требования к точности изготовления пленочных элементов; указание о том, в каком масштабе заданы координаты элементов, если они заданы не в натуральную величину; указание о шаге координатной сетки; данные о площади нанесен-

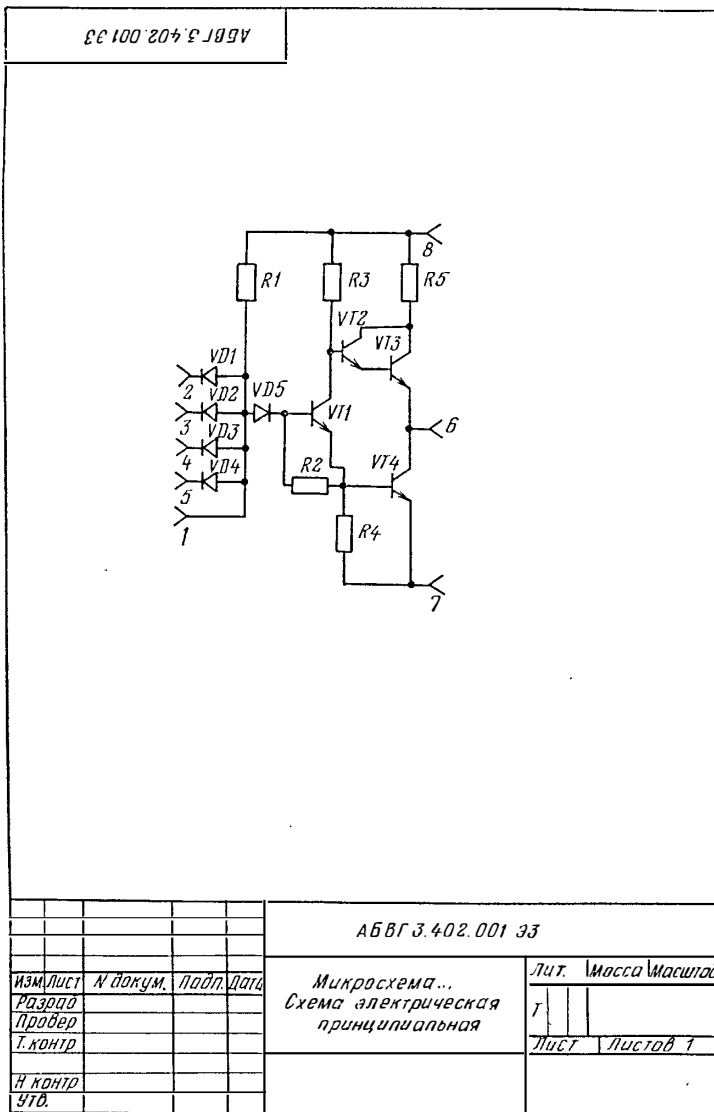


Рис. 2.2. Пример выполнения чертежа схемы электрической принципиальной полупроводниковой интегральной микросхемы.

ных драгоценных материалов; требования к внешнему виду подложки с нанесенными на нее пленочными элементами; ссылку на таблицу, в которой приведены характеристики и данные по изготовлению отдельных слоев и элементов; ссылку на таблицу, в которой содержатся указания по проверке величин электрических параметров элементов микросхемы; требования к классу точности приборов, которыми осуществляется контроль параметров; ссылку на таблицы, в которых приведены координаты вершин элементов, или ссылку на документы, если таблицы координат

выпущены в виде самостоятельных документов (с шифром ТБ); указание о том, что координатная сетка, а также обозначения контактных площадок и элементов являются условными.

Таблица, в которой приводятся данные по изготовлению отдельных слоев, содержит, как правило, следующие графы: «Условное обозначение слоя», «Наименование слоя», «Материал слоя», «Электрические характеристики», «Метод нанесения слоя» и др. Количество граф в данной таблице и их порядок нормативными документами не регламентируются.

Вторая таблица, которая наносится на первый лист топологического чертежа, содержит величины электрических параметров пленочных элементов микросхемы, получаемых по данному чертежу. Обязательными графами в данной таблице являются следующие: «Точки измерения» и «Проверяемая величина и предельные отклонения». Допускается введение в таблицу и дополнительных граф, например: «Позиционное обозначение», «Рабочее напряжение», «Коэффициент электрической нагрузки» и др., а также разбивка граф на части. Для полупроводниковых интегральных микросхем таблица электрических параметров элементов имеет несколько иную структуру и оформляется в виде отдельного документа. В эту таблицу включаются следующие графы: «Наименование параметра», «Обозначение», «Значение параметра», «Погрешность измерения», «Режим измерения» и «Примечание».

Штамп, располагаемый на топологическом чертеже, заполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.104—68. При этом в графе, в которой указывается наименование изделия, для гибридных интегральных микросхем записывается наименование «Плата», а для полупроводниковых — «Кристалл». Децимальный номер данного чертежа имеет следующий вид: АБВГ 7.100.001 или АБВГ 7.107.001 — для гибридных микросхем и АБВГ 7.344.001 — для полупроводниковых микросхем.

На первых листах топологических чертежей гибридных ИМС элементы каждого слоя штрихуют, причем вид штриховки расшифровывают в таблице, в которой приводятся данные по изготовлению этих слоев. Пример выполнения первого листа топологического чертежа гибридной ИМС показан на рис. 2.3.

На первых листах топологических чертежей полупроводниковых ИМС помещают также структуру кристалла. При изображении структуры кристалла с целью задания размеров элементов по толщине выполняют сложный ступенчатый разрез, где секущие плоскости, проходящие через различные элементы кристалла, смещены в одну плоскость. Линии сечения этого разреза на топологическом чертеже не наносят. Пример выполнения первого листа топологического чертежа полупроводниковой интегральной микросхемы показан на рис. 2.4.

На последующих листах топологического чертежа наносят послойное изображение элементов, причем над изображением слоя допускается помещать надпись, характеризующую изображаемые элементы, например «Вид на слой проводников и контактных площадок». Существенное влияние на оформление чертежа слоя оказывает способ задания размеров элементов. Для этого в основном используется способ прямоугольных координат. При способе задания размеров элементов их вершины нумеруются арабскими цифрами. Контур каждого элемента, начиная с левого нижнего угла, обходят по часовой стрелке. В случае высокой плотности размещения элементов на подложке и в связи с отсутствием места для указания номеров их вершин разрешается не проставлять отдельные координаты. Координаты вершин элементов помещаются в таблицу, которая, как правило, располагается на чертеже слоя. Однако такую таблицу допускается оформлять в виде отдельного самостоятельного докумен-

✓ (V)

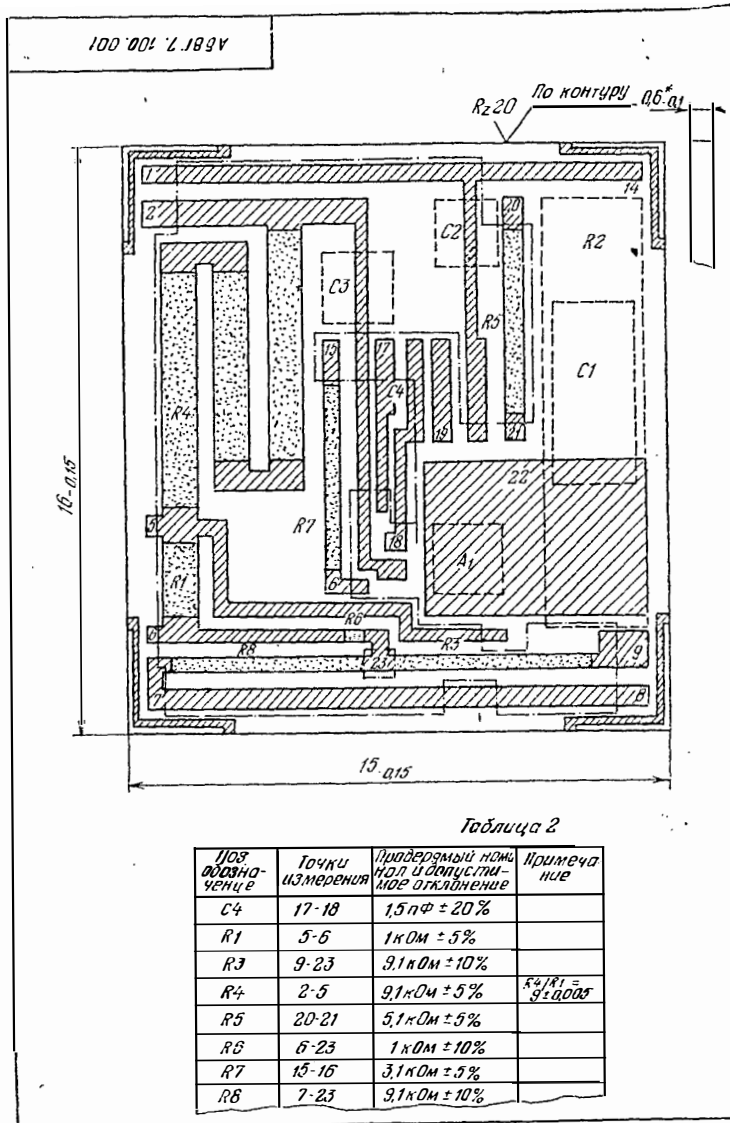


Таблица 2

Поз. обозначение	Точки измерения	Предельный ном. хол. и допустимое отклонение	Примечание
C4	17-18	1,5 пФ ± 20%	
R1	5-6	1 кОм ± 5%	
R3	9-23	9,1 кОм ± 10%	
R4	2-5	9,1 кОм ± 5%	$R4/R1 = 9 \pm 0,005$
R5	20-21	5,1 кОм ± 5%	
R6	6-23	1 кОм ± 10%	
R7	15-16	3,1 кОм ± 3%	
R8	7-23	9,1 кОм ± 10%	

Рис. 2.3. Пример выполнения первого листа топологического чер

та (с шифром ТБ). Пример оформления чертежа слоя показан на рис. 2.5.

Сборочный чертеж. Сборочный чертеж микросхемы выполняется в соответствии с требованиями, предъявляемыми к таким чертежам ГОСТ 2.109—73 (раздел «Чертежи сборочные»), и требованиями, изложенными в ОСТ 110.000.028—73, а также в ОСТ 4 Г0.010.043.

На сборочном чертеже микросхемы показывается столько видов, разрезов и сечений, сколько необходимо для полного представления о рас-

Таблица 1

Условное обозначение слоя	Наименование слоя	Материал слоя				Метод нанесения	Номер листа чертежа
		Наименование, марка	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Диаметр, шаг, шаг сетки	Электрическая плотность		
	Резистивный слой	Сплав РС-3710	ГОСТ 2202376	1	$0,2-300 \frac{\text{ом}}{\text{кв}}$	Вакуумное напыление	2
	Проводники и контактные площадки	Ванодий	ТУ 48-05-33-71	2	$0,5003 \frac{\text{ом}}{\text{кв}}$	То же	3
		Медь МВ	МРТУ 44-425А	3			
		Никель	МРТУ 44-463В	4			
	Защитный слой	Фоторезист ФН 11	ТУ 8-74-531-71	-	-	Центровочные	4

- * Размер для справок.
- Внешний вид платы должен соответствовать требованиям инструкции АВВГ.0.003.001.
- Характеристики отдельных слоев приведены в табл. 1.
- Величины емкостей конденсаторов и электрических сопротивлений резисторов должны соответствовать данным, указанным в табл. 2.
- Элементы в слоях выполнять по координатам, приведенным в таблицах на соответствующих листах чертежа.
- Защитный слой показан условно-прозрачным.
- Номера контактных площадок, обозначения элементов и компонентов показаны условно и соответствуют схеме электрической принципиальной АВВГ.3.410.001.33.

				АВВГ 7.100.001			
Изм.	Лист	И. Иванов	В. Петров	Плата		Лит.	Масшт.
Разработ.	Провер.	Т. Кондр.				Т	10:1
				Сигнал СТ50-1		Лист 1	Листов 4
				МТКО. 027. 029			
				Утв.			

тежа гибридной интегральной микросхемы.

положении и взаимной связи ее составных частей. Кроме того, на таком чертеже проставляются размеры и предельные отклонения, которые должны быть выдержаны или проконтролированы по данному чертежу. Указывается также и характер соединения составных частей микросхемы и способы его осуществления (сварка, пайка, склеивание и др.). При этом все составные части, входящие в микросхему, на сборочном чертеже нумеруются в соответствии с номерами позиций, указанными в спецификации. Номера позиций наносят на полках линий-выносок, проводимых от

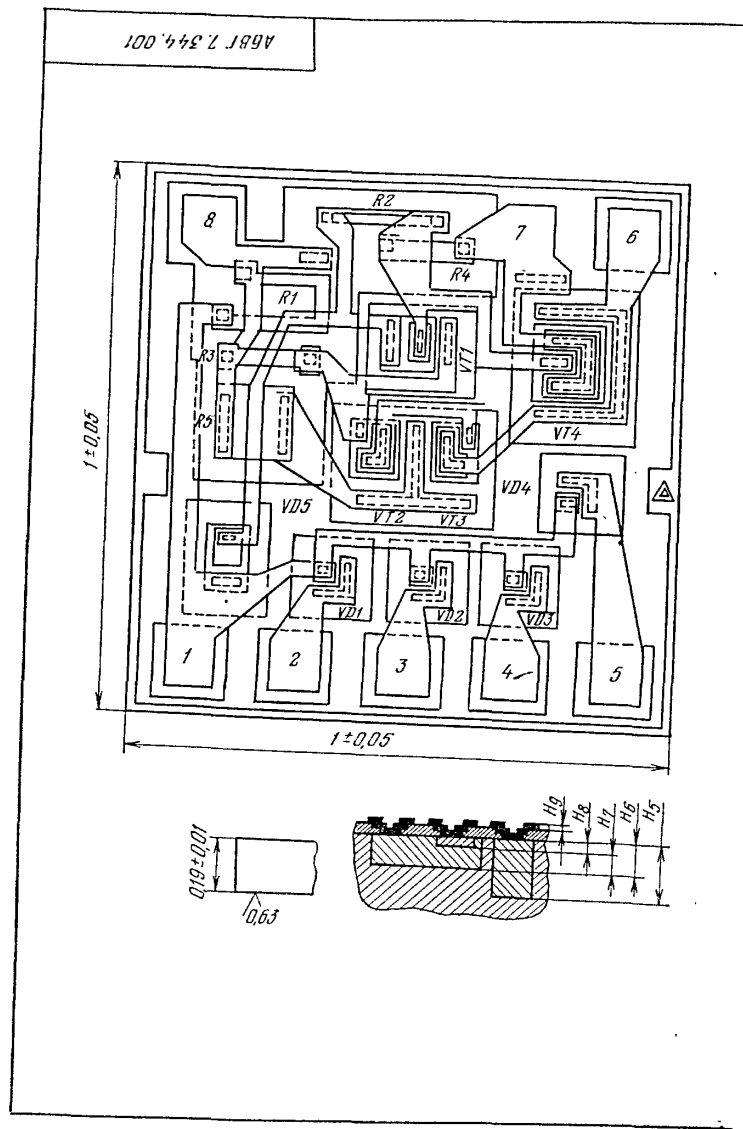


Рис. 2.4. Пример выполнения первого листа топологиче

скового чертежа полупроводниковой интегральной микросхемы. изображений составных частей. Кроме графического изображения конструкции микросхемы, на сборочном чертеже приводятся технические требования, в которых должны быть указаны варианты установки бескорпусных компонентов, допустимые отклонения местоположения подложки относительно корпуса, требования технологического порядка, указания о способе герметизации микросхемы и др.

Сборочный чертеж микросхемы, как правило, должен содержать изображение установленной в корпус платы с пленочными элементами и на-

$R_2 20 \sqrt{(\checkmark)}$

Таблица 1

Элементы структуры	Толщина, мм	Тип проводящих мости	Используемый материал		Поверхностное сопротивление, Ом/кв	Номер листа чертежа
			Наименование	ГОСТ, ОСТ, ТУ		
Разделительная диффузия	H5	p	Треххромистый бор особой чистоты	Окв 028, 000 ТУ	3,5 ± 1,5	2
Область базиса	H6	p	борный ангидрид особой чистоты	Окв 028, 000 ТУ	200 ± 20	3
Толщина базиса	H7	p	Треххромистый бор особой чистоты	Окв 028, 000 ТУ	6,5 ± 1,5	4
Эмиттерная область	H8	p*	Проволока А995	ЦМТУ 88-99-68	-	5
Контактные площадки и проводники	H9	-	Проволока А995	ЦМТУ 88-99-68	-	5

1. Предельные отклонения размеров элементов и проводников $\pm 1,2$ мкм.

2. Форма краев диффузионных слоев не регламентируется.

3. Характеристики и данные по изготовлению отдельных слоев приведены в габл.1.

4. Нумерация контактных площадок и обозначения элементов показаны условно.

5. Элементы в слоях выполнять по таблицам координат, приведенным на соответствующих листах чертежа.

АБВГ 7.344.001					
ИЗМ	ИЗМ	ИЗМ	ИЗМ	ИЗМ	ИЗМ
КРИСТАЛЛ	Лист	Масштаб	100:1	Лист 1	Листов 5
Кремний	22 КЭФ 01	220 КДБ 10	Окв 028 000 ТУ		

ского чертежа полупроводниковой интегральной микросхемы.

весными компонентами. На основном виде сборочного чертежа допускается изображать микросхему со снятой крышкой. Это делается для того, чтобы показать размещение навесных компонентов на плате, а также соединение периферийных контактных площадок с выводами корпуса. Защитный слой на этом виде разрешается показывать непрозрачным.

Штамп на сборочном чертеже заполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.104—68. В основной надписи штампа записывают

«Микросхема...
Сборочный чертеж»

После слова «Микросхема» указывают ее условное обозначение в соответствии с ГОСТ 18682—73. Децимальный номер, присваиваемый сборочному чертежу, имеет вид: АБВГ 3.XXX.XXX СБ или АБВГ 4.XXX.XXX. СБ.

Пример выполнения сборочного чертежа гибридной интегральной микросхемы приведен на рис. 2.6.

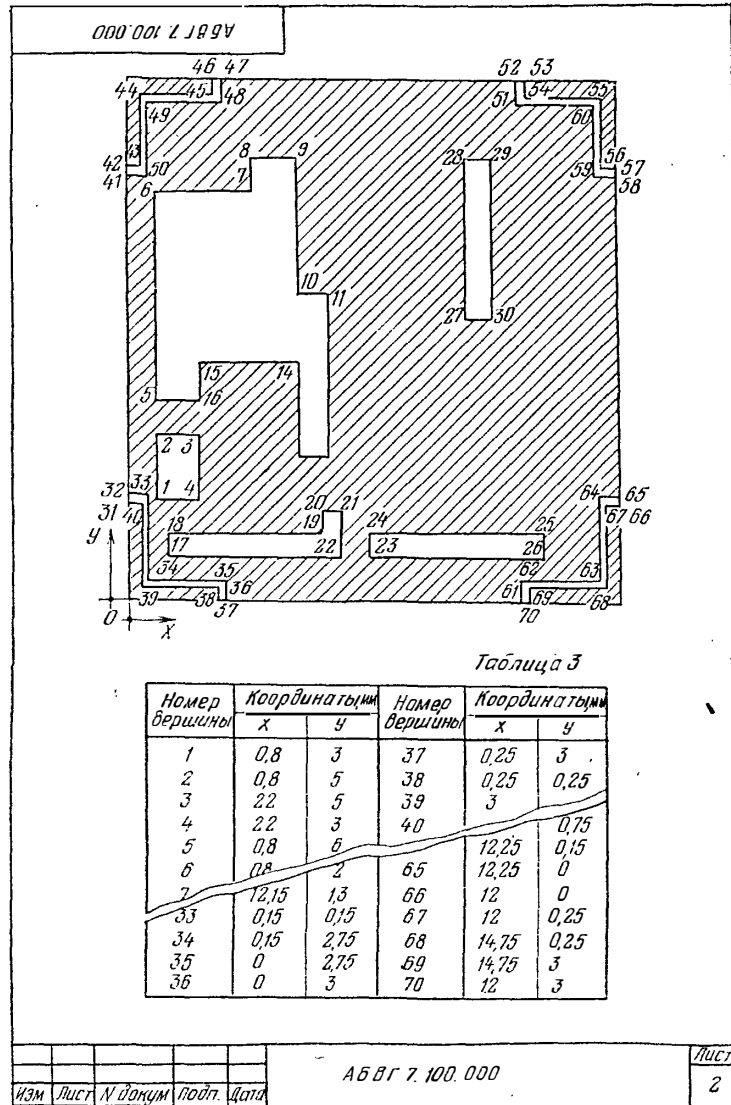


Рис. 2.5. Пример оформления чертежа слоя.

Спецификация. На каждую микросхему составляют спецификацию, в которую вносят ее составные части, а также конструкторские документы, относящиеся к данной микросхеме. Спецификацию оформляют на специальных бланках в соответствии с требованиями ГОСТ 2.108—68. В общем случае спецификация состоит из разделов, которые располагаются в изложенной ниже последовательности: документация, комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы и комплекты.

ГОСТ 2.108—68 регламентирует порядок заполнения каждого из перечисленных разделов. Так, в раздел «Документация» записывают вначале документы на специфицируемое изделие, а затем документы на неспецифицируемые составные части. Документы в каждой части записывают в алфавитном порядке сочетания начальных знаков (букв) индексов организаций-разработчиков и далее в порядке возрастания цифр, входящих в обозначение. В пределах каждого обозначения запись ведут в последовательности, указанной в табл. 2.2.

Пример оформления спецификации на гибридную интегральную микросхему приведен на рис. 2.7.

Комплексы, сборочные единицы и детали, непосредственно входящие в специфицируемое изделие, вносят соответственно в разделы «Комплексы», «Сборочные единицы», «Детали». При этом запись указанных изделий ведут в алфавитном порядке сочетания начальных знаков индексов предприятий-разработчиков.

В разделе «Стандартные изделия» вначале записывают изделия, примененные по государственным, впоследствии по республиканским, далее отраслевым стандартам. В заключение раздела записывают изделия, которые соответствуют стандартам предприятий. В пределах каждой категории стандартов изделия записывают по группам, объединенным по функциональному признаку, в пределах каждой группы — в алфавитном порядке наименований изделий, в пределах каждого наименования — в порядке возрастания обозначений стандартов, а в пределах каждого обозначения стандарта — в порядке возрастания основных параметров изделия.

В раздел «Прочие изделия» вносят изделия, которые применяются по техническим условиям, каталогам, прейскурантам и т. п.

В разделе «Материалы» вначале записывают черные и цветные металлы, затем кабели, провода и шнуры, далее пластмассы, бумажные и текстильные материалы. Далее записывают лесоматериалы, резину и кожу, керамические и стеклянные материалы, лаки, краски, химикаты. Материалы, необходимое количество которых не может быть определено конструктором, в спецификацию не вносятся. К таким материалам относятся: лаки, краски, клей и др. Указание о применении подобных материалов дают в технических требованиях на поле чертежа.

В раздел «Комплекты» вносят ведомость эксплуатационных документов, комплект монтажных, сменных и запасных частей, комплект инструмента и принадлежностей, комплект укладок, комплект тары и прочие комплекты.

Остальные не рассмотренные в настоящем разделе виды конструкторских документов, которые составляются на микросхему на этапе разработки рабочей документации, оформляют с соблюдением требований соответствующих государственных и отраслевых стандартов. Например, габаритный чертеж оформляют исходя из требований ГОСТ 2.109—73 (раздел «Чертежи габаритные»), технические условия — по ГОСТ 2.114—70, карту технического уровня и качества продукции — по ГОСТ 2.116—71 и т. д.

Крышка поз 3 не показана

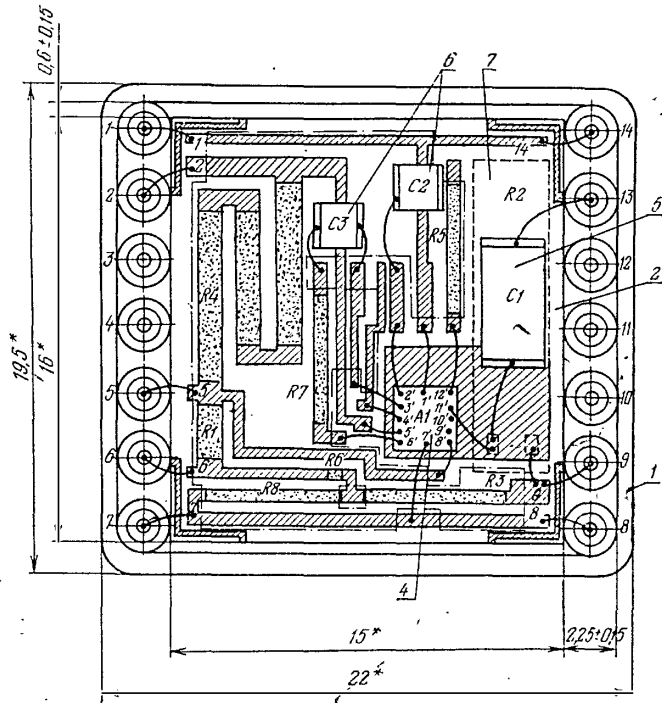
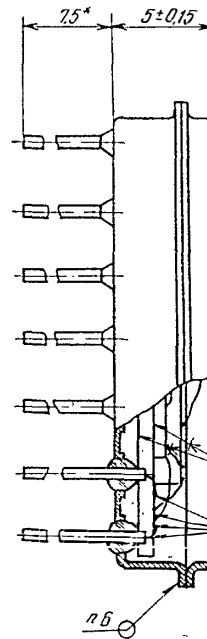


Рис. 2.6. Пример выполнения сборочного чертежа гибридной ин



1. Размеры для справок.

2. Установку бескорпусных компонентов производить по ГОСТ 4 ГО. 010. 043. Микросхему А1 и резистор R2 установить по варианту I, конденсаторы C1-C3 - по варианту III.

3. Маркировка бескорпусных компонентов и выводов корпуса показана условно.

4. Монтаж платы поз. 2 и бескорпусных компонентов поз. 4-7 производить клеем Д-9 ГОСТ 4 ГО. 029. 004.

5. Выводы навесных компонентов присоединить к контактным площадкам платы термокомпрессионной сваркой. Периферийные контактные площадки платы соединить с выводами корпуса, используя проволоку Зл 999,9 ф 0,04 мм ГОСТ 6835-72.

6. Герметизацию микросхемы произвести аргоно-дуговой сваркой.

7. Герметичность проверить с помощью гелиевого течеискателя ПТИ-7.

				АБВГ 3.410.001СБ			
Изм	Лист	Коржм	Подп	Дата	Микросхема...	Лист	Масштаб
Разрб					Сборочный чертеж	7	10:1
Пробер						Лист	Листов 7
Контр							
Н.КОНТ							
УТВ							

тегральной микросхемы.

3. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

3.1. МАТЕРИАЛЫ

Материалы для подложек. Подложка в конструкции гибридной интегральной микросхемы является основанием, на котором располагаются пленочные элементы и навесные компоненты. От ее свойств во многом зависит качество всей конструкции.

Подложки, используемые при изготовлении гибридных интегральных микросхем, должны удовлетворять следующим требованиям: иметь значительную механическую прочность при небольших толщинах; обладать высоким удельным электрическим сопротивлением и малыми потерями на высоких частотах ($\text{tg } \delta$) и при высокой температуре; быть химически инертными к осаждаемым веществам; не иметь газовыделений в вакууме; сохранять физическую и химическую стойкость при нагревании до 400—500 °С; иметь температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), близкий к ТКЛР осаждаемых пленок; способствовать обеспечению высокой адгезии осаждаемых пленок; иметь гладкую поверхность ($R_z \leq 0,1$ мкм на длине 0,08 мм); обладать высокой электрической прочностью; иметь низкую стоимость.

Основные электрофизические и механические свойства материалов, используемых для изготовления подложек гибридных ИМС, приведены в табл. 3.1.

Наиболее широкое применение при создании тонкопленочных гибридных ИМС находят подложки из ситалла СТ 50-1, стекла С 48-3, «Поликора» и бериллиевой керамики. Промышленно выпускаются подложки различных типоразмеров. Однако в качестве базовых преимущественно используются подложки размером 100×100 и 50×50 мм из стекла и 48×60 мм — из ситалла и керамики. Другие типоразмеры подложек получают делением сторон базовой подложки на части. Например, для подложек из ситалла в качестве делителя чаще всего используют цифры 2 и 3 или кратные им. По толщине наиболее распространенные получили подложки размером 0,6; 1 и 1,6 мм. В технически обоснованных случаях применяют и более тонкие подложки до 0,2 мм.

Материалы для резисторов. Параметры тонкопленочных резисторов в первую очередь определяются свойствами применяемых для их изготовления материалов. Подобные материалы должны обеспечивать: достаточно высокое удельное сопротивление формируемых на их основе резистивных пленок; высокую стабильность сопротивления тонкопленочных резисторов во времени и в широком интервале температур; высокую антикоррозионную стойкость напыленных пленок в условиях повышенной влажности; высокую адгезию резистивных пленок к подложке или к ранее напыленным пленкам; такой же ТКЛР пленок, как и ТКЛР материала подложки; стабильные свойства при напылении на них пленок из других материалов.

№ док.	Лист	№ док.	Лист	Обозначение	Наименование	Мол.	Примечания
					Документация		
12		АБВГЗ. 410. 001 СБ			Сборочный чертеж		
12		АБВГЗ. 410. 001 ГЧ			Габаритный чертеж		
12		АБВГЗ. 410. 001 ЭЗ			Схема электрическая принципиальная		
11		АБВГЗ. 410. 001 ТУ			Технические условия		
11		АБВГЗ. 410. 001 КУ			Карта технического уровня и качества		
11		АБВГЗ. 410. 001 Д1			Справочный лист		
11		АБВГЗ. 410. 001 ПФ			Патентный формуляр		
11		АБВГЗ. 410. 001 ЭТ			Этикетка		
					Сборочные единицы		
12	1	АБВГЧ. 880. 001			Основание		
					Детали		
12	2	АБВГГ. 100. 001			Плата		
12	3	АБВГГ. 313. 001			Крышка		
					Прочие изделия		
54	4				Микросхема 140УД.5А		
					xxx. xxx. xxx тУ	1	
54	5				Конденсатор К10-9		
					0,15 ± 20% xxx. xxx. xxx тУ	1	
54	6				Конденсатор К10-17В		
					50 ± 5% xxx. xxx. xxx тУ	2	
54	7				Резистор 11Мом ± 10%	1	
					Комплекты		
		АБВГЧ. 170. 001			Упаковка	1/80	
					АБВГЗ 410 001		
					Микросхема...		

Рис. 2.7. Пример оформления спецификации на микросхему.

Табл. 3.4. Электрические характеристики диэлектрических материалов для пленочных конденсаторов

Материал диэлектрика	Удельная емкость, пФ/мм ²	Электрическая прочность, МВ/см	ϵ на частоте 1 кГц	tg δ на частоте 1 МГц	ТКЕ $\times 10^{-4}$ /град (в широте температуры от -60 до +85°C)	Рабочая частота, МГц
Моноксид кремния БКО.028.004 ТУ	50—100	2—3	5—6	0,01—0,02	2	≤ 500
Моноксид германия ЕТО.021.014 ТУ	50—150	1	11—12	0,005—0,007	3	—
Трехсернистая сурьма МРТУ6-09-2858-66	100—150	0,3—0,5	18—21	0,004—0,01	5	—
Халькогенидное стекло ХГ-44 РМО.1096—61	100—150	2,2—2,8	9—10	0,004—0,02	28	—
Халькогенидное стекло ИКС-24 РМО.1096—61	100	0,4	5—6	0,02	5—9	—
Боросиликатное стекло ЕТО.035.015ТУ	25—150	3—4	4	0,001—0,0015	0,35	≤ 300
Стекло электровакуумное С41-1 НПО.027.600	150—400	3—4	5,2	0,002—0,003	0,5—1,8	≤ 300
Пятооксид тантала (Ta ₂ O ₅)	600—2000	2	23	0,02	4	≤ 01
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	300—850	9	10	0,003—0,015	1,5—5	—

Табл. 3.5. Электрофизические характеристики проводников пленочных катушек индуктивности

Характеристика материала	Серебро	Медь	Золото	Алюминий	Латунь	Никель
Удельное сопротивление, $\times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$	1,6	1,75	2,4	2,8	2,5—6	7
Глубина проникновения $\times 1/\sqrt{\lambda}$, мкм	0,37	0,39	—	0,51	0,73	—

Электрофизические характеристики материалов, применяемых для изготовления тонкопленочных резисторов гибридных микросхем, приведены в табл. 3.2.

Материалы для пленочных проводников и контактных площадок. Проводники и контактные площадки в гибридных ИМС чаще всего выполняются многослойными. При этом для изготовления проводящего слоя наиболее широко используют следующие материалы: алюминий А99 ГОСТ 11069—74; тантал ТВЧ ТУ 95.311—75; медь вакуумной плавки МВ ТУ 11 Яе 0.021.040—72; золото Зл. 999,9 ГОСТ 6835—72.

Для улучшения адгезии токопроводящих материалов к подложке напыляют подслои. В качестве материала подслоя используют: хром ЭРХ ЧМТУ 5-30-70; нихром (проволока) Х20Н80 ГОСТ 12766—67; ванадий ТУ 48-4-373-76.

В качестве защиты проводников и контактных площадок от внешних воздействий применяют: ванадий ТУ 48-4-373-76; никель ГОСТ 849—70; хром ЭРХ ЧМТУ 5-30-70; оловосодержащие сплавы.

В технически обоснованных случаях для защиты используют золото Зл 3 ГОСТ 9791—68 или золото Зл. 999,9 ГОСТ 6835—72.

Электрофизические характеристики некоторых многослойных систем, применяющихся для изготовления пленочных проводников и контактных площадок, приведены в табл. 3.3.

Материалы для пленочных конденсаторов. Характеристики тонкопленочных конденсаторов зависят как от материала диэлектрического слоя, так и от материала обкладок.

Материал обкладок конденсатора должен удовлетворять следующим требованиям: иметь низкое электрическое сопротивление (для высокочастотных конденсаторов); обладать низкой подвижностью атомов; иметь ТКЛР, равный ТКЛР подложки и диэлектрического слоя; иметь хорошую адгезию как к подложке, так и к ранее напыленным пленкам; обладать высокой антикоррозионной стойкостью в условиях агрессивной среды.

Для изготовления обкладок конденсаторов чаще всего применяются следующие материалы: алюминий А99 ГОСТ 11069—74; тантал ТВЧ ТУ 95.311—75; титан ВТ1-0 ТУ 1-5-111—73.

Материалы, применяемые для изготовления диэлектрических слоев, должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокое значение диэлектрической проницаемости; минимальный температурный коэффициент емкости (ТКЕ); минимальные потери энергии на высокой частоте (tg δ); обладать высокой влагостойкостью и теплостойкостью; обеспечивать напыление плотных и однородных пленок; иметь хорошую адгезию как к подложке, так и к материалам обкладок; обладать высокой электрической прочностью.

Электрофизические характеристики материалов, применяемых для изготовления диэлектрических слоев, приведены в табл. 3.4.

Для изготовления пленочных катушек индуктивности используются материалы, электрофизические характеристики которых приведены в табл. 3.5. Характеристики материалов, применяемые для защиты пленочных элементов микросхем, приведены в табл. 3.6.

Параметры других материалов, которые используются при изготовлении тонкопленочных гибридных ИМС, в частности параметры материалов, предназначенных для защиты и герметизации микросхем, изложены в гл. 8.

Табл. 3.6. Электрофизические характеристики материалов,

Материал диэлектрика	Удельная емкость, пФ/мм ²	tgδ на f=1 кГц
Моноксид кремния БКО.028.004 ТУ	17	0,03
Халькогенидное стекло ИКС=24	50	0,01
Негативный фоторезист ФН=108 ХАО.028.007 ТУ	12	0,01
Фоторезист ФН-11	50—80	—
Лак полиимидный электронизоляционный	80—100	—
Двуокись кремния	100	—

3.2. КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Резисторы

Общие принципы конструирования тонкопленочных резисторов. На начальном этапе конструирования тонкопленочных резисторов выбирают их форму и производят расчет геометрических размеров.

Форма резистора определяется его номиналом R , сопротивлением квадрата резистивной пленки $\rho_{кв}$, точностью γ_R , предъявляемой к изготовлению, площадью на плате, отведенной под резистор, и технологическим процессом изготовления. Наиболее распространенные конфигурации тонкопленочных резисторов показаны на рис. 3.1 и 3.2.

На практике самое широкое применение находят резисторы прямоугольной формы (рис. 3.1, а). Это обусловлено в первую очередь простотой их конструкции, а также тем, что в подобных резисторах потенциальное поле однородно, отсутствуют локальные перегрузки, компенсируются погрешности совмещения масок или фотошаблонов. Если расчетная длина резистора превышает длину отведенной под него области, то резистор компонуют в виде отдельных резистивных пленок, соединенных проводящими перемычками (рис. 3.1, б), или изгибают таким образом, как показано на рис. 3.1, в, г. Следует отметить, что резисторы, приведенные на рис. 3.1, б, отличаются более высокой точностью по сравнению с резисторами, представленными на рис. 3.1, в, г, однако занимают большую площадь. Резисторы типа «меандр» существенно уступают змеевидным в отношении рассеиваемой мощности. Тонкопленочные резисторы с центральной контактной площадкой (рис. 3.2) преимущественно применяют тогда, когда в едином технологическом цикле наряду с высокоомными необходимо формировать и низкоомные резисторы.

Для определения геометрических размеров резисторов необходимо располагать следующими исходными данными: номинальным значением сопротивления R (Ом); сопротивлением квадрата резистивной пленки $\rho_{кв}$ (Ом/кв); относительной погрешностью сопротивления резистора γ_R (%); мощностью, рассеиваемой резистором, P (Вт); максимальной удельной мощностью рассеяния резистивной пленки P_0 (Вт/см²).

Расчет резисторов прямоугольной формы. Одним из основных параметров пленочного резистора является коэффициент формы k_Φ ($k_\Phi = R/\rho_{кв}$). Геометрические размеры резистора прямоугольной формы связаны с k_Φ следующим выражением:

применяемых для защиты пленочных элементов микросхем

Удельное сопротивление, Ом·см	Электрическая прочность $E_{пр}$, В/см	ТКЕ $\times 10^{-4}$, 1/град (в интервале температур (-60...+85)°C
$1 \cdot 10^{12}$	10^{12}	5
$1 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^5$	5
$1 \cdot 10^{12}$	1	5
$3 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^5$	—
$2 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^5$	—
$1 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^5$	—

$$k_\Phi = \frac{l}{b}, \quad (3.1)$$

где l — длина резистора; b — ширина резистора.

Для резисторов, имеющих $k_\Phi > 1$, расчет геометрических размеров начинают с определения ширины. Ширину резистора выбирают из условия

$$b \geq \max\{b_P, b_\Delta, b_{техн}\},$$

где b_P — минимальная ширина резистора, при которой рассеивается заданная мощность:

$$b_P = \sqrt{\frac{\rho_{кв} P}{R P_0}};$$

b_Δ — минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная точность:

$$b_\Delta = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{k_\Phi}}{\gamma_{R\Delta}};$$

$\Delta b, \Delta l$ — точность воспроизведения геометрии резисторов (для резисторов, напыляемых через маски, $\Delta b = \Delta l = \pm 10$ мкм);

$$\gamma_{R\Delta} = \gamma_R - (\gamma_{\rho_{кв}} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{ст}} + \gamma_{R_k});$$

$\gamma_{\rho_{кв}}$ — погрешность воспроизведения сопротивления квадрата резистивной пленки ($\gamma_{\rho_{кв}} = \pm 4\%$); γ_{R_t} — температурная погрешность сопротивления; $\gamma_{R_{ст}}$ — погрешность сопротивления, обусловленная старением тонкопленочных резисторов; γ_{R_k} — погрешность сопротивления, вносимая контактами; $b_{техн}$ — минимальная ширина резистора, определяемая разрешающей способностью выбранного метода формирования конфигурации (для масочного метода и метода фотолитографии $b_{техн} = 100$ мкм).

Более подробно методика оценки погрешностей тонкопленочных резисторов изложена ниже. После того как определена ширина резистора, используя формулу (3.1), рассчитывают его длину l .

Если же у пленочного резистора $k_\Phi < 1$, то расчет его геометрических

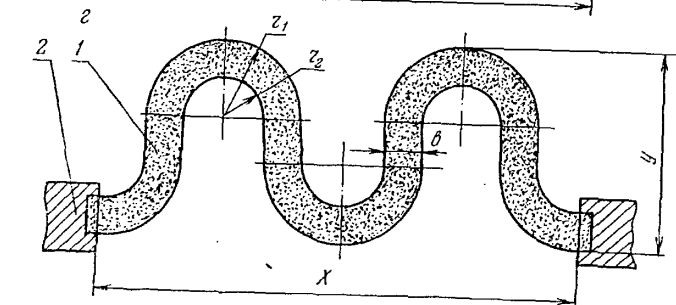
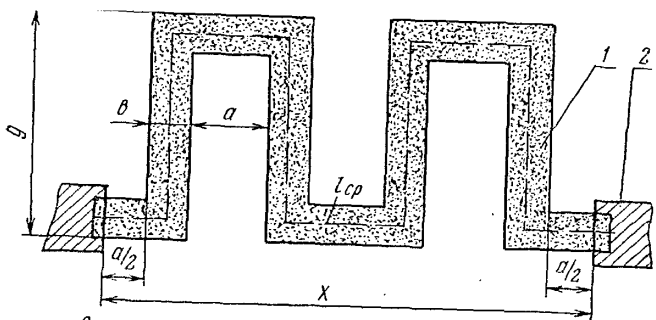
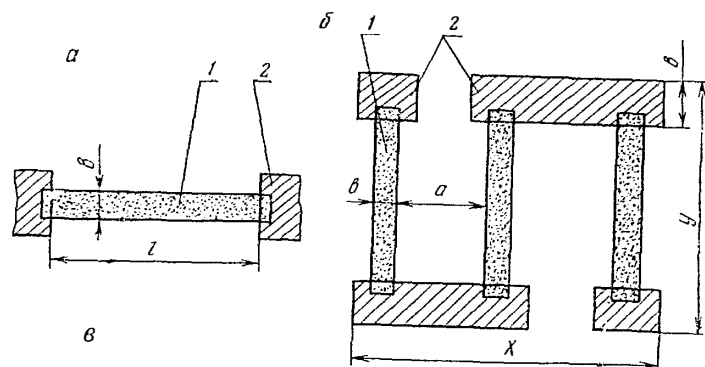


Рис. 3.1. Конфигурации тонкопленочных резисторов: а — прямоугольная; б — в виде отдельных резистивных полосок, соединенных проводящими перемычками; в — типа «меандр»; г — змеевидная; 1 — резистивная пленка; 2 — контактные площадки.

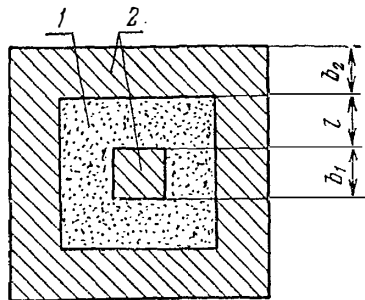


Рис. 3.2. Конфигурация тонкопленочного резистора с центральной контактной площадкой (ЦКП): 1 — резистивная пленка; 2 — контактные площадки.

размеров начинают с определения длины. Длину резистора выбирают из условия

$$l \geq \max \{l_P, l_{\Delta}, l_{\text{техн}}\},$$

где l_P — минимальная длина резистора, при которой рассеивается заданная мощность:

$$l_P = \sqrt{\frac{RP}{\rho_{\text{кв}} P_0}};$$

l_{Δ} — минимальная длина резистора, при которой обеспечивается заданная точность:

$$l_{\Delta} = \frac{\Delta l + k_{\phi} \Delta b}{\gamma_{R_{\Delta}}};$$

$l_{\text{техн}}$ — минимальная длина резистора, определяемая разрешающей способностью выбранного метода формирования конфигурации (для масочного метода $l_{\text{техн}} = 300$ мкм, для метода фотолитографии $l_{\text{техн}} = 100$ мкм).

Ширина резистора b в данном случае определяется из формулы (3.1). Расчет резисторов, выполненных в виде отдельных резистивных полосок, соединенных проводящими перемычками. Расчет резисторов, представленных на рис. 3.1, б, сводится к определению размеров контура, в который необходимо вписать резистор, если размеры резистора уже известны, или к определению геометрических размеров резистора, если известны размеры контура.

В данном случае общее сопротивление резистора определяется по формуле

$$R = \frac{X \rho_{\text{кв}} (Y - 2b)}{b^2 (m + 1)}, \quad (3.2)$$

где X и Y — соответственно длина и ширина контура, в который вписывается резистор; $m = a/b$.

При расчетах величину m выбирают из конструктивных соображений, руководствуясь тем, что для масочного метода изготовления подобных тонкопленочных резисторов рекомендуемое значение $a \geq 200$ мкм, а для метода фотолитографии $a \geq 100$ мкм.

Исходя из формулы (3.2), при известных размерах контура, в который вписывается резистор, можно определить ширину резистивной полоски

$$b = \frac{-X \rho_{\text{кв}} + \sqrt{X^2 \rho_{\text{кв}}^2 + R \rho_{\text{кв}} X Y (m + 1)}}{R (m + 1)}.$$

Зная величины X , a и b , определяем количество резистивных полосок

$$n = \frac{X}{a + b}.$$

В случае, если необходимо решать обратную задачу, т. е. если известно значение ширины резистивной полоски b , размеры контура X и Y , в который следует вписать резистор, определяют по формуле

$$X = b (1 + \sqrt{1 + k_{\phi} (m + 1)}).$$

Оптимальные размеры контура получаются тогда, когда $X = Y$.

При ориентировочных расчетах, если $k_{\phi} > 20$, для определения значения X используют формулу

$$X = b \sqrt{k_{\phi} (m + 1)}.$$

Расчет резисторов типа «меандр». Ориентировочный расчет резисторов типа «меандр» (рис. 3.1, в) ведут в следующем порядке. Вначале определяют оптимальное число n Z-образных звеньев, составляющих данный резистор:

$$n = \sqrt{\frac{a^2}{4(a+b)^2} + \frac{l_{cp}}{a+b}} - \frac{a}{2(a+b)}, \quad (3.3)$$

где a — расстояние между параллельными резистивными полосками; l_{cp} — длина средней линии меандра.

При массовом методе изготовления резисторов типа «меандр» $a \geq 300$ мкм, при методе фотолитографии $a \geq 100$ мкм. Кроме того, значение a должно удовлетворять следующему условию (только при массовом методе изготовления резисторов):

$$\frac{Y-b}{a} \leq 10.$$

Если это условие не выполняется, то величина a выбирается вновь и значение n определяется повторно.

Формулу (3.3) можно упростить, если из конструктивных соображений принять, что $a=b$. Тогда

$$n = \sqrt{\frac{k_{\Phi}}{2}}. \quad (3.4)$$

Если же $a=2b$, то

$$n = \sqrt{\frac{k_{\Phi}}{3}}. \quad (3.5)$$

Оптимальное число Z-образных звеньев меандра, вычисленное по формулам (3.3) — (3.5), может получиться дробным. В этом случае значение n округляют до ближайшего целого числа. В связи с этим изменится общее сопротивление резистора R (увеличится или уменьшится на величину ΔR). Для компенсации величины ΔR изменяют значения b и a или изменяют длину крайнего Z-образного звена на величину

$$\Delta l = \pm \frac{\Delta R}{\rho_{кв}} b.$$

Размеры контура, в который вписывается резистор типа «меандр», определяются по следующим формулам:

$$X = n(a+b); \quad (3.6)$$

$$Y = \frac{l_{cp} - an}{n}. \quad (3.7)$$

При этом площадь контура

$$S = XY \quad (3.8)$$

или с учетом выражений (3.6) и (3.7)

$$S = (a+b)(l_{cp} - an). \quad (3.9)$$

Квадратная или близкая к квадратной форма контура резисторов типа «меандр» иногда оказывается неудобной при их компоновке на подложке. В этом случае, зная S , вычисленную по формулам (3.8) или (3.9), и задавшись одним из размеров контура резистора, например Y' , вычис-

ляют второй размер и число Z-образных звеньев меандра по следующим формулам:

$$X' = \frac{S}{Y'};$$

$$n' = \frac{X'}{a+b}.$$

Приведенный ориентировочный расчет резистора типа «меандр» справедлив лишь в том случае, если электрическое поле в резистивной полоске распределено равномерно по всему ее сечению. Неравномерность распределения поля приводит к сокращению электрической длины пленочного резистора, что в свою очередь способствует уменьшению его сопротивления. Поэтому расчеты, выполненные по формулам (3.3) — (3.9), являются, как правило, предварительными и требуют последующей корректировки.

При уточненном расчете резистора типа «меандр» его общее сопротивление определяют по формуле

$$R = \frac{\rho_{кв} X}{b(a+b)} (a + Y - 0,92b). \quad (3.10)$$

Формула (3.10) справедлива лишь в том случае, если $\frac{Y-b}{b} > 3$, $\frac{a}{2b} > 0,4$.

Исходя из формулы (3.10), для резистора, вписанного в контур оптимальной формы (квадрат), значение X определится следующим образом:

$$X = \frac{b}{2} \left[- (m - 0,92) + \sqrt{(m - 0,92)^2 + 4k_{\Phi}(m + 1)} \right],$$

где $m = a/b$.

Для случая, когда $m=1$ (при $a=b$),

$$X \approx b\sqrt{2k_{\Phi}}.$$

Для случая, когда $m=2$ (при $a=2b$),

$$X = b(-0,54 + \sqrt{3k_{\Phi} + 0,29}).$$

Расчет змеевидных резисторов. Расчет змеевидных резисторов (рис. 3.1, г) ведут аналогично расчету резисторов типа «меандр». Основу конструкции змеевидного резистора составляет S-образное звено. Коэффициент формы $1/4$ части кольца определяется по формуле

$$k_{\Phi} = \frac{1,57}{\ln \frac{r_1}{r_2}},$$

где r_1 — внешний радиус кольца; r_2 — внутренний радиус кольца.

Общее сопротивление змеевидного резистора рассчитывают следующим образом:

$$R = \rho_{кв} \frac{X}{r_2(1+m)} \left[\frac{3,14}{\ln m} - \frac{2m}{m-1} + \frac{Y}{r_2(m-1)} \right], \quad (3.11)$$

где $m = r_1/r_2$.

Число S-образных звеньев вычисляют по формуле

$$n = \frac{X}{r_1 + r_2}.$$

Задавшись значением m и решая уравнение (3.11) относительно r_2 , определяем ширину резистивной полоски

$$b = r_1 - r_2.$$

Расчет резисторов с центральной контактной площадкой (ЦКП). Расчет геометрических размеров резисторов с ЦКП (рис. 3.2) ведут в следующем порядке. Вначале, исходя из данных значений R и $\rho_{\text{КВ}}$, по номограмме, представленной на рис. 3.3, определяют коэффициент k .

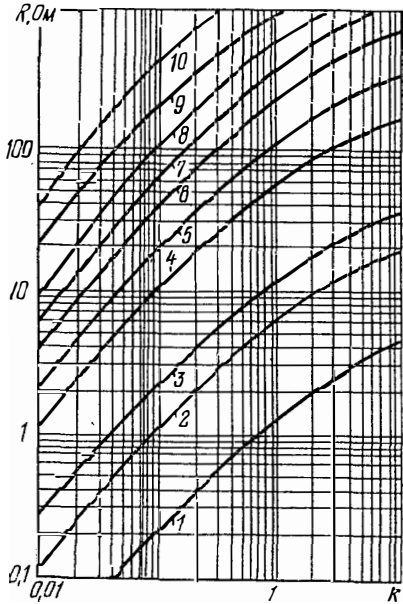


Рис. 3.3. Номограмма для определения величины k тонкопленочных резисторов с ЦКП при следующих значениях $\rho_{\text{КВ}}$, Ом/кв:
1 — 10; 2 — 50; 3 — 100; 4 — 500; 5 — 1000;
6 — 2000; 7 — 3000; 8 — 5000; 9 — 10 000; 10 — 20 000.

Ширину внутренней контактной площадки b_1 выбирают из условия

$$b_1 \geq \max \{1, 2b_p, b_\Delta, b_{\text{к.т}}\},$$

где

$$b_p = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\rho_{\text{КВ}} P}{R P_0}};$$

$$b_\Delta \geq \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{k}}{(\gamma_R - \gamma_{\rho_{\text{КВ}}}) \left(\frac{1}{2k} + 1 \right) \ln(1 - 2k)};$$

$b_{\text{к.т}}$ определяется конструкцией и размерами вывода, а также методом подсоединения к контактной площадке.

Затем из формулы $k = l/b_1$ определяют длину резистора l . Минимальная длина резистора зависит от выбранного метода его изготовления. Так, для фотолитографического метода $l \geq 100$ мкм.

Ширина внешней контактной площадки b_2 должна быть не менее $b_{\text{к.т}}$.

Анализ погрешностей тонкопленочных резисторов. Суммарную относительную погрешность сопротивления резистора оценивают по формуле

$$\gamma_R = \gamma_{\rho_{\text{КВ}}} + \gamma_{R_\Delta} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{\text{СТ}}} + \gamma_{R_{\text{К}}}, \quad (3.12)$$

где $\gamma_{\rho_{\text{КВ}}}$ — погрешность воспроизведения сопротивления квадрата резистивной пленки:

$$\gamma_{\rho_{\text{КВ}}} = \frac{\Delta \rho_{\text{КВ}}}{\rho_{\text{КВ}}};$$

γ_{R_Δ} — погрешность воспроизведения геометрических размеров резистора:

$$\gamma_{R_\Delta} = 2 \frac{1 + \frac{\Delta l}{k_\Phi \Delta b}}{\frac{\Delta b}{b} - \frac{\Delta b}{b}};$$

γ_{R_t} — температурная погрешность сопротивления резистора:

$$\gamma_{R_t} = \alpha_R (T - 20^\circ \text{C});$$

α_R — температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала резистивной пленки, $1/^\circ\text{C}$; T — максимальная рабочая температура резистора, $^\circ\text{C}$; $\gamma_{R_{\text{СТ}}}$ — погрешность сопротивления, обусловленная старением тонкопленочных резисторов; $\gamma_{R_{\text{К}}}$ — погрешность сопротивления, вносимая контактами:

$$\gamma_{R_{\text{К}}} = \frac{2R_{\text{К}}}{R};$$

$R_{\text{К}}$ — сопротивление переходного контакта.

Величина $\gamma_{\rho_{\text{КВ}}}$ обеспечивается технологическим процессом напыления резистивных пленок и не превышает $\pm 4\%$. Кроме того, для частного случая, когда $\Delta b = \Delta l$, соотношение для вычисления величины γ_{R_Δ} упрощается и принимает вид

$$\gamma_{R_\Delta} = 2 \frac{1 + \frac{1}{k_\Phi}}{\frac{\Delta b}{b} - \frac{\Delta b}{b}}.$$

Максимальная рабочая температура резисторов зависит от материала, который используется для изготовления резистивной пленки и, как правило, не превышает $+125^\circ\text{C}$. Погрешность сопротивления резисторов, обусловленную их старением ($\gamma_{R_{\text{СТ}}}$), и величину ТКС материала резистивной пленки выбирают из справочных данных. Методика определения сопротивления переходного контакта более подробно изложена в разделе по конструированию пленочных контактов. Однако для ориентировочных расчетов можно принять $\gamma_{R_{\text{К}}} = 1-3\%$.

Суммарная погрешность сопротивления резистора γ_R , вычисленная по формуле (3.12), не должна превышать $\pm 15\%$ (если в техническом задании на проектирование резистора не оговорена более высокая точность). Для резисторов, конфигурация которых показана на рис. 3.1, в, г, суммарная погрешность γ_R при массовом методе изготовления не должна превышать $\pm 20\%$.

Анализ частотных свойств тонкопленочных резисторов прямоугольной формы. Граничная частота для низкоомных пленочных резисторов ($R < 300 \text{ Ом}$) определяется по формуле

$$f \leq \frac{R_0}{62,8L},$$

где R_0 — сопротивление резистора на постоянном токе, Ом; L — индуктивность резистора, мкГн.

Для резистора прямоугольной формы

$$L = 0,002l \left(\ln 2k_\phi + 0,5 + \frac{0,223}{k_\phi} \right).$$

Предельную рабочую частоту высокоомных резисторов ($R > 300 \text{ Ом}$) вычисляют по формуле

$$f \leq \frac{0,1}{R_0 C_{\text{пр}}},$$

где $C_{\text{пр}}$ — приведенная емкость, действие которой эквивалентно распределенной емкости и емкости диэлектрических потерь, пФ.

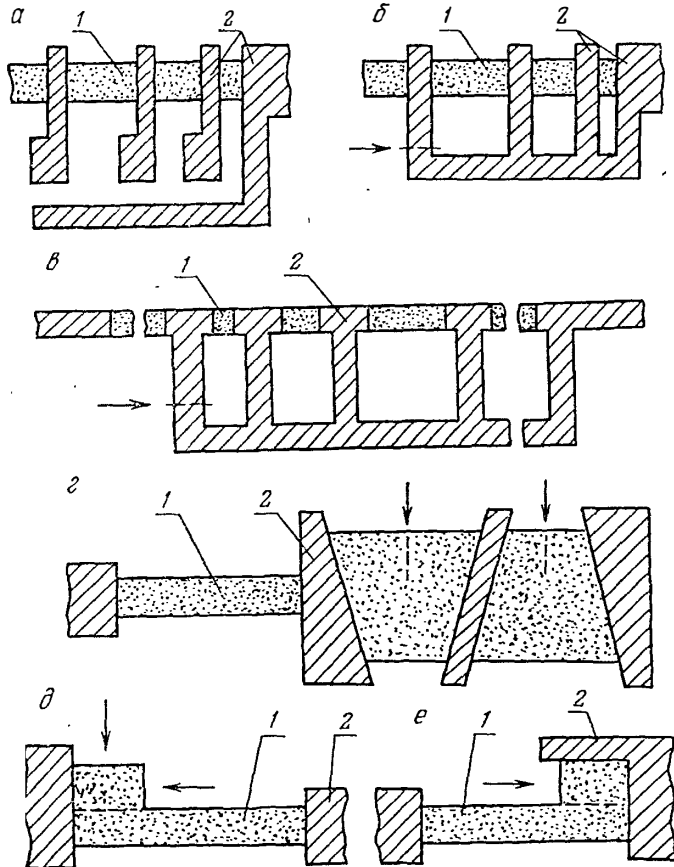


Рис. 3.4. Разновидности конструкций подгоняемых тонкопленочных резисторов: а—в — для дискретной подгонки; г—д — для плавной подгонки; 1 — резистивная пленка; 2 — контактные площадки.

Расчет подгоняемых резисторов. Если в процессе анализа погрешностей тонкопленочных резисторов установлено, что условие

$$|\pm \gamma_R|_{\text{расч}} \leq |\pm \gamma_R|_{\text{задан}}$$

не выполняется, то такие резисторы нуждаются в подгонке. Кроме того, некоторые резисторы требуют подгонки для обеспечения заданных выходных характеристик микросхем, в которые эти резисторы входят.

Разновидности конструкций подгоняемых тонкопленочных резисторов приведены на рис. 3.4. На рис. 3.4, а показана конструкция резистора, подгонка номинала которого осуществляется путем соединения (пайкой или сваркой) проводящих перемычек с общей контактной площадкой. Ступенчатое изменение сопротивления подгоняемых резисторов обеспечивают также конструкции, показанные на рис. 3.4, б, в. Изменение сопротивления резисторов в данном случае достигается перерезанием проводящих перемычек. На рисунке стрелками показано направление движения режущего инструмента, а штриховыми линиями — места реза. Следует заметить, что резистор, представленный на рис. 3.4, б, формируется напылением через маски, а резистор, изображенный на рис. 3.4, в — методом фотолитографии. В пленочных делителях напряжения рекомендуется выполнять подгоняемые резисторы в виде составных (рис. 3.4, г). Такие резисторы содержат основную и подгоняемую части. Удалением части резистивной пленки осуществляется подгонка резисторов, которые приведены на рис. 3.4, д, е. Конструкции резисторов, представленные на рис. 3.4, а—в, предназначены для дискретной подгонки, остальные конструкции (рис. 3.4, г—е) позволяют плавно изменять сопротивление резисторов в процессе подгонки.

Исходными данными для расчета подгоняемых резисторов являются следующие: максимальное и минимальное значения сопротивления R_{max} и R_{min} ; относительная погрешность сопротивления резистора после подгонки $\gamma_{R_{\text{пр}}}$; максимальное и минимальное значения сопротивления квадрата резистивной пленки $\rho_{\text{кв max}}$ и $\rho_{\text{кв min}}$; максимальное и минимальное значения ширины b_{max} , b_{min} и длины l_{max} , l_{min} .

Расчет подгоняемых по длине пленочных резисторов (рис. 3.5, а) ведется в следующем порядке. Вначале определяют количество секций подгонки

$$m = \frac{\gamma_R}{\lambda_{R_{\text{пр}}}}. \quad (3.13)$$

Если величина m представляет дробное число, то ее округляют до ближайшего большего целого числа.

Длина нерегулируемого участка резистора определяется по формуле

$$l_{\text{н}} = \frac{b_{\text{min}} R_{\text{max}}}{\rho_{\text{кв max}}}.$$

Общая длина резистора без проводящих перемычек может быть определена из соотношения

$$l'_0 = l_{\text{н}} + l_{\text{р}} = \frac{R_{\text{min}} b_{\text{max}}}{\rho_{\text{кв min}}}.$$

Длина регулируемой части

$$l_{\text{р}} = l'_0 - l_{\text{н}}.$$

Исходя из значения l_p и m , можно определить величину

$$l_{\text{подг}} = \frac{l_p}{m}.$$

При вычислении общей длины резистора необходимо к l_p и l_n добавить длину, занимаемую проводящими перемычками:

$$l_0 = l_n + l_p + \Delta l m.$$

Порядок расчета подгоняемых по ширине пленочных резисторов (рис. 3.5, б) состоит в следующем. Аналогично предыдущему случаю вна-

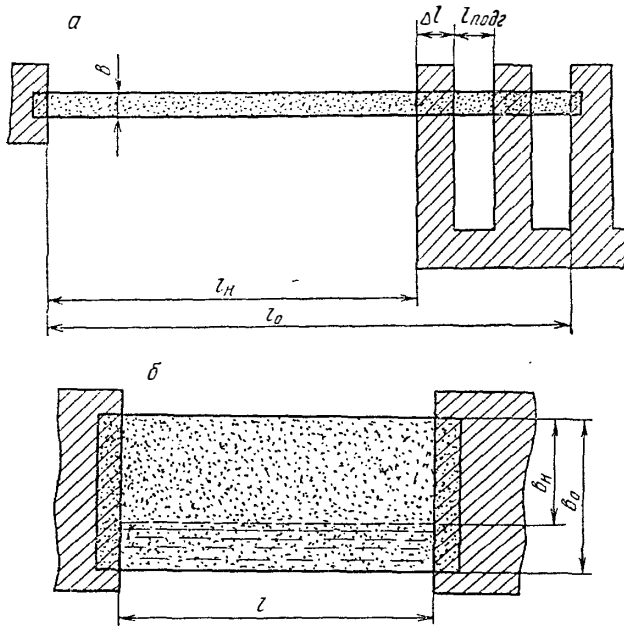


Рис. 3.5. Конструктивные параметры подгоняемых по длине (а) и по ширине (б) тонкопленочных резисторов:

b — ширина резистора; l_n — длина нерегулируемой части резистора; l_0 — общая длина резистора; Δl — длина проводящей перемычки; $l_{\text{подг}}$ — длина одной подгоночной секции; l — длина резистора; b_n — ширина нерегулируемой части резистора; b_0 — общая ширина резистора.

чале по формуле (3.13) производят расчет количества секций подгонки m и округляют его до ближайшего большего целого числа.

В дальнейшем определяют максимально возможную ширину резистора

$$b_0 = \frac{\rho_{\text{кв}} \max l_{\text{max}}}{R_{\text{max}}}.$$

Зная величину b_0 , можно определить минимально возможное сопротивление резистора

$$R'_{\text{min}} = \frac{\rho_{\text{кв}} \min l_{\text{min}}}{b_0}.$$

Величина сопротивления, которую необходимо скомпенсировать, определяется как разница между R_{min} и R'_{min} :

$$\Delta r = R_{\text{min}} - R'_{\text{min}}.$$

Ширина нерегулируемой части подгоняемого резистора определяется по формуле

$$b_n = \frac{\rho_{\text{кв}} \min l_{\text{min}}}{R_{\text{min}}}.$$

Сопротивление каждой подгоночной секции можно определить из соотношения

$$r_i = R_i \left(1 + \frac{R_i}{\Delta R} \right),$$

где R_i — сопротивление резистора перед удалением i -й секции, $R_i = R_{\text{min}} + n \Delta R$ [$n = 0, 1, 2, \dots, (m-1)$];

$$\Delta R = \frac{\Delta r}{m}.$$

Ширина i -й секции подгонки определяется по формуле

$$\Delta b_i = \frac{\rho_{\text{кв}} \min l_{\text{min}}}{r_i}.$$

Правильность расчетов проверяется соотношением

$$b_0 - b_n = \sum_{i=1}^m \Delta b_i.$$

Пленочные переходные контакты и межсоединения

Конструирование пленочных переходных контактов. Разновидности конструкций пленочных переходных контактов, формируемых к резисторам методом напыления через маски или методом фотолитографии, показаны на рис. 3.6. Минимальное сопротивление таких контактов определяется по следующей формуле:

$$R_{\text{к min}} = \frac{\sqrt{\rho_{\text{кв}} \rho_{\text{к}}}}{b},$$

где $\rho_{\text{кв}}$ — сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/кв; $\rho_{\text{к}}$ — удельное переходное сопротивление контакта, Ом·мм²; $\rho_{\text{к}} = 0,05 - 0,25$ Ом·мм² при получении контакта на многопозиционных вакуумных установках, позволяющих проводить цикл напылений без разгерметизации установок; $\rho_{\text{к}} = 2,5 - 5$ Ом·мм² при создании контакта на нескольких установках (с разгерметизацией); b — ширина тонкопленочного резистора, мм (конструктивные параметры пленочных переходных контактов указаны на рис. 3.7).

Максимально допустимую величину сопротивления пленочного переходного контакта вычисляют по формуле

$$R_{\text{к, доп}} = \frac{\gamma_{R\text{к}} R}{2},$$

где R — сопротивление резистора, Ом; $\gamma_{R\text{к}}$ — относительная погрешность сопротивления резистора, обусловленная образованием пере-

ходных контактов, % (величина $\gamma_{РК}$ выбирается равной 1—3 % и в дальнейшем уточняется).

Затем проверяется выполнение условия

$$R_{к\ min} < R_{к\ доп.}$$

Если окажется, что данное условие не выполняется, то необходимо уменьшить значение $R_{к\ min}$ за счет увеличения ширины резистора. В этом случае находят применение гантелевидные резисторы (рис. 3.6, б).

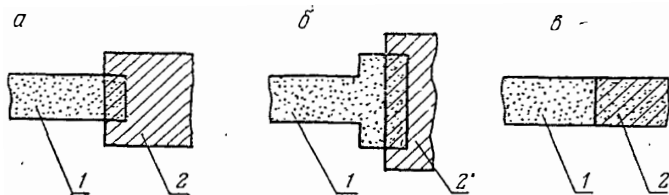


Рис. 3.6. Разновидности конструкций пленочных переходных контактов, формируемых различными методами:

а, б — напылением через маски; б' — фотолитографией; 1 — резистивная пленка; 2 — контактная площадка.

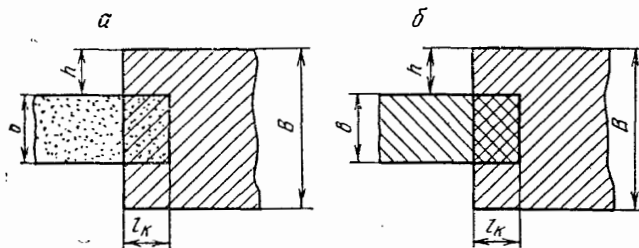


Рис. 3.7. Конструктивные параметры пленочных переходных контактов к резистивной (а) и проводящей (б) пленкам:

б — ширина пленки; h — величина перекрытия; l_k — длина переходного контакта; B — ширина переходного контакта.

Минимальная длина переходного контакта определяется по формуле

$$l_{к\ min} \geq 1,5 \sqrt{\frac{\rho_{к}}{\rho_{кв}}} \quad (3.14)$$

В заключение вычисляют полную длину переходного контакта и ширину проводящей пленки (рис. 3.7, а):

$$\begin{aligned} l_k &\geq l_{к\ min} + \Delta l + \eta; \\ B &\geq b + 2(\Delta b + \eta), \end{aligned}$$

где Δb и Δl — погрешности изготовления масок, мм; η — погрешность установки масок и их совмещения при напылении переходных контактов, мм.

Величина перекрытия h (рис. 3.7) определяется суммой значений Δb и η , однако для масочного метода изготовления контактов $h \geq 0,2$ мм.

Для упрощения вычислений по формуле (3.14) можно воспользоваться номограммой, представленной на рис. 3.8.

В случае контакта двух проводящих пленок (рис. 3.7, б)

$$R_{к\ min} = \rho'_{кв} \frac{l_k}{b} + \frac{\rho_{к}}{bl_k},$$

где $\rho'_{кв}$ — сопротивление квадрата проводящей пленки, Ом/кв; l_k — длина переходного контакта, мм.

Остальные конструктивные параметры переходного контакта (рис. 3.7, б) определяют аналогично параметрам контакта между проводящей и резистивной пленками.

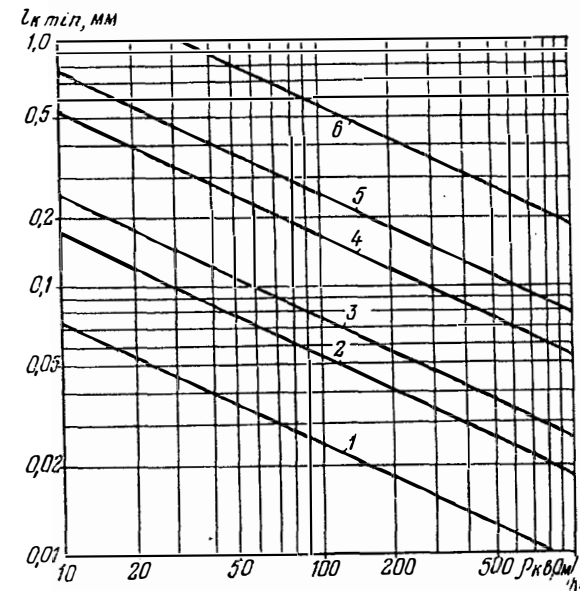


Рис. 3.8. Номограмма для определения минимальной длины $l_{к\ min}$ пленочного переходного контакта в зависимости от величины $\rho_{кв}$ резистивной пленки и следующих значений $\rho_{к}$, Ом·мм²:

1 — 0,01; 2 — 0,05; 3 — 0,1; 4 — 0,5; 5 — 1; 6 — 5.

Конструирование межсоединений в гибридных интегральных микросхемах. При конструировании гибридных ИМС, имеющих относительно небольшие размеры, сопротивлением пленочных межсоединений можно пренебречь.

Конфигурацию таких межсоединений выбирают в виде полосок минимальной ширины, определяемой возможностями технологии. Если необходимо учесть активное сопротивление пленочных проводников, то при расчете задают либо допустимую величину сопротивления пленочного проводника R, либо допустимую величину падения напряжения U на пленочном проводнике и максимальный ток I, протекающий по этому проводнику.

Геометрические размеры пленочного проводника должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\rho'_{кв} \frac{l}{b} \leq R = \frac{U}{I},$$

где $\rho'_{кв}$ — сопротивление квадрата проводящей пленки, Ом/кв; l — длина проводника, мм; b — ширина проводника, мм.

Конструирование межсоединений можно вести также исходя из допустимой величины плотности тока в пленочных проводниках. Допустимую величину плотности тока принимают $j=20$ А/мм².

Собственная емкость C пленочного проводника прямоугольной формы может быть оценена по формуле

$$C = 0,0241 \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \cdot \frac{l}{\lg \frac{4l}{b}} \text{ [пФ]},$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрические проницаемости соответственно окружающей среды и материала подложки.

Собственная индуктивность L пленочного проводника прямоугольной формы может быть найдена по формуле

$$L = 0,002l \left(2,3 \lg \frac{2l}{b} + 0,2235 \frac{b}{l} + 0,5 \right) \text{ [мкГн]}. \quad (3.15)$$

Конденсаторы

Общие принципы конструирования тонкопленочных конденсаторов. В тонкопленочных микросхемах различают преимущественно три варианта конструкции конденсаторов: конденсаторы с трехслойной структурой (две проводящие обкладки, разделенные диэлектриком); многослойные конденсаторы, отличающиеся от предыдущего варианта повторяющимся нанесением проводящих и диэлектрических пленок; гребенчатые конденсаторы, у которых емкость образуется за счет краевого эффекта. В общем случае емкость конденсатора определяется по формуле

$$C = 0,0885 \frac{\epsilon S (N - 1)}{d},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; S — активная площадь перекрытия обкладок конденсатора, см²; N — число обкладок; d — толщина диэлектрика, см.

Для трехслойной структуры

$$C = 0,0885 \frac{\epsilon S}{d}.$$

Конструкция конденсатора определяется в первую очередь величиной активной площади перекрытия его обкладок. Некоторые разновидности конструкций конденсаторов с трехслойной структурой и гребенчатых конденсаторов приведены на рис. 3.9. Гребенчатые конденсаторы (рис. 3.9, *д*) и конденсаторы в виде двух параллельно расположенных проводящих пленок (рис. 3.9, *е*) используются тогда, когда необходимо получить емкость единицы или доли пикофарад.

Конструктивный расчет тонкопленочного конденсатора сводится к определению его геометрических размеров S и d и удельной емкости C_0 . Спроектированный конденсатор должен удовлетворять предъявляемым требованиям к электрической прочности и заданной точности.

Исходными данными для конструктивного расчета тонкопленочных конденсаторов являются следующие: номинальная емкость C , пФ; относительное отклонение номинального значения емкости γ_C , %; рабочее напряжение U_p , В; рабочая частота f , МГц.

Конструктивный расчет тонкопленочных конденсаторов с площадью перекрытия обкладок 5 мм² и более (рис. 3.9, *а*). Расчет ведут в следующем порядке. Вначале определяют толщину диэлектрика

$$d \geq \frac{U_p k_3}{E_{пр}},$$

где $E_{пр}$ — пробивное напряжение для выбранного материала диэлектрика, В/см; k_3 — коэффициент запаса [$k_3=2-4$ и зависит от условий эксплуатации конденсаторов (чем более жесткие условия, тем большее значение принимает коэффициент)].

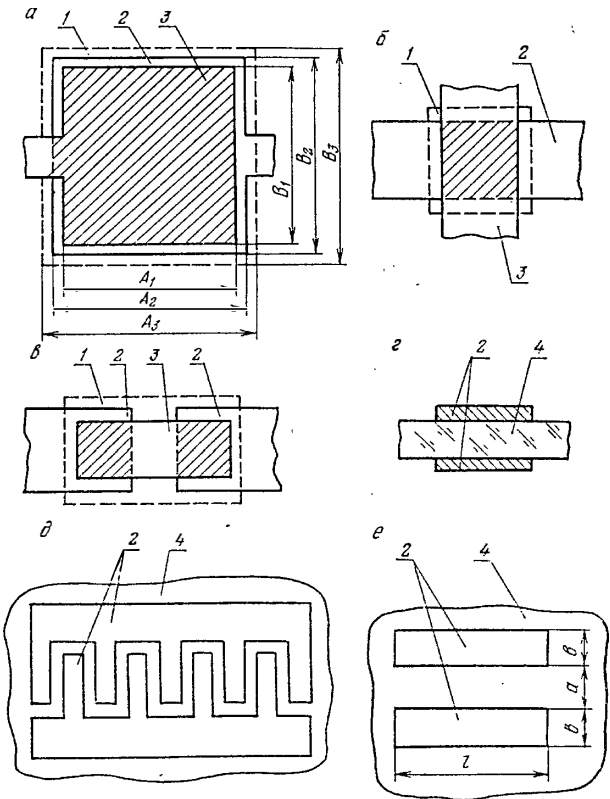


Рис. 3.9. Разновидности конструкций тонкопленочных конденсаторов: *а* — с активной площадью перекрытия обкладок $S > 5$ мм²; *б* — с $S = 1-5$ мм²; *в*, *г* — с $S < 1$ мм²; *д* — гребенчатая; *е* — в виде двух параллельно расположенных проводящих пленок; 1 — диэлектрик; 2 — нижняя обкладка; 3 — верхняя обкладка; 4 — подложка.

Затем вычисляют максимально допустимую относительную погрешность воспроизведения площади конденсатора

$$\gamma_{S \text{ доп}} = \gamma_C - \gamma_{C_0} - \gamma_{C_t} - \gamma_{C_{CT}},$$

где γ_{C_0} — погрешность воспроизведения удельной емкости (составляет 5—10 %); γ_{C_t} — температурная погрешность емкости:

$$\gamma_{C_t} = \alpha_C (T - 20^\circ \text{C});$$

α_c — температурный коэффициент емкости (ТКЕ) материала диэлектрика, $1/^\circ\text{C}$; T — максимальная рабочая температура конденсатора, $^\circ\text{C}$; $\gamma_{c_{ст}}$ — погрешность емкости, обусловленная старением тонкопленочных конденсаторов (не превышает 2—3 %).

Впоследствии оценивают удельную емкость материала диэлектрика по формулам:

$$C'_0 = 0,0885 \frac{\varepsilon}{d};$$

$$C''_0 = C \left(\frac{\gamma_{S \text{ доп}}}{\Delta A} \right)^2 \cdot \frac{k_\phi}{(1 + k_\phi)^2},$$

где ΔA — абсолютная погрешность воспроизведения размеров конденсатора (для масочного метода $\Delta A = \pm 0,001$ см); k_ϕ — коэффициент формы конденсатора, $k_\phi = A_1/B_1$.

Окончательное значение удельной емкости C_0 выбирается из условия

$$C'_0 > C_0 < C''_0.$$

В дальнейшем уточняется толщина диэлектрика по формуле

$$d = 0,0885 \frac{\varepsilon}{C_0}.$$

Минимальная толщина диэлектрика ограничивается электрической прочностью, а максимальная — возможностями пленочной технологии. Чаще всего толщина диэлектрика находится в пределах от 0,3—0,5 до 1 мкм. После окончательного выбора d уточняется величина C_0 .

Из соотношения $S = \frac{C}{C_0}$ определяют активную площадь перекрытия обкладок конденсатора.

Геометрические размеры конденсатора рассчитывают по следующим формулам: верхней обкладки

$$A_1 = \sqrt{S k_\phi} = \frac{\Delta A}{\gamma_{S \text{ доп}}} (1 + k_\phi);$$

$$B_1 = \frac{A_1}{k_\phi} = \frac{\Delta A}{\gamma_{S \text{ доп}}} \cdot \frac{1 + k_\phi}{k_\phi};$$

нижней обкладки

$$A_2 = A_1 + 2(\Delta A + \eta); \quad (3.16)$$

$$B_2 = B_1 + 2(\Delta A + \eta); \quad (3.17)$$

диэлектрика

$$A_3 = A_2 + 2(\Delta A + \eta); \quad (3.18)$$

$$B_3 = B_2 + 2(\Delta A + \eta); \quad (3.19)$$

где η — погрешность установки и совмещения масок, см.

Конструктивный расчет тонкопленочных конденсаторов с площадью перекрытия обкладок 1—5 мм² (рис. 3.9, б). При расчете таких конденсаторов необходимо учитывать краевой эффект. Емкость конденсатора в данном случае вычисляется по формуле

$$C = 0,0885 \frac{S}{kd},$$

где k — поправочный коэффициент, который определяется из графика, представленного на рис. 3.10, а.

Таким образом, с учетом краевого эффекта для получения заданной емкости конденсатора необходимо уменьшить его площадь в k раз. В остальном конструктивный расчет подобных конденсаторов не отличается от изложенного выше.

Конструктивный расчет гребенчатых конденсаторов (рис. 3.9, д, е). Емкость гребчатого конденсатора определяют по формуле

$$C = \beta \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} l,$$

где β — коэффициент, значение которого определяется из графика, представленного на рис. 3.10, б; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — диэлектрическая проницаемость со-

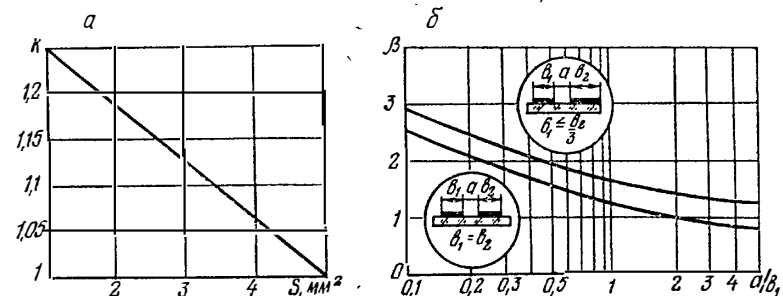


Рис. 3.10. Зависимости, характеризующие изменение поправочного коэффициента от конструктивных параметров пленочного конденсатора:

а — для конденсатора, показанного на рис. 3.9, б; б — для конденсаторов, показанных на рис. 3.9, д, е.

ответственно материала подложки и окружающей среды; l — длина совместной границы двух проводников.

Конструктивный расчет подгоняемых конденсаторов. Основные конструкции подгоняемых конденсаторов представлены на рис. 3.11. Исходными данными для расчета подгоняемых конденсаторов являются: номинальная емкость C , пФ; рабочее напряжение U_p , В; относительное отклонение номинального значения емкости γ_c , %; рабочая частота f , МГц.

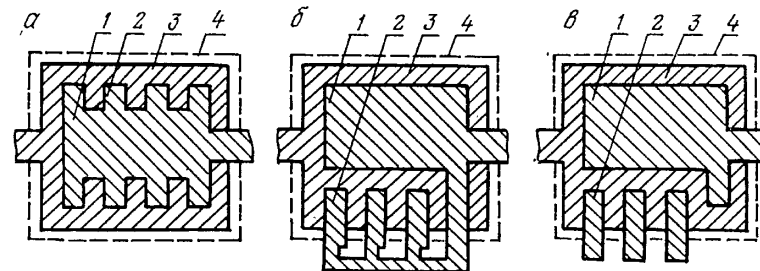


Рис. 3.11. Конструкции подгоняемых пленочных конденсаторов:

а, б — подгонка путем отрезания подгоночных секций; в — подгонка путем перепайки подгоночных секций; 1 — верхняя обкладка; 2 — подгоночные секции; 3 — нижняя обкладка; 4 — диэлектрик.

Расчет начинают с определения количества подгоночных секций

$$n = \frac{\gamma_{C_0} + \gamma_S}{\gamma_C - \gamma_{C_{ст}}},$$

где $\gamma_S = \frac{\Delta A}{\sqrt{S}} \left(\sqrt{k_\Phi} + \frac{1}{\sqrt{k_\Phi}} \right)$.

В случае дробного значения n оно округляется до ближайшего большего целого.

Площадь верхней обкладки вместе с пригоночными секциями определяется по формуле

$$S_{\max} = \frac{C_{\min}}{C_{0\min}}.$$

При этом максимально возможная емкость конденсатора

$$C'_{\max} = S_{\max} C_{0\max}.$$

Таким образом, величина емкости, которую необходимо скорректировать:

$$\Delta C = C'_{\max} - C_{\max}.$$

Площадь основной нерегулируемой части конденсатора определяется соотношением

$$S_{\text{осн}} = \frac{C_{\max}}{C_{0\max}}.$$

Величина емкости одной подгоночной секции

$$C_c = \frac{\Delta C}{n},$$

при этом площадь секции

$$S_c = \frac{C_c}{C_{0\max}}.$$

Размеры сторон верхней обкладки конденсатора определяются по формулам:

$$A_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{2}\right)^2 (1 + k_\Phi)^2 + S_{\text{осн}} k_\Phi} - \frac{\Delta A}{2} (1 + k_\Phi);$$

$$B_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{2}\right)^2 \cdot \frac{(1 + k_\Phi)^2}{k_\Phi^2} + \frac{S_{\text{осн}}}{k_\Phi}} - \frac{\Delta A}{2} (1 + k_\Phi).$$

Для случая, когда $k_\Phi = 1$ и конденсатор имеет достаточно большую емкость,

$$A_1 = B_2 = \sqrt{S_{\text{осн}}} - \Delta A. \quad (3.20)$$

Размеры подгоночной секции определяются по формуле (3.20), если вместо $S_{\text{осн}}$ подставить S_c .

Подгоночные секции можно произвольно размещать по сторонам верхней обкладки, однако необходимо стремиться к сохранению оптимальной формы конденсатора. Если число секций не превышает трех, то они раз-

мещаются на одной стороне, в противном случае — на двух и трех сторонах.

Размеры нижней обкладки и диэлектрика подгоняемого конденсатора определяют по формулам (3.16) — (3.19).

RC-структуры с распределенными параметрами

В гибридных ИМС находят применение RC-структуры с распределенными параметрами. Они используются в качестве фильтров, фазосдвигающих элементов, а также элементов селективной обратной связи. Некоторые конструктивные варианты пленочных RC-структур с распределенными параметрами представлены на рис. 3.12.

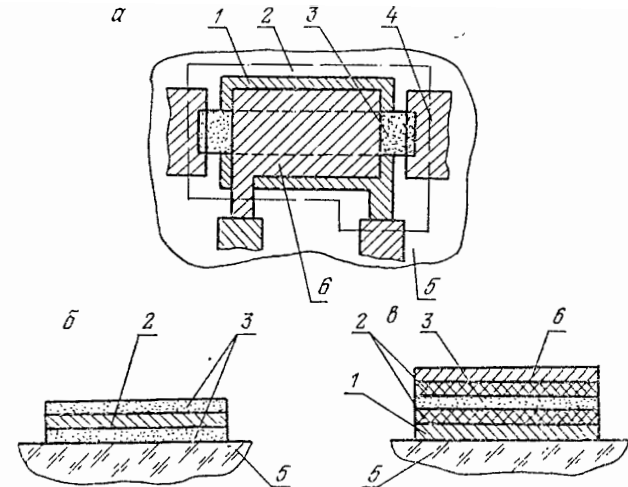


Рис. 3.12. Конструктивные варианты пленочных RC-структур с распределенными параметрами:

а — топология C — R — NC-структуры; б — R — C — NR-структура в разрезе; в — C — R — NC-структура в разрезе; 1 — нижняя обкладка конденсатора; 2 — диэлектрик; 3 — резистивный слой; 4 — контактные площадки; 5 — подложка; 6 — верхняя обкладка конденсатора.

На рис. 3.12, а показано конструктивное исполнение однородной распределенной RC-структуры. Она состоит из пяти слоев: двух проводящих, двух диэлектрических и одного резистивного (рис. 3.12, в).

Конструктивный расчет однородных распределенных RC-структур сводится к определению длины l и ширины b резистивной обкладки.

Для расчета однородных распределенных RC-структур необходимо располагать следующими исходными данными: граничной частотой для фильтров высокой и низкой частоты f ; параметром K , который зависит от вида частотной характеристики; допустимым диапазоном значений суммарного сопротивления RC-структуры; удельной емкостью диэлектрика C_0 ; сопротивлением квадрата резистивной пленки $R_{кв}$.

Расчет однородных RC-структур с распределенными параметрами ведут в следующем порядке. Вначале вычисляют

$$RC = \frac{K}{2\pi f}.$$

Длину структуры определяют по формуле

$$l_{расч} = \sqrt{\frac{RC}{\rho_{кв} C_0}}$$

Затем рассчитывают значение k_{ϕ} резистивной обкладки:

$$k_{\phi} = \frac{R}{\rho_{кв}},$$

где R — среднее значение (из допустимого диапазона) сопротивления структуры.

Ширину резистивной обкладки определяют из формулы (3.1).

Окончательные размеры l и b резистивной обкладки выбирают аналогично тому, как это делается при проектировании тонкопленочных резисторов.

Пленочные катушки индуктивности

Общие положения. Некоторые конструктивные варианты пленочных катушек индуктивности представлены на рис. 3.13. Электрические параметры их определяются следующим образом. Индуктивность линейчатой полоски (рис. 3.13, а) определяется по формуле (3.15). Расчет индуктивности одновитковой петли ведут по следующим формулам:

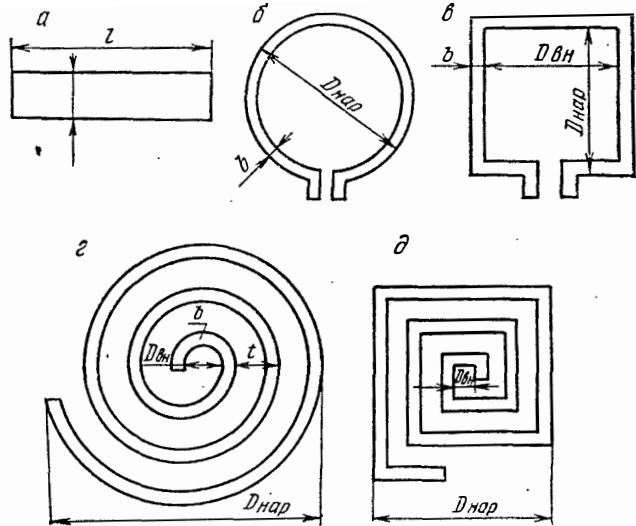


Рис. 3.13. Конструкции пленочных катушек индуктивности:

а — линейчатая; б — одновитковая круглая; в — одновитковая квадратная; г — многовитковая круглая; д — многовитковая квадратная.

для круглой петли (рис. 3.13, б)

$$L = 0,002l \left(\ln 2 \frac{l}{b} - 2,451 \right);$$

для квадратной петли (рис. 3.13, в)

$$L = 0,002l \left(\ln 2 \frac{l}{b} - 2,853 \right),$$

где l — длина проводящей пленки; b — ширина проводящей пленки.

Наиболее широкое применение в гибридных ИМС получили пленочные катушки индуктивности в виде плоской спирали квадратной или круглой формы (рис. 3.13, г, д). Конструктивный расчет таких катушек индуктивности сводится к определению внутреннего $D_{вн}$ и наружного $D_{нар}$ диаметров спирали, числа витков N , ширины проводника b , шага спирали t и толщины проводящей пленки h .

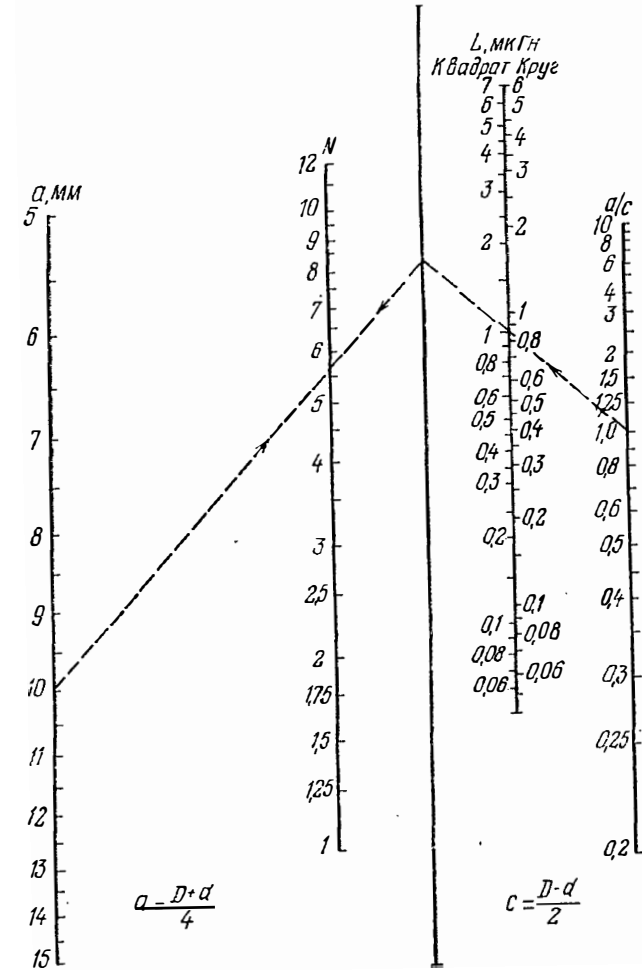


Рис. 3.14. Гомограмма для расчета пленочных катушек индуктивности.

Порядок расчета пленочной катушки индуктивности, имеющей индуктивность L , добротность Q и работающей на частоте f , следующий. Вначале выбирают форму спирали. Если необходимо обеспечить высокую добротность индуктивного элемента, то форму спирали выбирают круг-

лой, поскольку длина токопровода у круглой спирали меньше, чем у квадратной и, следовательно, у нее выше добротность. Если же необходимо обеспечить минимальную площадь, занимаемую индуктивным элементом, то форму спирали выбирают квадратной.

Затем задаются значением внутреннего диаметра спирали $D_{вн}$. Данный диаметр зависит от размеров внутренней контактной площадки и, как правило, выбирается равным 0,5 мм. Наружный диаметр спирали $D_{нар}$ определяется из соотношения $(D_{нар}/D_{вн})_{opt}=0,4$ для круглой спирали и $(D_{нар}/D_{вн})_{opt}=0,362$ для квадратной спирали.

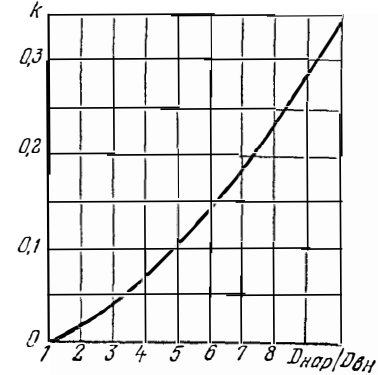


Рис. 3.15. Зависимость коэффициента k от соотношения диаметров $D_{нар}/D_{вн}$.

Зная величину t , можно определить число витков N пленочной катушки индуктивности:

$$N = \frac{c}{t} = \frac{D_{нар} - D_{вн}}{2t}$$

Толщина проводящей пленки h определяется по формуле

$$h = (2-4)y,$$

где y — глубина проникновения электромагнитной волны в материал пленочного проводника (скин-эффект):

$$y = k_1 \sqrt{\lambda} \quad [\text{мкм}];$$

k_1 — коэффициент, зависящий от материала пленки (например, для Al $k_1=0,51$, для Ag $k_1=0,37$, для Cu $k_1=0,39$); λ — длина волны, см.

Ширина проводящей пленки b_0 , при которой можно обеспечить заданную добротность Q без учета скин-эффекта, определяется по формуле

$$b_0 = \frac{\rho t \left(\frac{D_{нар}^2}{D_{вн}^2} - 1 \right) 10^4 Q}{16f D_{вн} k^2 h},$$

где ρ — удельное сопротивление материала пленки, Ом·см; f — рабочая частота, МГц.

С учетом скин-эффекта ширина проводящей пленки уточняется по формуле

$$b = (1,5-2)b_0 \quad [\text{мм}].$$

3.3. НАВЕСНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Общие положения. При конструировании гибридных ИМС в качестве навесных компонентов используют миниатюрные резисторы и конденсаторы, миниатюрные корпусные диоды и транзисторы, бескорпусные диоды и транзисторы, диодные и транзисторные матрицы, полупроводниковые микросхемы. Выбор компонентов для конкретной микросхемы ведут исходя из схемотехнических, конструктивно-технологических и других требований, которые предъявляются к параметрам, габаритам и методам сборки разрабатываемой конструкции.

Установку, способы крепления и методы присоединения навесных компонентов в микросхемах регламентирует ОСТ 4 ГО.010.043. Размещение навесных компонентов на плате осуществляют с учетом выбираемых вариантов их установки. Рекомендуется навесные компоненты располагать рядами, параллельными сторонам коммутационной платы. Размещение навесных компонентов на плате должно быть выполнено с учетом возможной их замены; обеспечения как ручной, так и автоматизированной установки; рационального использования площади подложки; обеспечения минимальной длины проводников при минимальном количестве мест их пересечения; обеспечения рекомендуемых зазоров между проводниками и контактными площадками на плате; обеспечения необходимого сопротивления проводящих слоев и изоляции; уменьшения или исключения паразитных связей между компонентами и соединительными проводниками; требований по обеспечению заданного теплового режима микросхемы.

Для крепления к коммутационной плате бескорпусных компонентов с гибкими выводами используют клей ВК-9. При установке на плате бескорпусных компонентов с жесткими выводами не предусматривается дополнительное крепление компонентов.

Миниатюрные резисторы. В конструкциях гибридных ИМС наиболее широкое применение находят миниатюрные резисторы типов С2-12, С3-2, С3-3 и др. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные некоторых типов миниатюрных резисторов приведены в табл. 3.7, а их габаритные чертежи — на рис. 3.16. Приведенные в таблице обозначения размеров соответствуют принятым на чертежах.

Миниатюрные конденсаторы. В конструкциях гибридных ИМС в качестве емкостных элементов зачастую используют миниатюрные конденсаторы. В большинстве случаев это обусловлено тем, что известными методами не всегда удается получить пленочные конденсаторы с требуемыми рабочими характеристиками. Промышленностью выпускается несколько типов миниатюрных конденсаторов. Однако наибольшее применение в гибридных микросхемах находят миниатюрные керамические конденсаторы типов К10-9 и К10-17в. Следует заметить, что в пределах каждого из перечисленных типов изготавливаются несколько разновидностей конденсаторов, отличающихся конструктивным исполнением (рис. 3.17). Конденсаторы типов К10-9 и К10-17в выпускаются с нормированным (группы П33, М47, М75, М750, М1500) и ненормированным (Н30 и Н90) значениями ТКЕ. Достоинством керамических конденсаторов является то, что они обладают высокой удельной емкостью, близкой к емкости электролитических конденсаторов. Однако высокое сопротивление изоляции (более 10 МОм) и значительная величина тангенса угла диэлектрических потерь сужают область применения таких конденсаторов.

В гибридных ИМС, содержащих по несколько конденсаторов одинаковой емкости, используются матрицы керамических конденсаторов. В настоящее время изготавливаются конденсаторные матрицы типа К10-27. Для

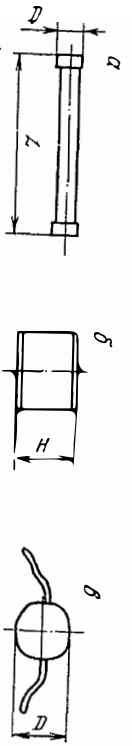


Рис. 3.16. Габаритные чертежи миниатюрных резисторов типов:
а — С2-12, С3-3; б — С3-2, СТ3-28; в — СТ3-32.

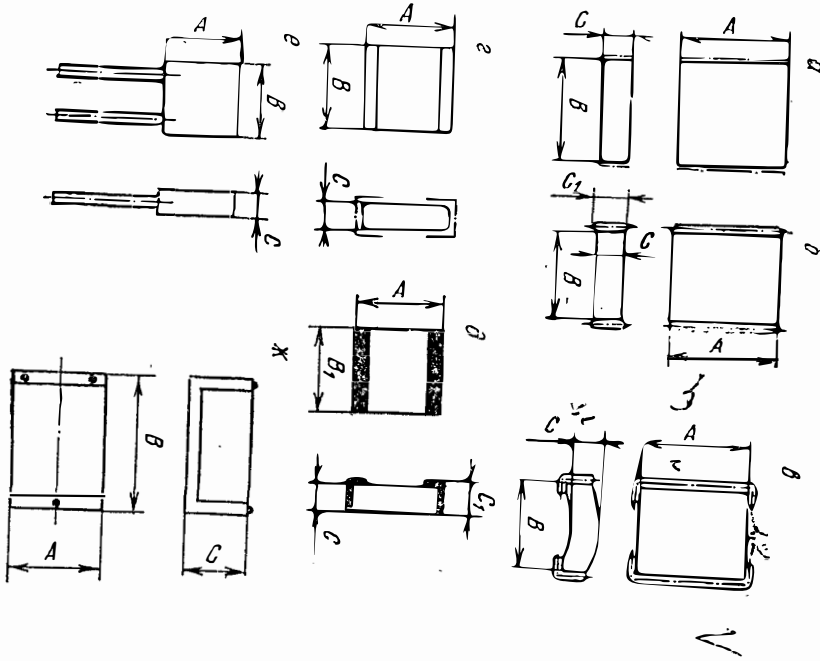


Рис. 3.17. Габаритные чертежи миниатюрных конденсаторов, типов:
а — К10-9 (недуженный); б — К10-9 (дуженный); в — К10-9М (дуженный); г — К10-17а (недуженный); д — К10-17а (дуженный); е — К10-7А, К10-7В; ж — К53-15, К53-16.

Табл. 3.7. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных резисторов

Тип резистора	Диапазон номиналов, Ом	Допускаемые отклонения сопротивлений от номинала, %	Максимально допустимая мощность, мВт	Интервал рабочих температур, °С	Краткая характеристика	Вариант установки в микросхеме	Основные размеры, мм	Габаритный чертеж
КИМ-0,05	10—0,91·10 ⁶ 10 ⁰ —5,6·10 ⁶	±5; ±10 ±10; ±20	50	—60...+125	Композиционные изолированные малогабаритные	—	D=1,8 L=3,8	—
МЛМ	10 ² —2,2·10 ⁶	±5; ±10; ±20	—	—	Металлопленочные лакированные миниатюрные	—	D=2 L=5,8	—
МПР-3	10 ² —0,1·10 ⁶	±(1...20)	50	—60...+125	Проволочные из микропровода в стеклянной изоляции	—	D=1 L=2,2	—
С2-12	10—5,1·10 ³	±5; ±10; ±20	125	—60...+125	Станчатые ниточные	V	D=0,35 L=3—6	Рис. 3.16, а
С3-2	10—1·10 ⁶	±5; ±10; ±20	50	—	Композиционные таблеточные	VI	D=1,7—2,7 H=1,5	Рис. 3.16, б
С3-3	10 ² —3,3·10 ³	±5; ±10; ±20	125	—60...+125	Композиционные ниточные	V	D=0,35 L=3—6	Рис. 3.16, а
С5-15	10 ² —10 ⁵	±0,05; ±0,5	50	—60...+125	Проволочные для микросхем	—	3×2,4×1,5	—
СТ3-28	1,5·10 ² —3,3·10 ³	±20	10—20	—	Терморезисторы таблеточные	VI	D=1,7 H=1,5	Рис. 3.16, б
СТ3-32	2,2·10 ⁴	—	15	—	Терморезисторы бусиновые	I	D=0,55	Рис. 3.16, в

Табл. 3.8. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных конденсаторов

Тип конденсатора	Номинальная емкость, пФ	Рабочее напряжение, В	Допускаемое отклонение емкости от номинала, %	Интервал рабочих температур, °С	Краткая характеристика	Вариант установки в микросхеме	Основные размеры А×В (В ₁)×С(С ₁), мм	Габаритный чертеж
1	2	3	4	5	6	7	8	9
К10-9	2,2—3300						2 × 2 × 0,6 (1,2)	Рис. 3.17, а (рис. 3.17, б)
	11—4700						2 × 4 × 0,6 (1,2)	
	30—10000						4 × 4 × 0,6 (1,2)	
	10—10000					Керами- III, IV ческий	2,5 × 5,5 × 0,6 (1,2)	
	56—22000	15	±5; ±10;	—60...+80			6 × 5,5 × 0,6 (1,2)	
	11—10000		±20;				2 × 2 × 1 (1,5)	
	30—15000		±50...—20				2 × 4 × 1 (1,5)	
	68—33000						4 × 4 × 1 (1,5)	
	56—33000						2,5 × 5,5 × 1 (1,5)	
	130—68000						6 × 5,5 × 1 (1,5)	
	27—15000						2 × 2 × 1,4 (2)	
	68—22000						2 × 4 × 1,4 (2)	
	110—47000						4 × 4 × 1,4 (2)	
	130—47000						2,5 × 5,5 × 1,4 (2)	
220—100000						6 × 5,5 × 1,4 (2)		
110—47000						2 × 4 × 2,5 (3)		
160—100000						5 × 4 × 2,5 (3)		
220—100000						2,5 × 5,5 × 2,5 (3)		
360—22000						6 × 5,5 × 2,5 (3)		
910—47000						8 × 8 × 2,5 (3)		
К10-9М	2,2—4700	16	—	—60...+125	Керами- III, IV ческий	2 × 1,2 × 1,2	5,5 × 2,5 × 2,5	Рис. 3.17, в
К10-17в	150—100000						1,5 × 1,2 (1,4) × 1 (1,2)	Рис. 3.17, г
	22—100		±5; ±10;	—60...+80	Керами- III, IV ческий		2 × 1,7 (1,9) × 1 (1,2)	
	75—200		±20;				4 × 2,7 (3) × 1 (1,2)	
	160—910							

Окончание табл. 3.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
К10-7А	560—1200	25					5,5 × 2,7 (3) × 1 (1,2)	Рис. 3.17, д
	1000—2400						5,5 × 4,3 (4,6) × 1 (1,2)	
	560—1500						4 × 2,7 (3) × 1,8 (2)	
	1000—2000						5,5 × 2,7 (3) × 1,8 (2)	
	2000—3900						5,5 × 4,3 (4,6) × 1,8 (2)	
К10-7В	6,8—3300	100—250	±10; ±20	—25...+70	Керами- III, IV ческий	—	4 × 4 × 3	Рис. 3.17, е
	15—4700	25					4 × 4 × 3,5	
	22—10000						6 × 6 × 3,5	
К53-15	10 ⁰ —33·10 ⁶	3—30	±20; ±30	—10...+75	Оксид-но-полупроводниковый	I	2,5; 5; 10 × 4; 8 × 1,6; 2	Рис. 3.17, ж
К53-16	10 ¹ —10 ⁷	1,6—30	±20; +50	—10...+75		—	1,7; 2,1 × 3,2...4,8 × ×1; 1,4	—

Табл. 3.9. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные бескорпусных диодных матриц

Тип диодной матрицы	Прямое напряжение при I _{пр} =1 мА, В	Прямое напряжение при I _{пр} =0,01 мА, В	Обратный ток, мкА	Емкость диода, пФ	Время восстановления, нс	Максимальное обратное напряжение, В	Максимальный прямой ток, мА	Интервал рабочих температур, °С	Количество диодов	Вариант установки в микросхеме	Габаритный чертеж
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КД 901 А Б В Г	0,7	0,4	0,2	4	20	10	5	—60...+85	1	1	Рис. 3.16, а
									2		
									3		
									4		
КД 902 А Б В	0,8	0,5	0,2	2	10	5	5	—60...+85	1	1	Рис. 3.16, б
									2		
									3		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Г	0,85	0,55						4		
	Д								1		
	Е								2		
	Ж								3		
	И								4		
КД904	А	0,8	0,45	0,2	2	10	10	5	-60...+85		
	Б									1	Рис. 3.16, в
	В									3	
	Г									4	
КД 907	А	I (при $I_{пр} = 50\text{мА}$)	—	6	4	4	40	50	-60...+85		
	Б									1	Рис. 3.16, г
	В									2	
	Г									3	
КД 910	А	0,8	0,5	0,5	1,5	5	5	10	-60...+85		
	Б									1	—
	В									2	
	Г									3	
КД 911	А	0,85	0,62	0,5	—	30	5	10	-40...+85	1,2,3	Рис. 3.16, д
	Б		0,55			80				1,2,3	
КД 912	А	0,8	0,5		1,8	5			-60...+85		—
	Б	0,85	0,62	0,2	—	30	5	3,5		3	
	В	0,85	0,55		—	80				1	
КД 913	А	0,7	0,4	0,2	4	10	10	5	-60...+85	3	Рис. 3.16, е
КД 918	А	I (при $I_{пр} = 50\text{ мА}$)	—	6	6	4	40	50	-60...+85	1	Рис. 3.16, ж
	Б									2	
	В									3	
	Г									4	

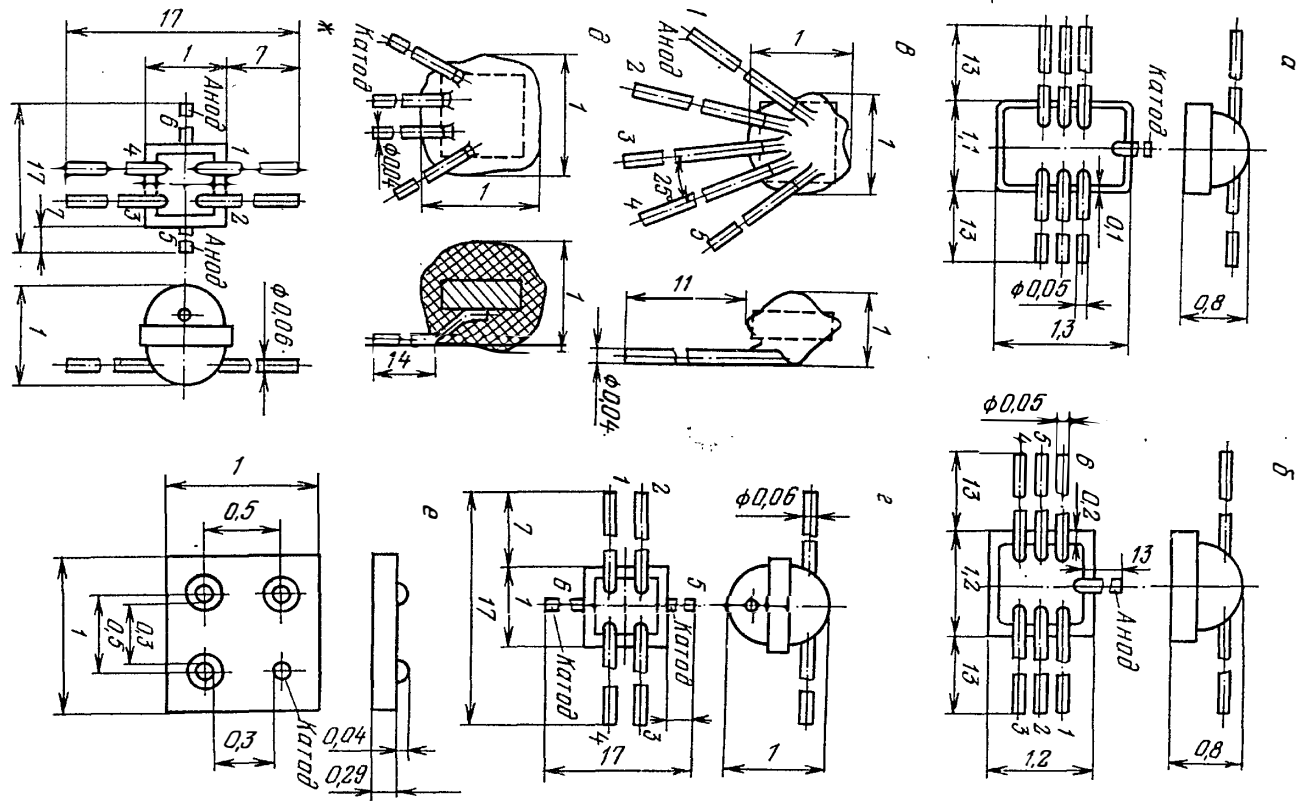


Рис. 3.18. Габаритные чертежи бескорпусных диодных матриц типов:
 а — КД901А-Г; б — КД902А-И; в — КД903А-Е; г — КД907А-Г; д — КД911А, В; е — КД913А;
 ж — КД918А-Г.

Табл. 3.10. Основные электрические параметры, конструктивные харак-

Тип диода	Прямое напряжение при $I_{пр}=50$ мА, В	Обратный ток, мкА	Максимальное обратное напряжение, В	Максимальный прямой ток, А
КД102 А	1	0,1	250	
Б	1	1	300	100
КД103 А	1	1		
Б	1,2		50	100
КД104 А	1	3		
АД110 А	1,5 (при $I_{пр}=$ (= 10 мА))	5	300 30	10 10

конденсаторов номиналом $2 \times 0,015 - 5 \times 0,047$ мкФ такие матрицы имеют габаритные размеры $2,4 \times 4,2 \times 0,8 - 8,5 \times 7 \times 1,2$ мм.

Из электролитических конденсаторов в гибридных микросхемах чаще всего используются конденсаторы типов К53-15, К53-16. Они применяются в основном в фильтрах питания, цепях развязки и блокировки.

Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные некоторых типов миниатюрных конденсаторов приведены в табл. 3.8, а их габаритные чертежи показаны на рис. 3.17.

В табл. 3.8 в скобках указаны основные размеры этого же типа конденсатора, но для случая, когда он имеет облуженные электроды. Аналогичным образом даны и ссылки на габаритные чертежи конденсаторов. Например, миниатюрные керамические конденсаторы типа К10-9 с номинальной емкостью 11—4700 пФ выпускаются размером $2 \times 4 \times 0,6$ мм. В случае, если такие конденсаторы имеют облуженные электроды, то они имеют размеры $2 \times 4 \times 1,2$ мм, а их габаритный чертеж представлен на рис. 3.17, б. Для конденсаторов типа К10-17в, например, емкостью 75—200 пФ габаритные размеры составляют соответственно для нелуженых $2 \times 1,7 \times 1$ мм, для луженых $2 \times 1,9 \times 1,2$ мм. Габаритный чертеж луженых конденсаторов типа К10-17в представлен на рис. 3.17, г.

Миниатюрные корпусные и бескорпусные диоды и диодные матрицы. В гибридных ИМС наряду с миниатюрными пассивными компонентами (резисторами и конденсаторами) широко используются миниатюрные и бескорпусные активные компоненты. В качестве диодных структур в последнее время преимущественное применение находят бескорпусные диодные матрицы. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные выпускаемых промышленностью бескорпусных диодных матриц приведены в табл. 3.9. Габаритные чертежи некоторых типов диодных матриц показаны на рис. 3.18.

Конструктивно бескорпусные диодные матрицы выполняются с общим катодом или общим анодом. На каждом габаритном чертеже указано, какой вывод или группа выводов являются общими для данного типа диодной матрицы.

Кроме диодных матриц, в конструкциях гибридных ИМС используются миниатюрные и бескорпусные диоды. В качестве выпрямительных и импульсных диодов применяются кремниевые сплавные и диффузионные, а также арсенидогаллневые меза-диффузионные структуры. Часть из них выпускается в бескорпусном варианте, остальные — в миниатюрных пластмассовых или металлоглазанных корпусах. Например, кремниевые сплавные диоды типов КД103 А, Б герметизируются специальными за-

теристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных диодов

Интервал рабочих температур, °С	Вариант установки в микросхеме	Краткая характеристика	Габаритный чертеж
-50...+100	I	Выпрямительный	Рис. 3.19, а
-55...+100	I	Выпрямительный	Рис. 3.19, а
-60...+70	I	Выпрямительный	Рис. 3.19, б
-60...+100	—	Импульсный	Рис. 3.19, в

щитными покрытиями. Этот тип диодов применяют в схемах в качестве ключевых элементов с малой длительностью импульсов. Электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные некоторых типов миниатюрных диодов приведены в табл. 3.10.

В гибридных ИМС, предназначенных для усиления и генерации электрических сигналов, в качестве навесных компонентов используются миниатюрные туннельные и обращенные диоды. В зависимости от полупроводникового материала, на базе которого выполнен прибор, туннельные и обращенные диоды подразделяются на германиевые и арсенидогаллневые. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных туннельных и обращенных диодов приведены в табл. 3.11.

В оптоэлектронных гибридных ИМС в последнее время широко используются миниатюрные и бескорпусные светодиоды. Промышленностью выпускаются арсенидогаллневые эпитаксиальные бескорпусные светодиоды типа АЛ109 А и фосфидогаллневые эпитаксиальные бескорпусные светодиоды типов АЛ301 А, Б. В ряде случаев в качестве источников инфракрасного излучения с длиной волны 0,95 мкм в микросхемах находят применение светодиоды типов АЛ103 А, Б. Основные световые и электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных и бескорпусных светодиодов приведены в табл. 3.12.

Габаритные чертежи рассмотренных в настоящем параграфе миниатюрных и бескорпусных диодов показаны на рис. 3.19.

Миниатюрные корпусные и бескорпусные транзисторы и транзисторные матрицы. Электрические параметры и конструктивные характеристики некоторых типов миниатюрных и бескорпусных транзисторов и транзисторных матриц, применяемых в гибридных ИМС, приведены в табл. 3.13, а габаритные чертежи показаны на рис. 3.20 и рис. 3.21, а — в. В табл. 3.13 приняты следующие условные обозначения: f_T — предельная частота передачи тока в схеме с общим эмиттером; $U_{к.б. \max}$ — максимально допустимое напряжение коллектор — база; $I_{к. \max}$ — максимально допустимый ток коллектора; S_k — емкость коллекторного перехода; $h_{21э}$ — коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером; $P_{к. \max}$ — мощность, рассеиваемая транзистором. Цоколевка транзисторов показана на габаритных чертежах. Транзисторы типов КТ119 А, Б являются однопереходными.

Бескорпусные транзисторные матрицы аналогично диодным состоят из нескольких элементов. Например, матрица типа К1НТ291 состоит из двух транзисторов и используется преимущественно при создании высо-

Рис. 3.19. Габаритные чертежи миниатюрных и бескорпусных диодов типов:
 а — КД102А, В, КД103А, Б; б — КД104А; в — АД104А; г — АИ101А—В, Д, Е, И, АИ301А—Г;
 д — АИ201В, Г, Е, Ж, И—Л, АИ402Б, Г, Е, И; е — ГИ302А, Б, ГИ303А, Б, ГИ307А, ГИ403А;
 ж — ГИ103А—Г; з — АД103А, Б; и — АД103А; к — АД301А, Б.

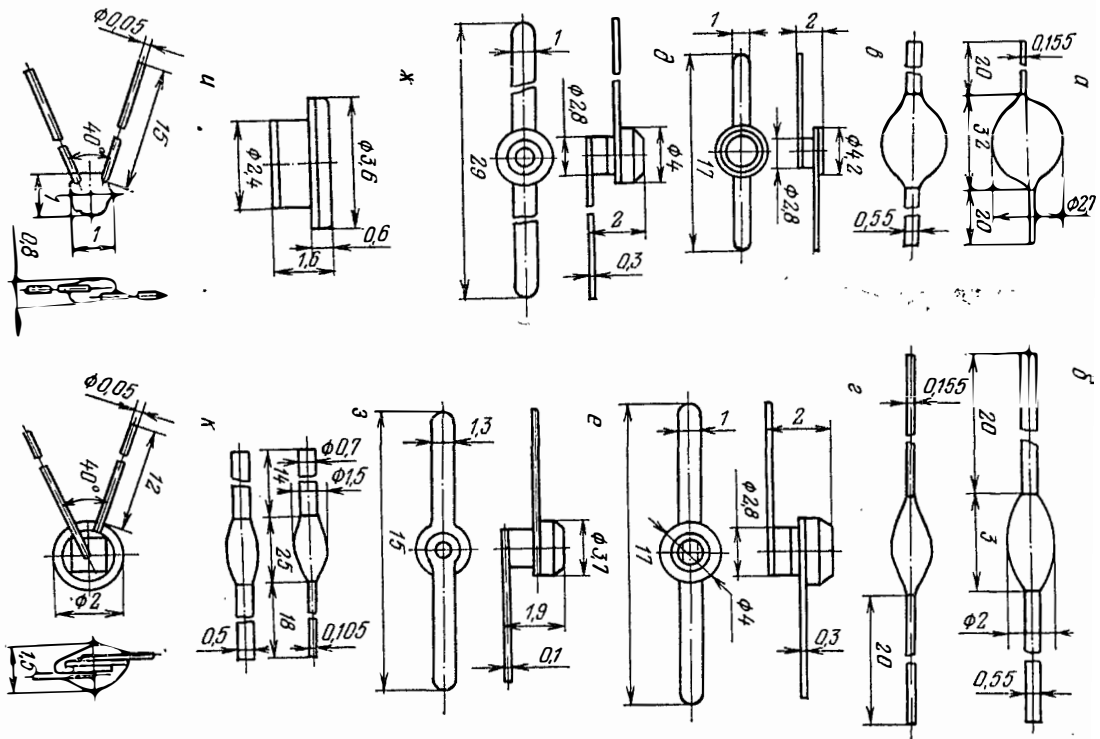


Табл. 3.11. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных туннельных обращенных диодов

Тип диода	Ток пика, мА	Отношение тока пика к току впадины	Напряжение пика, В	Прямое напряжение при $I_{пр}=0.1$ мА, В	Обратное напряжение, В	Емкость диода, пФ	Интервал рабочих температур, °С	Габаритный чертеж
1	2	3	4	5	6	7	8	9
АИ101 А	1±0,25	5	0,16			4		
Б	1±0,25	5	0,16			2—8		
В	2±0,3	6	0,16	0,5—0,6	—	5	—60...+85	Рис. 3.19, з
Д	2±0,3	6	0,16			3,5—10		
Е	5±0,5	6	0,18			8		
И	5±0,5	6	0,18			4,5—13		
АИ201 В	10±1		0,18			5—15		
Г	20±2		0,20			10		
Е	20±2	10	0,20	0,5—0,6	—	6—20	—60...+85	Рис. 3.19, д
Ж	50±5		0,26			15		
И	50±5		0,26			10—30		
К	100±10		0,33			20		
Л	100±10		0,33			10—15		
АИ301 А	1,6—2,4							
Б	4,5—5,5							
В	4,5—5,5	8	0,18	—	—	—	—60...+70	Рис. 3.19, з
Г	9—10							
АИ402 Б	0,1							
Г	0,1							
Е	0,2	—	—	0,6	0,25	0,4 8,0	—60...+85	Рис. 3.19, д
И	0,4					10,0		
ГИ103 А	1,3—1,7					1—2,1		
Б	1,3—1,7					0,8—1,6		
В	1,3—1,7	4	0,09	0,4	0,02	0,7—1,3	—60...+70	Рис. 3.19, ж
Г	1,3—2,1					1—3,2		
АИ302 А	1,7—2,3					80		
Б	4,3—5,8					150		
В	8,5—11,5	4,5	0,6	—	—	180	—60...+70	—

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Г	13-17					120		
ГИ304 А	4,5-5,1	5	0,075	—	—	20	-60...+70	Рис. 3.19, е
Б	4,9-5,5							
ГИ305 А	9,1-10	5	0,085	—	—	30	-60...+70	Рис. 3.19, е
Б	9,8-11							
ГИ307 А	1,8-2,2	7	0,07-0,09	—	—	20	-40...+60	Рис. 3.19, е
ГИ403 А	0 1	—	—	0,35	0,12	8	-40...+60	Рис. 3.19, е

Табл. 3.12. Основные электрические и световые параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных и бескорпусных светодиодов

Тип диода	Прямое напряжение при $I_{пр} = 50$ мА, В	Постоянный прямой ток, мА	Полная мощность излучения при $I_{пр} = 50$ мА, мВт	Цвет свечения	Интервал рабочих температур, °С	Вариант упаковки в микросхеме	Габаритный чертеж
АЛ103 А	1,6	52	1	—	-40...+85	I	Рис. 3.19, з
Б			0,6				
АЛ109 А	1,2	22	0,2 (при $I_{пр} = 20$ мА)	—	-60...+85	I	Рис. 3.19, и
	(при $I_{пр} = 20$ мА)						
АЛ301 А	3	11	—	Красный	-60...+70	I	Рис. 3.19, к
Б	3,8						
	(при $I_{пр} = 10$ мА)						

костабильных балансных схем, в которых требуется идентичность параметров и температурных зависимостей транзисторов. Бескорпусный интегральный прерыватель типа К7КТ431 состоит также из двух транзисторов, имеющих общий коллектор. Подобный прерыватель применяется чаще всего в устройствах коммутации. В пределах данного типа прерыватели отличаются напряжением питания. Так, для прерывателей К7КТ431 А, Б напряжение питания $\pm 6,3$ В, а для К7КТ431 В, Г — ± 3 В. Матрицы типов К7НТ761, К7НТ762 и К7НТ763 различаются только количеством входящих в каждую матрицу транзисторов.

В бескорпусном исполнении выпускаются и полевые транзисторы. В настоящее время в микросхемах используют кремниевые планарные полевые транзисторы типов КП201 Е, Ж, И — Л. Их габаритный чертеж представлен на рис. 3.20, с, а основные электрические параметры и предельные эксплуатационные данные приведены табл. 3.14. Указанные транзисторы имеют структуру с $p-n$ -переходом и каналом p -типа. Напряжение на стоке транзистора отрицательное относительно истока, а на затворе — положительное. Транзисторы данного типа рекомендуется использовать при температуре окружающей среды $-40...+85$ °С. В микросхемах подобные транзисторы устанавливают по варианту 1.

Кроме указанных типов полевых транзисторов, в настоящее время промышленностью выпускаются бескорпусные спаренные полевые транзисторы типа КПС202. Эти структуры включают по два бескорпусных транзистора, установленных на общей подложке размером 1×2 мм. Отличаются структуры тем, что в пару подбираются транзисторы с идентичными электрическими параметрами.

Бескорпусные полупроводниковые интегральные микросхемы. Конструктивно бескорпусные ИМС представляют собой защищенный от воздействия окружающей среды специальными защитными покрытиями (лаками, эмальями, компаундами и др.) полупроводниковый кристалл, в объеме и на поверхности которого размещаются элементы и межэлементные соединения. В виде такого кристалла изготовлена микросхема типа К1ЛБ111. В функциональном отношении данная микросхема соответ-

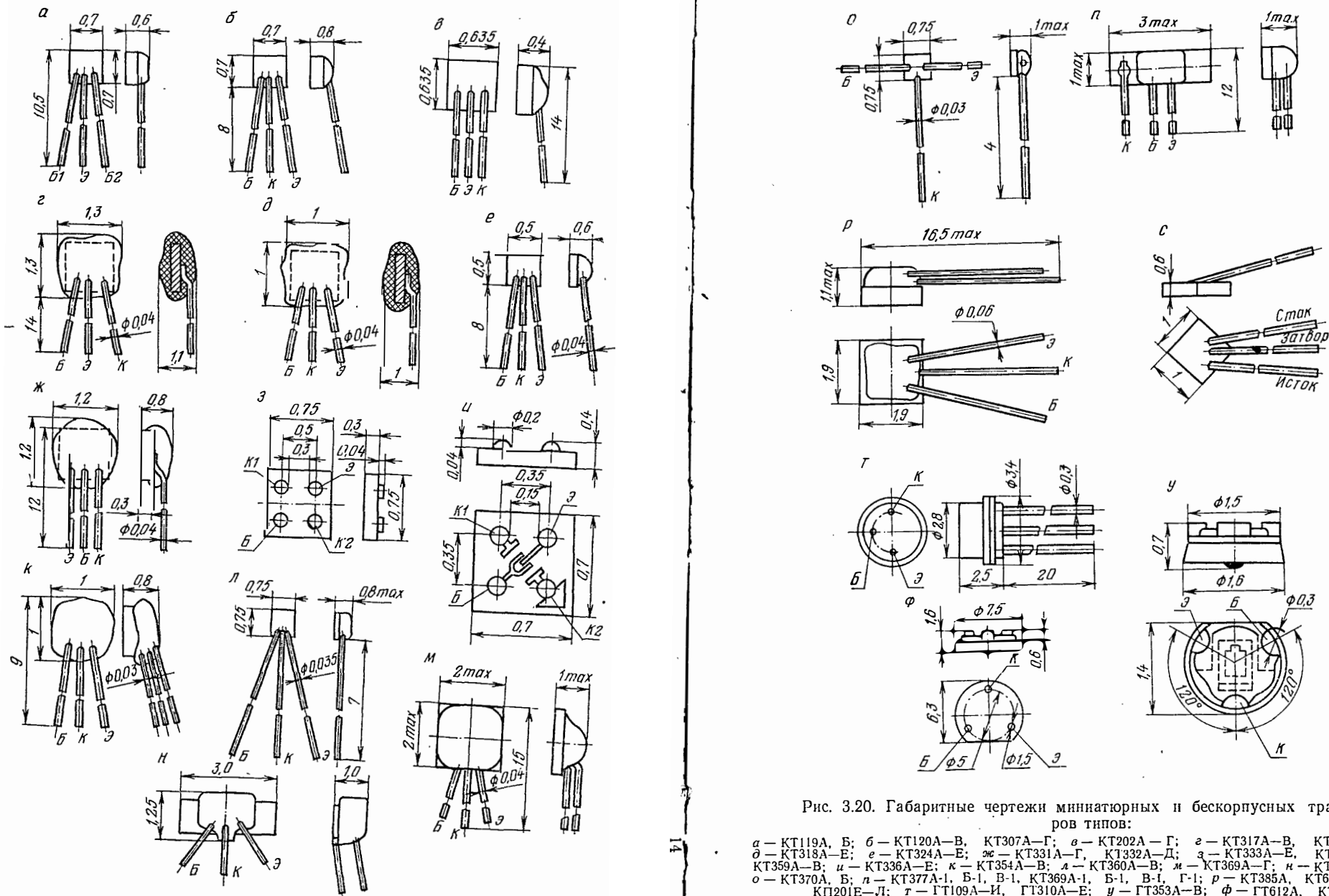


Рис. 3.20. Габаритные чертежи миниатюрных и бескорпусных транзисторов типов:

а - КТ119А, Б; б - КТ120А-В, КТ307А-Г; в - КТ202А - Г; г - КТ317А-В, КТ319А-В;
 д - КТ318А-Е; е - КТ324А-Е; ж - КТ331А-Г, КТ332А-Д; з - КТ333А-Е, КТ348А-В,
 КТ359А-В; и - КТ336А-Е; к - КТ354А-В; л - КТ360А-В; м - КТ369А-Г; н - КТ364А-В;
 о - КТ370А, Б; п - КТ377А-1, Б-1, В-1, КТ369А-1, Б-1, В-1, Г-1; р - КТ385А, КТ625А; с -
 КП201Е-Л; т - ГТ109А-И, ГТ310А-Е; у - ГТ353А-В; ф - ГТ612А, КТ607А.

ствует двухвходовому логическому элементу ИЛИ-НЕ. Габаритный чертеж микросхемы К1ЛБ111 представлен на рис. 3.21, г. Эта микросхема характеризуется следующими параметрами: выходное напряжение логического «0» — 0,15 В; входной ток 8—15 мкА; выходной ток 75—107 мкА; время задержки сигнала 100 мкс.

Из бескорпусных микросхем наиболее широко используются операционные усилители. Основные параметры некоторых типов бескорпусных

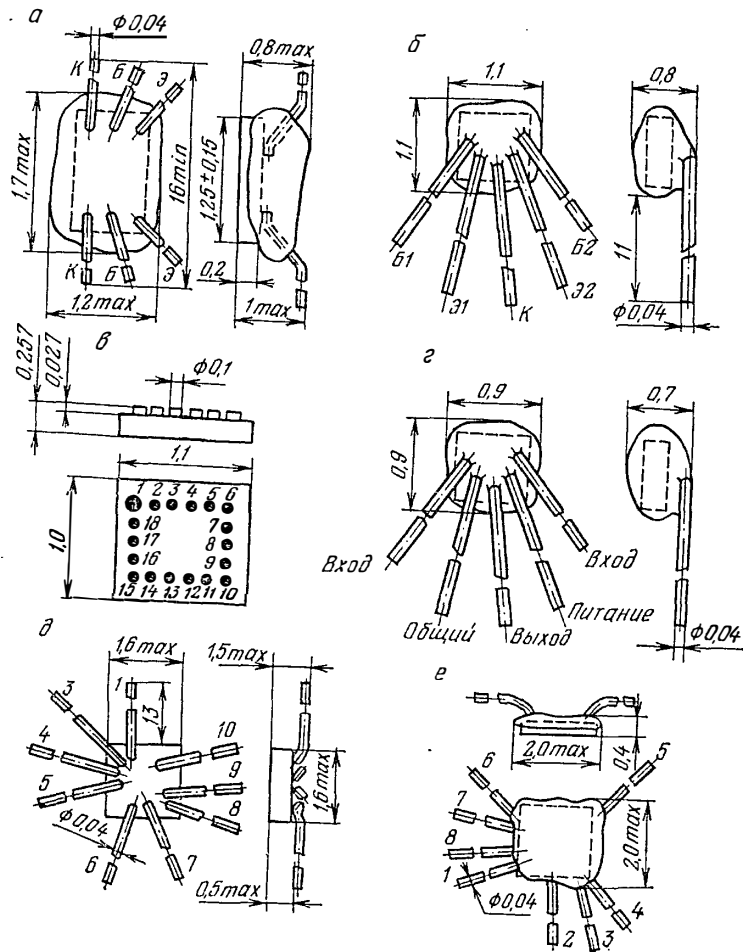


Рис. 3.21. Габаритные чертежи бескорпусных транзисторных матриц и интегральных микросхем типов:

а — К1НТ291А-И; б — К7КТ431А-Г; в — К7НТ761, К7НТ762, К7НТ763; г — К1ЛБ111А, Б; д — К740УД3; е — К740УД5-1.

операционных усилителей приведены в табл. 3.15, а их габаритные чертежи показаны на рис. 3.21, д, е.

Кроме перечисленных типов навесных компонентов, в конструкциях гибридных ИМС используются также миниатюрные индуктивности, дроссели, трансформаторы и др.

Табл. 3.13. Основные электрические параметры, конструктивные характеристики и предельные эксплуатационные данные миниатюрных и бескорпусных транзисторов и транзисторных матриц

Тип транзистора или матрица	Структура	t _т , МГц	U _{к.б} max, В	I _к max, мА	C _к , пФ	h _{21э}	P _к max, мВт	Интервал рабочих температур, °С	Вариант ус-тановки в микросхеме	Габаритный чертеж
КТ119 А, Б	n-p-n	—	60	10	50	—	60	-45...+85	I	Рис. 3.20, а
	p-n-p	I	30	10	25	20—200	10	-10...+55	I	
КТ202 А	p-n-p	5	15	10	25	15—70	15	-60...+85	I	Рис. 3.20, в
		В	15	10	25	40—160	15	-60...+85	I	
		Г	30	10	25	15—70	15	-60...+85	I	
		Д	30	10	25	40—160	15	-60...+85	I	
КТ307 А	n-p-n	250	10	20	6	20	15	-60...+85	I	Рис. 3.20, б
		Б	10	20	6	40	15	-60...+85	I	
		В	10	20	6	40	15	-60...+85	I	
		Г	10	20	6	40	15	-60...+85	I	
КТ317 А	n-p-n	100	5	15	11	25—75	15	—	I	Рис. 3.20, г
		Б	5	15	11	35—120	15	—	I	
		В	5	15	11	80—250	15	—	I	
		Г	5	15	11	30...90	15	—	I	
КТ318 А	n-p-n	430	10	20	3,5	50—150	15	—	I	Рис. 3.20, д
		Б	10	20	3,5	70—280	15	—	I	
		В	10	20	3,5	30—90	15	—	I	
		Г	10	20	3,5	50—150	15	—	I	
КТ319 А	n-p-n	100	5	15	15	70—280	15	-60...+80	I	Рис. 3.20, г
		Б	5	15	15	15	-60...+80	I		
		В	5	15	15	25	-60...+80	I		
		Г	5	15	15	40	-60...+80	I		
КТ324 А	n-p-n	800	10	20	2,5	20—60	15	-55...+85	I	Рис. 3.20, е
		Б	10	20	2,5	40—120	15	-55...+85	I	
		Г	10	20	2,5	80—250	15	-55...+85	I	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
КТ331	Д		600			20-80				
	Е					60-250				
	А	$n-p-n$	250	15	20	5	20-60	15	-60...+125	I Рис. 3.20, ж
КТ332	Б		250			40-120				
	В		250			80-220				
	Г		400			40-120				
КТ333	А	$n-p-n$	250	15	20	5	20-60	15	-60...+125	I Рис. 3.20, ж
	Б		250			40-120				
	В		250			80-220				
КТ336	Г		500			40-120				
	Д		500			80-220				
	А	$n-p-n$	450	10	20	3,5	30-90	15	—	II Рис. 3.20, з
КТ338	Б		450			3,5	50-150			
	В		450			3,5	70-280			
	Г		350			3,5	30-90			
КТ339	Д		350			4,5	50-150			
	Е		350			4,5	70-280			
	А	$n-p-n$	250	10	20	5	20-60	50	—	II Рис. 3.20, и
КТ348	Б		250			40-120				
	В		250			80				
	Г		450			20-60				
КТ348	Д		450			40-120				
	Е		450			80				
	А	$n-p-n$	100	5	15	11	25-75	15	—	II Рис. 3.20, з
КТ354	Б					35-120				
	В					80-250				
	Г					25-75				
КТ354	Д					35-120				
	Е					80-250				
	А	$n-p-n$	1000	10	20	1,5	40-140	30	—	I Рис. 3.20, к
КТ359	Б		1300			80-240				
	В		1000			120-400				
	А	$n-p-n$	300	15	20	5	30-90	15	—	II Рис. 3.20, з
	Б					50-150				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
КТ360	В					70-280				
	А	$p-n-p$	300	25	20	5	20-70	10	-40...+55	I Рис. 3.20, л
	Б		400	20			40-120			
КТ364	В		400	20			80-240			
	А	$p-n-p$	250	25	200	15	20-70		—	I Рис. 3.20, н
	Б						40-120	30		
КТ369	В					80-240				
	А, (А-1)	$n-p-n$	200	45	250	15	20-100	50 (1600)	-60...+85	I Рис. 3.20, м
	Б, (Б-1)						40-200			(Рис. 3.20, п)
КТ370	В, (В-1)					20-10				
	Г, (Г-1)					40-200				
	А	$p-n-p$	1000	15	15	2	20-70	15	-40...+55	I Рис. 3.20, о
КТ377	Б		1200				40-120			
	А-1	$n-p-n$	—	30	300	—	20-80	50 (500)	-60...+125	I Рис. 3.20, п
	Б-1						50-120			
КТ385	В-1					80-220				
	А	$n-p-n$	—	60	300	—	20-200	300	-45...+85	I Рис. 3.20, е, р
	А	$n-p-n$	—	60	1000	—	20-200	1000	-45...+85	I Рис. 3.20, р
КТ607	А	$n-p-n$	700	40	150	4	—	1000	-55...+100	II Рис. 3.20, ф
	ГТ612	$n-p-n$	1500	12	120	3,5	5-6,3	360	-55...+70	II Рис. 3.20, ф
	ГТ353	$n-p-n$	>100	10	20	2,5	15-400	30	-60...+70	II Рис. 3.20, у
ГТ109	Б					15-400				
	В					15-400				
	А	$p-n-p$	1	10	20	30	20-50	30	-30...+55	— Рис. 3.20, т
ГТ310	Б		1			30	35-80			
	В		1			30	60-130			
	Г		1			30	110-250			
ГТ310	Д		3			40	20-70			
	Е		5			40	50-100			
	И		1			30	20-80			
ГТ310	А	$p-n-p$	160	12	10	4	20-70	20	-40...+55	— Рис. 3.20, т
	Б		160			4	60-180			
	В		120			5	20-70			
	Г		120			5	60-180			

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Д			80		5	5	20—70				
Е			80		5	5	60—180				
К1НТ291 А		n-p-n		15	10	4	20—80		-60...+85	I	Рис. 3.21, а
Б						4	60—180				
В							—				
Г							20—80				
Д							60—180				
Е							—				
Ж							40—160				
И							40—160				
К7КТ431А—Г		n-p-n						60		I	Рис. 3.21, б
К7НТ761		n-p-n		15	15		40—20	90		II	Рис. 3.21, в
К7НТ762											
К7НТ763											

Табл. 3.14. Основные электрические параметры и предельные эксплуатационные данные бескорпусных полевых транзисторов типов КП201 Е, Ж, И — Л

Параметр	КП201 Е	КП201 Ж	КП201 И	КП201 К	КП201 Л
Максимальный ток стока при $U_{с.и} = 10 В$, $U_{з.и} = 0$, мА	0,3...0,65	0,55...1,2	1...2,1	1,7...3,8	3...6
Крутизна характеристики при $U_{с.и} = 10 В$, $U_{з.и} = 0$, мА/В	$\geq 0,4$	$\geq 0,7$	$\geq 0,8$	$\geq 1,4$	$\geq 1,8$
Ток затвора при $U_{з.и} = 5 В$, $U_{с.и} = 0$, мА	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Напряжение отсечки при $U_{с.и} = 10 В$, $I_c = 10 мкА$, В	$\leq 1,5$	$\leq 2,2$	$\leq 3,0$	≤ 4	≤ 6
Коэффициент шума при $U_{с.и} = 5 В$, $U_{з.и} = 0$, $f = 1 кГц$, дБ	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Емкость входная при $U_{с.и} = 10 В$, $U_{з.и} = 0$, $f = 40 кГц$, пФ	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Емкость проходная при $U_{с.и} = 10 В$, $U_{з.и} = 0$, $f = 40 кГц$, пФ	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 8
Максимально допустимое напряжение сток (исток) — затвор, В	15	15	15	15	15
Максимально допустимое напряжение сток — исток, В	10	10	10	10	10
Максимальная рассеиваемая мощность, мВт	60	60	60	60	60

Табл. 3.15. Основные электрические параметры и конструктивные характеристики бескорпусных операционных усилителей

Параметр	К740УД1 А	К740УД3	К740УД5-1
Коэффициент усиления	$(2-10) \cdot 10^4$	$(4-45) \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
Напряжение питания, В	—	$\pm 6,3$	± 15
Синфазное входное напряжение, В	8	3	12
Граничная частота, мГц	10	20	—
Рассеиваемая мощность, мВт	200	40	—
Вариант установки в микросхеме	1	1	1
Габаритный чертеж	—	Рис. 3.21, а	Рис. 3.21, в

3.4. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ

Общие положения. Исходными данными для разработки топологии гибридной ИМС являются следующие: принципиальная электрическая схема устройства и перечень элементов к ней; конструктивные требования и ограничения, связанные с проектированием и размещением элементов и компонентов на подложке; технологические ограничения, обусловленные процессом изготовления микросхемы; технические требо-

вания к электрическим параметрам пленочных элементов и к конструкции микросхемы в целом.

Процесс проектирования топологии гибридной ИМС можно разделить на четыре этапа: составление схемы соединений элементов на плате; расчет геометрических размеров пленочных элементов; выбор конфигурации и размещение пленочных элементов, а также навесных компонентов на подложке; оценка качества разработанной топологии.

Составление схемы соединений элементов. На данном этапе разработки топологии производится анализ принципиальной электрической схемы устройства; упрощается схема соединений элементов (уменьшается число пересечений проводников, сокращается их длина); определяется расположение навесных компонентов; выбирается оптимальное взаимное расположение навесных компонентов и пленочных элементов, удовлетворяющее конструктивным и электрическим требованиям; составляется схема соединений элементов, которая впоследствии реализуется методами пленочной технологии. Все перечисленные действия не должны нарушать функционального построения исходной электрической схемы устройства.

Расчет геометрических размеров пленочных элементов. Геометрические размеры пленочных элементов определяют по методикам, изложенным в § 3.2.

Выбор конфигурации и размещение пленочных элементов и навесных компонентов на подложке. Вначале определяют ориентировочную площадь подложки по формуле

$$S = k \left(\sum_{i=1}^n S_{Ri} + \sum_{i=1}^m S_{Ci} + \sum_{i=1}^s S_{Li} + \sum_{i=1}^l S_{Ai} + \sum_{i=1}^p S_{Ki} \right),$$

где k — коэффициент использования площади подложки (для ориентировочных расчетов $k = 2-3$); S_{Ri} , S_{Ci} , S_{Li} , S_{Ai} , S_{Ki} — соответственно площадь i -го резистора, конденсатора, катушки индуктивности, навесного компонента и контактной площадки; n , m , s , l , p — число соответственно резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, навесных компонентов и контактных площадок.

Затем по вычисленной ориентировочной площади подложки выбирают ее типоразмер из ряда рекомендуемых (рекомендуемые размеры подложек оговорены в § 3.1).

Впоследствии в зависимости от размеров подложки выбирается конфигурация пленочных элементов (методика выбора конфигурации пленочных элементов приведена в § 3.2).

В заключение данного этапа решается задача размещения на подложке всех пленочных элементов и навесных компонентов. Способы и последовательность решения этой задачи могут быть различными. Они во многом определяются опытом разработчика и носят индивидуальный характер. Для оптимального размещения элементов и компонентов на подложке используют ЭВМ (алгоритм Ли и его модификации, алгоритм Камерона и др.). Однако из-за отсутствия универсальных алгоритмов, с помощью которых можно было решать все задачи автоматизированного проектирования гибридных ИМС, ЭВМ применяют в основном при решении частных конструкторских задач, позволяющих оптимизировать конструкцию исходя из критерия, имеющего наибольшее значение для данного вида аппаратуры.

При размещении элементов и компонентов на подложке необходимо учитывать конструкторские требования и технологические ограничения. Основные требования и ограничения, касающиеся конструкции и техноло-

Табл. 3.16. Основные конструкторские требования и технологические ограничения

Содержание ограничения (требования)	Величина ограничения		
	M*	Ф*	C*
1	2	3	4
Минимально допустимый размер резистора, l мм	0,3	0,1	0,3
Точность воспроизведения линейных размеров пленочных элементов, мм		$\leq 0,01$	
Минимальное расстояние между пленочными элементами, расположенными в одном слое, мм	0,2	0,1	0,3
Минимальное расстояние между пленочными элементами, расположенными в разных слоях, мм	0,2	0,1	0,2
Минимальное расстояние от пленочных элементов до края платы, мм	0,5	0,2	0,5
Минимальная величина перекрытия для совмещения пленочных элементов, расположенных в разных слоях, мм	0,2	0,1	0,2
Максимальное отклонение сопротивления резистора от номинального значения, %		± 15	
Минимальная величина перекрытия диэлектриком нижней обкладки конденсатора, мм		0,1	
Минимальный выступ нижней обкладки конденсатора за край верхней, мм		0,2	
Минимальное расстояние от края диэлектрика до мест соединения выводов обкладок конденсатора с другими пленочными элементами, мм		0,3	
Минимальная площадь перекрытия обкладок конденсаторов, мм		$0,5 \times 0,5$	
Максимальное отклонение емкости конденсатора от номинального значения, %		± 12	
Минимальная ширина пленочных проводников, мм	0,1	0,05	0,1
Размеры контактных площадок для монтажа навесных компонентов с шариковыми или столбиковыми выводами, мм		$0,2 \times 0,2$	
Минимальное расстояние между контактными площадками для припайки и приварки проволочных выводов, мм		0,2	
Минимальные размеры контактных площадок, мм:			
для приварки проволочных выводов		$0,2 \times 0,25$	
для припайки проволочных выводов		$0,4 \times 0,4$	
для контроля пленочных элементов		$0,2 \times 0,2$	
Минимальное расстояние от проволочного проводника или вывода до края пленочного элемента, не защищенного изоляцией, мм		0,2	
Максимальная длина гибкого проволочного проводника без дополнительного крепления, мм		3	
Минимальное расстояние (мм) от края навесного компонента до:			
края платы		0,4	
края другого компонента		0,3	
проволочного проводника		0,3	
края пассивного компонента		0,6	
края контактной площадки, предназначенной для приварки проволочных выводов		0,4	

1	2	3	4
---	---	---	---

Минимальные размеры периферийных кон-
тактных площадок (мм) при шаге их располо-
жения:

0,625 мм	0,4×0,4
0,25 мм	1×0,4
2,5 мм	1×0,4

* М — масочный метод изготовления пленочных элементов; Ф — метод фото-
литографии; С — совмещение масочного и фотолитографического методов.

При изготовлении тонкопленочных гибридных ИМС, приведены в
табл. 3.16.

Оценка качества разработанной топологии. Так как разработанная топо-
логия должна обеспечивать нормальное функционирование микросхемы
при выбранном ее конструктивном исполнении и заданных условиях экс-
плуатации, то принятое при разработке топологии решение в первую оче-
редь должно соответствовать электрической принципиальной схеме
(проверяется методом синтеза электрической схемы по топологии, т. е. пу-
тем перехода от послонных чертежей топологии микросхемы к принци-
пальной электрической схеме устройства), удовлетворять конструкторским
и технологическим требованиям, а также выбранным методам контроля,
отличаться простотой реализации. С этой целью выполняют расчеты,
связанные с определением паразитных связей в микросхеме, с оцен-
кой ее тепловых режимов (методика этих расчетов изложена в § 3.5).
Если разработанная топология не удовлетворяет предъявляемым
требованиям к качеству, то в нее вносят соответствующие коррек-
тивы.

3.5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИИ

Расчет паразитных связей

Емкость между двумя произвольно расположенными на подложке
пленочными проводящими элементами определяют по формуле

$$C = 0,0885 \varepsilon' l \text{ [пФ]},$$

где ε' — расчетная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon' = \varepsilon_2$ при
 $\varepsilon_2 \gg \varepsilon_1$, $\varepsilon' = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ при $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_1$); ε_1 , ε_2 — диэлектрические прони-
цаемости соответственно окружающей среды и материала подложки;
 c — емкостный коэффициент, зависящий от взаимного расположения
пленочных проводящих элементов в микросхеме (формулы для рас-
чета емкостного коэффициента приведены в табл. 3.17); l — длина
пленочных проводников, см.

В табл. 3.17 емкостный коэффициент c выражается через основной K
и дополнительный K' полные эллиптические интегралы, модули которых
обозначены соответственно k и k' .

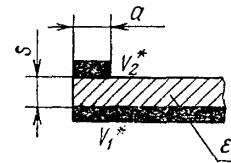
Частичные емкости между проводниками, параллельно расположенны-
ми на подложке и находящимися в окружении других проводников, вы-
числяются по следующей формуле:

$$C_{ij} = 0,0885 \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} l c_{ij} \text{ [пФ]},$$

где i, j — номера проводников; l — длина проводников, см; c_{ij} — емкост-
ный коэффициент i -го и j -го проводников.

Табл. 3.17. Основные соотношения для расчета емкостных коэффициентов

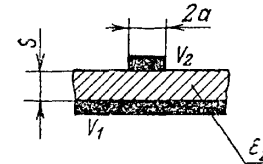
Расположение проводящих пленочных элементов и элементов конструкций в гибридной ИМС	Формулы для расчета емкостного коэффициента c при	
	$\varepsilon' = \varepsilon_2 \gg \varepsilon_1$	$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$
1	2	3



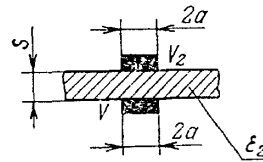
$$c_1 = \frac{K}{K'}$$

$$k = \operatorname{th} \frac{\pi a}{2S}$$

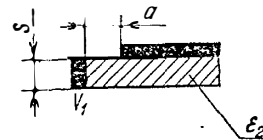
$$k' = \sqrt{1 - k^2}$$



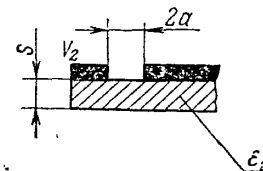
$$c_2 = c_1$$



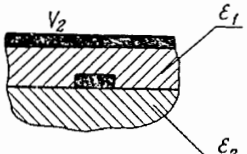
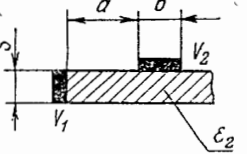
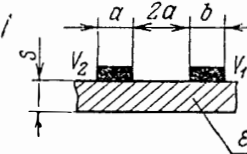
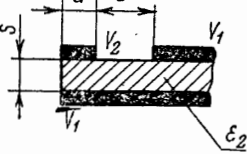
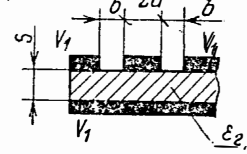
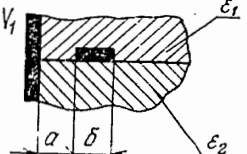
$$c_3 = c_1$$



$$c_4 = \frac{1}{c_1}$$



$$c_5 = \frac{1}{2} c_4$$

1	2	4
	—	$c_6 = (1,3 - 1,4) c_2$
	$c_7 = \frac{K'}{K}$ $k = \frac{\text{th} \frac{\pi a}{2S}}{\text{th} \frac{\pi (a+b)}{2S}}$ $k' = \sqrt{1 - k^2}$	
	$c_8 = \frac{1}{2} c_7$	$c_8 = \frac{K'}{K}$ $k = \frac{a}{a+b}$ $k' = \sqrt{1 - k^2}$
	$c_9 = \frac{1}{\epsilon_7}$	$c_9 = 2 \frac{K'}{K}$ $k = \sqrt{\frac{b}{a+b}}$ $k' = 1 - k^2$
	$c_{10} = 2c_9$	$c_{10} = 2c_9$
	—	$c_{11} = 2c_8$

* V_1 и V_2 — потенциалы проводящих пленочных элементов, между которыми рассчитывается емкость.

Табл. 3.18. Основные соотношения для расчета емкостных коэффициентов в системах параллельных проводников, расположенных на подложке

Формулы для расчета емкостного коэффициента c_{ij}	Вариант расположения проводников
$c_{12} = 1,56 + 0,41 \lg \frac{b_1 b_2}{a_1^2}$	Рис. 3.22, а
$c_{12} = 1,18 + 0,31 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}$; $c_{13} = 0,58 + 0,27 \lg \frac{b_1^{13/12} b_3^{13/12}}{a_1^{1/3} b_2^{3/2} a_2^{1/3}}$	Рис. 3.22, б
$c_{12} = 1,1 + 0,29 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}$; $c_{13} = 0,37 + 0,17 \lg \frac{b_1 b_3^{3/2}}{b_2^{11/6} a_1^{1/3} a_2^{1/3}}$	Рис. 3.22, в
$c_{14} = 0,36 + 0,18 \lg \frac{b_1 b_4}{b_2^{3/4} a_2^{1/2} b_3^{3/4}}$; $c_{23} = 0,96 + 0,41 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2}$	
$c_{12} = 1,07 + 0,28 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}$; $c_{13} = 0,32 + 0,15 \lg \frac{b_1 b_3^{3/2}}{b_2^{11/6} a_1^{1/3} a_2^{1/3}}$	
$c_{14} = 0,21 + 0,11 \lg \frac{b_1 b_4^{3/2}}{b_2 a_2^{1/2} b_3}$; $c_{23} = 0,92 + 0,4 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2}$	Рис. 3.22, г
$c_{24} = 0,25 + 0,15 \lg \frac{b_2^{13/12} b_4^{13/12}}{a_2^{1/3} b_3^{3/2} a_3^{1/3}}$	
$c_{12} = 1,06 + 0,28 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}$; $c_{13} = 0,3 + 0,14 \lg \frac{b_1 b_3^{3/2}}{b_2^{11/6} a_1^{1/3} a_2^{1/3}}$	
$c_{14} = 0,18 + 0,09 \lg \frac{b_1 b_4^{3/2}}{b_2 a_2^{1/2} a_3}$; $c_{23} = 0,91 + 0,39 \lg \frac{b_2 b_3}{a_2^2}$	Рис. 3.22, д
$c_{24} = 0,22 + 0,14 \lg \frac{b_2^{13/12} b_4^{13/12}}{a_2^{1/3} b_3^{3/2} a_3^{1/3}}$; $c_{34} = 0,89 + 0,39 \lg \frac{b_3 b_4}{a_3^2}$	
$l_{\text{ЭКВ}} = 6b_1 + \frac{1}{2} b_2 + a_1$; $c_{12} = 1,56 + 0,41 \lg \frac{b_1 b_2}{a_1^2}$	Рис. 3.22, е
$l_{\text{ЭКВ}} = 20,25 b_1$; $c_{12} = 1,18 + 0,31 \lg \frac{b_1 b_2^2}{a_1^3}$	
$l_{\text{ЭКВ}} = 26,23 b_1$; $c_{23} = 1,18 + 0,31 \lg \frac{b_3 b_2^2}{a_2^3}$	Рис. 3.22, ж
$l_{\text{ЭКВ}} = 23,19 b_1$; $c_{13} = 0,58 + 0,27 \lg \frac{b_1^{13/12} b_3^{13/12}}{a_1^{1/3} b_2^{3/2} a_2^{1/3}}$	

Для систем параллельных проводников (рис. 3.22) шириной b , расположенных на подложке на расстоянии a друг от друга, емкостные коэффициенты c_{ij} определяют по формулам, приведенным в табл. 3.18. По тем же формулам рассчитывают и значения емкостных коэффициентов $c_{(n+1)-i, (n+1)-j}$, только заменяют в формулах

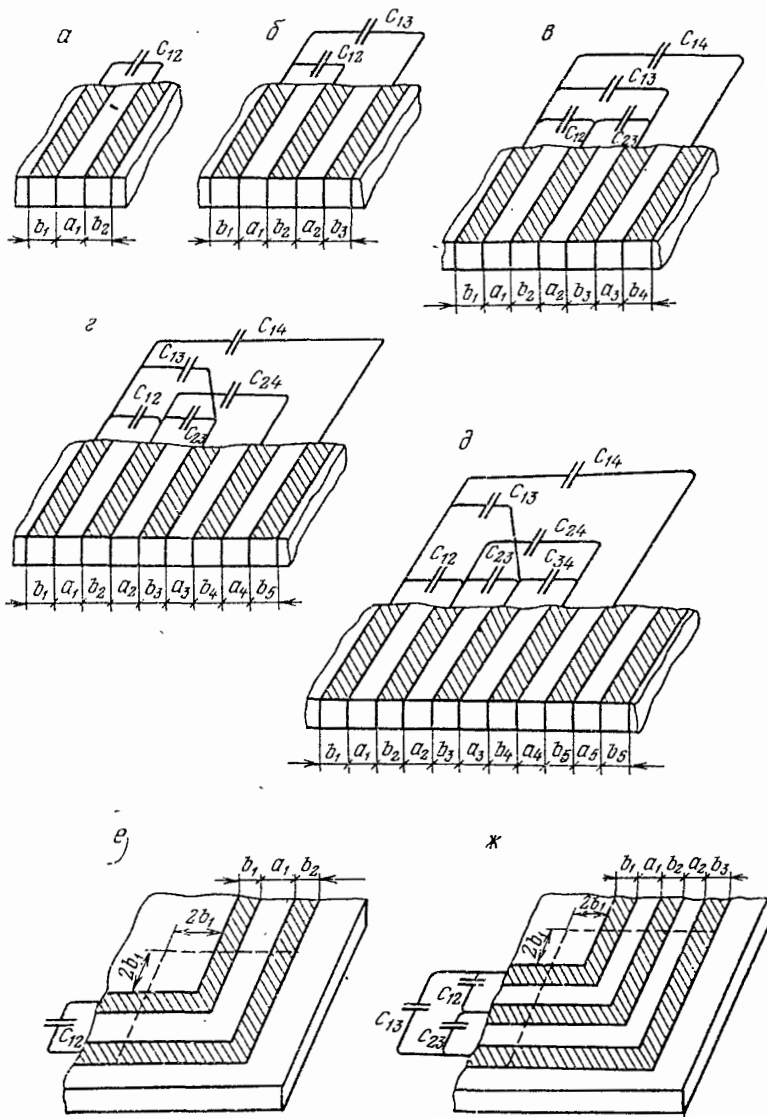


Рис. 3.22. Системы параллельных пленочных проводников, расположенных на подложке:

a — два проводника; b — три проводника; c — пять проводников; d — шесть проводников; e — два проводника, согнутых под прямым углом; z — три проводника, согнутых под прямым углом; b_1, b_2, \dots, b_n — ширина проводников; a_1, a_2, \dots, a_n — расстояние между проводниками.

b_k на $b_{(n-1)-k}$ и a_k на a_{n-k} ($k = 1, 2, \dots, n$, где n — число проводников в рассматриваемой системе).

При оценке емкостей между изогнутыми под прямым углом параллельными пленочными проводниками рассматриваемую систему разбивают на две: первую, состоящую из проводников, которые расположены под прямым углом с расстоянием $2b$ от изгиба первого проводника, вторую, состоящую из двух групп параллельных проводников. При оценке емкостей первой группы проводников в формулу (3.21) вместо l подставляют $l_{\text{экв}}$. Общая емкость рассматриваемой системы равна сумме емкостей, рассчитанных с учетом разбегания для каждой системы в отдельности.

Тепловой расчет микросхем

Общие положения. Тепловой расчет гибридных ИМС ведут, как правило, в три этапа. Сначала оценивают тепловой режим микросхемы. Если он не обеспечивается, то определяют требования к разработке топологии. Эти требования связаны с обеспечением необходимых зон защиты тепло выделяющих элементов. Если при проектировании топологии не обеспечена необходимая ширина зон защиты для некоторых элементов, то переходят к третьему этапу — ведут расчет перегревов этих элементов.

Исходными данными для теплового расчета микросхемы являются: тип конструкции микросхемы, определяемой ее тепловыми

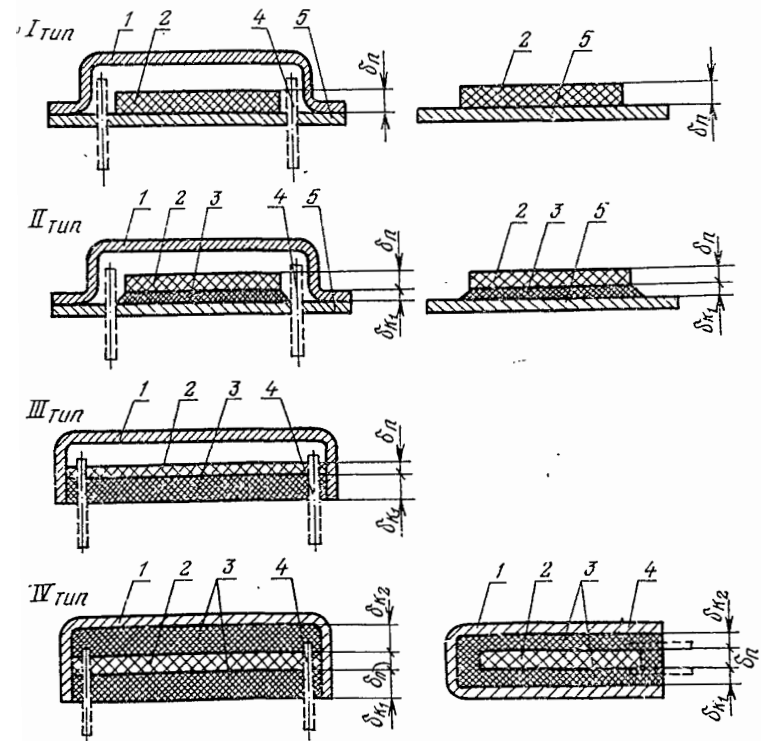


Рис. 3.23. Основные типы конструкций микросхем (исходя из тепловых свойств):
1 — крышка; 2 — подложка; 3 — клей (компаунд); 4 — вывод; 5 — основание корпуса.

свойствами; толщина платы δ_n , м; коэффициент теплопроводности платы λ_n , Вт/(м · град); толщина слоя клея (компаунда) между платой и основанием корпуса микросхемы $\delta_{к1}$, м; толщина слоя компаунда между платой и крышкой корпуса микросхемы $\delta_{к2}$, м; коэффициент теплопроводности клея (компаунда) λ_k , Вт/(м · град); температура корпуса (основания) микросхемы t_k , °С; максимально допустимая температура пленочных резисторов $t_{R \text{ max доп}}$, °С; максимально допустимая температура пленочных конденсаторов $t_{C \text{ max доп}}$, °С; максимально допустимая температура навесных компонентов $t_{н \text{ max доп}}$, °С; внутреннее тепловое сопротивление навесного компонента $R_{т.внi}$, град/Вт; мощность, рассеиваемая навесным компонентом, $P_{ни}$, Вт; ширина навесного компонента $l_{хни}$, м; длина навесного компонента l_{yni} , м; суммарная удельная мощность, рассеиваемая в микросхеме, P_0 , Вт/м².

Оценка теплового режима микросхемы. При оценке теплового режима микросхемы определяют вначале тепловое сопротивление r_t и приведенную толщину δ теплопроводящих участков. Величины r_t и δ зависят от типа конструкции микросхемы. Основные типы конструкций микросхем, определяемые тепловыми свойствами системы плата — корпус, приведены на рис. 3.23. В данном случае тип I конструкции характеризуется креплением платы к корпусу методом стеклосная или пайки, тип II предусматривает крепление платы к корпусу методом склеивания, в типе III плата крепится к металлополимерному основанию корпуса с помощью клея и тип IV предусматривает полную заливку платы компаундом.

В зависимости от типа конструкции микросхемы расчет величин r_t и δ ведут по следующим формулам: для конструкции типа I

$$r_t = \frac{\delta_n}{\lambda_n} \text{ [м}^2 \cdot \text{град/Вт];}$$

для конструкции типа II

$$r_t = \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{к1}}{\lambda_k};$$

$$\delta = \delta_n + \delta_{к1} \frac{\lambda_n}{\lambda_k};$$

для конструкции типа III

$$r_t = \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{к1}}{\lambda_k};$$

$$\delta = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{к1}^2 + \delta_n \delta_{к1} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_k} + \frac{\lambda_k}{\lambda_n} \right)};$$

для конструкции типа IV

$$r_t = \frac{r_{т1} r_{т2}}{r_{т1} + r_{т2}},$$

где

$$r_{т1} = \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{к1}}{\lambda_k};$$

$$\delta_1 = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{к1}^2 + \delta_n \delta_{к1} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_k} + \frac{\lambda_k}{\lambda_n} \right)};$$

$$r_{т2} = \frac{\delta_{к2}}{\lambda_k};$$

$$\delta_2 = \delta_{к2};$$

$$\delta = \max \{ \delta_1, \delta_2 \}.$$

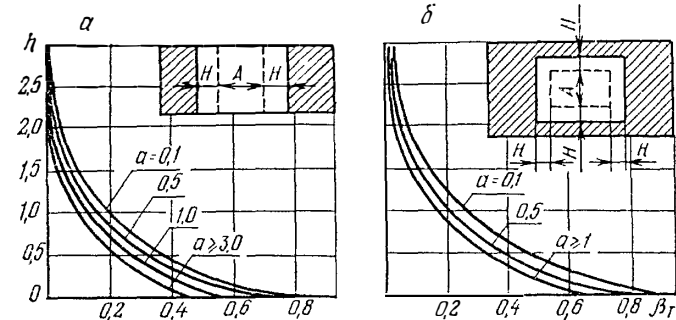


Рис. 3.24. Графики для расчета зон защиты термокритичных элементов и компонентов:

a — при двусторонней защите; б — при защите по периметру.

В дальнейшем определяют максимально допустимую удельную мощность рассеяния P'_0 конструкции при произвольном размещении на плате тепловыделяющих элементов. Расчеты ведут по следующей формуле:

$$P'_0 = \frac{t_{н \text{ max}} - t_k - \theta_{н \text{ max}}}{r_t};$$

где

$$\theta_{н \text{ max}} = \max \left\{ P_{ни} \left(R_{т.внi} + \frac{r_t}{l_{хни} l_{yni}} \right) \right\}.$$

При выполнении условия $P_0 \leq P'_0$ дальнейший тепловой расчет микросхем не требуется. Однако в этом случае определяют максимально возможные температуры элементов и компонентов микросхемы. Это осуществляется по следующим формулам:

для пленочных резисторов

$$t_{R \text{ max}} = t_k + r_t (P_0 + P_{н \text{ max}});$$

для пленочных конденсаторов

$$t_{C \text{ max}} = t_k + 0,5 r_t (P_0 + P_{н \text{ max}});$$

для навесных компонентов

$$t_{н \text{ max}} = t_k + r_t P_0 + \theta_{н \text{ max}},$$

где

$$P_{н \text{ max}} = \max \left\{ \frac{P_{ни}}{l_{хни} + l_{yni}} \right\}.$$

Обеспечение заданного теплового режима. Если величина $P_0 > P'_0$, то для обеспечения заданного теплового режима микросхемы необходимо отделить навесные компоненты от остальных тепловыделяющих элементов зонами защиты, свободными от источников тепла и предназначенными для ослабления теплового влияния на них остальных элементов микросхемы. Защита может быть двусторонней (рис. 3.24, а) и по периметру (рис. 3.24, б).

Расчет зон защиты производят в следующем порядке. Вначале определяют величины:

$$a = \frac{A}{\delta};$$

$$\beta_{\tau} = \frac{t_{н \max \text{ доп}} - t_{к} - \theta_{н.т}}{r_{\tau} P_0},$$

где A — ширина защищаемой зоны, м;

$$\theta_{н.т} = P_{н.т} \left(R_{т.вн} + \frac{r_{\tau}}{l_{хн} l_{гн}} \right);$$

$P_{н.т}$ — мощность, рассеиваемая наиболее нагруженным навесным компонентом.

Затем вычисляют минимально допустимую ширину зоны защиты по формуле

$$H = h\delta,$$

где h для выбранного варианта защиты определяют из рис. 3.24.

Если при разработке топологии учтена требуемая ширина зон защиты тепловыделяющих элементов, то тепловой расчет гибридной интегральной микросхемы на этом заканчивают. В случае отклонения от установленных на данном этапе требований переходят к третьему этапу теплового расчета и определяют перегревы элементов и компонентов микросхемы.

Если результаты расчетов, проведенных на третьем этапе, свидетельствуют о том, что температура отдельных элементов или компонентов превышает максимально допустимое значение, то следует осуществить корректировку топологии с целью обеспечения нормального теплового режима работы микросхемы.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сущность процесса изготовления толсто пленочных интегральных микросхем заключается в нанесении на керамическую подложку специальных проводниковых, резистивных или диэлектрических паст путем продавливания их через сетчатый трафарет с помощью ракеля и в последующей термообработке (вжигании) этих паст, в результате чего образуется прочная монолитная структура.

Проводниковые и резистивные пасты состоят из порошков металлов и их оксидов, а также содержат порошки низкоплавких стекол (стеклянную фритту). В диэлектрических пастах металлические порошки отсутствуют. Чтобы придать пастам необходимую вязкость, их замешивают на органических связующих веществах (этилцеллюлоза, вазелины).

При вжигании паст стеклянная фритта размягчается, обволакивает и затем при охлаждении связывает проводящие частицы проводниковых и резистивных паст. Диэлектрические пасты после термообработки представляют однородные стекловидные пленки.

4.2. ПОДЛОЖКИ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Для изготовления подложек обычно используются керамические материалы или стекла. Чаще всего употребляется керамика на основе 96%-ной поликристаллической окиси алюминия. Для мощных ИМС применяется также бериллиевая керамика, обладающая хорошей теплопроводностью, но требующая особых мер обеспечения безопасности при обработке вследствие ее токсичности.

Точность получаемого в процессе трафаретной печати рисунка микросхемы в значительной степени зависит от плоскостности поверхности подложки и ее шероховатости. Максимальная кривизна поверхности (макронеровность) не должна превышать 4 мкм на 1 мм длины. Шероховатость (микронеровность) рабочей поверхности подложки должна быть не ниже восьмого класса ($R_a = 0,32 - 0,63$ мкм). Слишком малая шероховатость может приводить к ухудшению адгезии наносимых пленок.

Размеры плат определяются конкретной конструкцией применяемых корпусов ИМС. Рекомендуются размеры 8×15 мм², 10×16 мм² и кратные им. Толщина плат составляет 0,6 мм.

4.3. ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫЕ ПРОВОДНИКИ

Проводниковые пасты изготавливаются на основе золота, золота — палладия, золота — палладия — серебра, индия, рения. Сравнительные характеристики проводниковых паст различных составов приведены в табл. 4.1.

Толщина слоя проводника на основе композиции палладий — серебро составляет 10—25 мкм, минимальная ширина (длина) проводника колеб-

Табл. 4.1. Сравнительные характеристики проводниковых паст

Материал основной составляющей пасты	Удельное сопротивление, Ом/кв	Толщина пленки, мкм	Ширина дорожки, мкм
Золото	0,001—0,1	10—25	125—250
Золото — платина	0,08—0,1	25	125
Золото — палладий	0,04—0,1	25	250—375
Золото — платина — палладий	0,3	—	—
Палладий — серебро	0,02—0,1	10—25	150—375
Платина — серебро	0,002—0,003	—	—

Табл. 4.2. Параметры толсто пленочных проводников системы Ag—Pd

Свойство	Тип пасты				
	ПП-1	ПП-2	ПП-3	ПП-4	ПП-5
Удельное поверхностное сопротивление, Ом/кв	<0,05	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05
Прочность сцепления пленки с керамикой, Па	5·10 ⁶	—	5·10 ⁶	—	5·10 ⁶
Растекаемость паст, мкм	<150	<150	<50	<50	<20
Шероховатость поверхности пленок, мкм	<5	<5	—	—	<5
Ширина проводниковой дорожки выбирается в зависимости от силы тока:					
Сила тока, А	6	3	2	1	0,3
Ширина проводника, мм	1	0,80	0,60	0,30	0,15

Табл. 4.3. Свойства паст на основе золота

Свойство	Тип пасты	
	ПЗП-1	ПЗП-2
Удельное поверхностное сопротивление, Ом/кв	<0,005	<0,05
Прочность сцепления пленки с керамикой 22ХС, Па	>10 ⁷	—
Растекаемость паст, мкм	<20	—
Шероховатость поверхности пленок, мкм	<2	<2

лется в пределах 0,15—0,20 мм при нанесении пасты на керамику и 0,20—0,30 мм при нанесении на слой диэлектрика. Минимальное расстояние между проводниковыми элементами 0,05—0,20 мм в зависимости от рецептурного состава пасты. Сопротивление квадрата проводниковой пленки на основе данной композиции колеблется в пределах 0,05—0,5 Ом/кв (табл. 4.2).

Паста ПП-1 предназначена для получения проводников с растекаемостью 100—150 мкм на керамике типа 22ХС, ПП-2 — для получения верхних обкладок конденсаторов, инертных к облуживанию; ПП-3 — проводников с пониженной растекаемостью; ПП-4 — проводников больших интегральных схем на верхних диэлектрических слоях; ПП-5 — проводников с растекаемостью 10—20 мкм на керамике 22ХС, совместимых с рутениевыми толсто пленочными резисторами.

Промышленно выпускаются также проводниковые пасты на основе золота (табл. 4.3).

Паста ПЗП-1 предназначена для получения толсто пленочных прецизионных проводниковых элементов на спеченной керамике с температурой вжигания 850—950 °С. Пасту ПЗП-2 рекомендуется применять для металлизации контактных площадок на платах гибридных БИС на основе многослойной керамики (на подслое вожженных молибдена или вольфрама).

4.4. ТОЛСТО ПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Резистивные пасты. Они обычно изготавливаются на основе композиций: серебро — палладий — окись палладия, серебро — окись рутения, висмут — рутений, рутений — иридий, платина — окись иридия. Опробованы также композиции типа кадмий — алюминий — бор — окись молибдена. Толщина резистивных пленок после вжигания составляет примерно 20 мкм.

В табл. 4.4 приведены сравнительные характеристики резисторов из паст различных составов. Если в микросхеме $\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \leq 5 \dots 6$, то резисторы могут быть изготовлены из пасты одной марки.

Табл. 4.4. Характеристики толсто пленочных резисторов, изготавливаемых из паст различных составов

Основные составляющие пасты	ТКС, 1/град	Стабильность, %
Ag—Pd—PdO	$\pm (50-300) \cdot 10^{-6}$	± 3 (за 5·10 ⁴ ч)
RuO ₂	$\pm 260 \cdot 10^{-6}$	± 2
RuIr	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	—
Pt—IrO ₂	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	—
Bi ₂ Ru ₂ O ₇	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	—
Cd—Al—В—MoO ₃	$(+80 \dots -200) \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,3$ (за 2·10 ³ ч)

Резистивные пасты, приготавливаемые на основе композиции палладий — серебро, обеспечивают номинальные сопротивления резисторов от 25 Ом до 1 МОм. Сопротивление квадрата резистивной пленки соответствует следующему ряду значений: 5, 100, 500, 1000, 3000, 6000, 20 000, 50 000 Ом/кв. Температурный коэффициент сопротивления подобных паст не превышает $800 \cdot 10^{-6}$ 1/град в интервале температур -60...+125 °С (табл. 4.5).

Обычная толщина резистивных пленок составляет 18—25 мкм.

Расчет резисторов. Номинальное значение сопротивления резистора определяется по формуле

$$R = \rho_{кв} k_{\Phi}, \quad k_{\Phi} = \frac{k}{P_{\text{р.д.}}} \quad (4.1)$$

где $\rho_{кв}$ — сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/кв; $k_{\Phi} = l/b$ — коэффициент формы.

Ширина резистора

$$b \geq \sqrt{\frac{k_P P_{\text{р.к.}}}{P_0 R}} \quad (4.2)$$

где P — расчетное значение мощности рассеяния резистора, Вт; P_0 — максимальная удельная мощность рассеяния резистивной плен-

Табл. 4.5. Параметры резистивных паст толсто пленочных интегральных микросхем

Параметры	Марки паст								
	ПР-5	ПР-20	ПР-100	ПР-500	ПР-1к	ПР-3к	ПР-6к	ПР-20к	ПР-50к
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Удельное поверхностное сопротивление, Ом/кв	5	20	100	500	10 ³	3·10 ³	6·10 ³	2·10 ⁴	5·10 ⁴
Коэффициент шума, мкВ/В (не более)	0,5	0,5	0,5	1	2	5	5	10	10
Температурный коэффициент сопротивления (T = -60...+125°C), град ⁻¹					± 8 × 10 ⁻⁴				
Удельная рассеиваемая мощность, Вт/см ² (не более)					3				
Предельное рабочее напряжение, В					20				

ки, Вт/мм²; k_p — коэффициент запаса мощности, учитывающий подгонку резистора: $k_p = \frac{2n}{100} + 1$; n — допустимое отрицательное отклонение сопротивления резистора от номинального до подгонки, %. Максимальное значение n принимается равным 52%. Расчетная длина резистора находится по формуле (4.1).

Расчет резисторов, имеющих $k_\phi < 1$, начинают с определения длины, заменяя ширину b в формуле (4.2) на длину l .

Удельная мощность рассеяния резисторов на основе композиции палладий — серебро обычно принимается равной 3 Вт/см², однако толсто пленочные резисторы могут быть нагружены и сильнее, до 6 Вт/см² и более (для паст новых составов), при условии правильной организации охлаждения.

Стабильная работа толсто пленочных резисторов зависит также от величины падения напряжения на них. Допустимая нагрузка по напряжению не должна превышать 20 В/мм по длине резистивной полоски. Изменение номинала сопротивления (стабильность) в зависимости от приложенного напряжения составляет: для напряжения от 0 до 40 В — (0,5—1) 10⁻⁴ %/В; для напряжения от 40 до 400 В — (1—5) 10⁻⁴ %/В.

Влияние напряжения на сопротивление объясняется проявлением частично-полупроводникового характера проводимости толсто пленочных резисторов из-за имеющихся в их структуре окислов металлов.

Наличие полупроводникового компонента в механизме проводимости толсто пленочных резисторов обуславливает появление шумов типа $1/f$.

При протекании тока I через резистор с сопротивлением R , т. е. при падении постоянного напряжения на резисторе $U = IR$, напряжение шумов в диапазоне частот от f_1 до f_2 определяется формулой

$$u^2 = \frac{c}{Sd} U^2 \ln(f_2/f_1), \quad (4.3)$$

где c — константа, зависящая от состава пасты; S — площадь поверхности резистивной пленки; d — толщина пленки.

Как видно из уравнения (4.3), шумы уменьшаются с увеличением объема резистивной пасты.

Уровень шумов при изменении частоты на декаду рассчитывают по результатам измерений по формуле

$$A = 20 \lg(u/U) \text{ [дБ]},$$

где u — напряжение шумов, мкВ; U — приложенное напряжение, В.

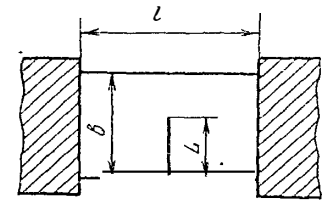


Рис. 4.1. Толсто пленочный резистор с единичным подгоночным резом (шлицем).

Наибольшими шумами обладают резисторы на основе паст серебро — палладий, значительно меньшие шумы имеют платиноиридиевые резисторы. С увеличением удельного сопротивления резисторов, т. е. с уменьшением содержания металла в пасте, шумы возрастают.

Изменение номинального сопротивления резисторов путем подгонки. Относительное изменение номинального значения сопротивления в результате подгонки резистора оценивается фактором коррекции, который определяется по формуле

$$f_k = \frac{R_k - R_{исх}}{R_{исх}},$$

где R_k — сопротивление резистора после подгонки; $R_{исх}$ — исходное сопротивление резистора до подгонки.

Если подгонка осуществляется путем создания единичного реза (рис. 4.1), то зависимость фактора коррекции от геометрических параметров выражается соотношением

$$f_k = \left(\frac{L}{b}\right)^2 \left[A + B \left(1 - \frac{L}{b}\right)^{-1/2} \right], \quad (4.4)$$

где L — длина реза; A и B — коэффициенты, зависящие от коэффициента формы резистора и расположения реза.

Значения коэффициентов A и B для резисторов с различными коэффициентами формы и несколькими вариантами расположения подгоночного реза приведены в табл. 4.6.

На рис. 4.2 показана зависимость фактора коррекции от отношения длины реза к ширине резистора L/b для резисторов с коэффициентами формы в пределах $k_\phi = 0,25—3$.

Если подгонка осуществляется с помощью двух резов, характер изменения фактора коррекции зависит от того, располагаются ли оба реза с одной стороны резистивной полоски или наносятся с двух противоположных ее сторон. Введение второго реза позволяет осуществлять более плавное изменение фактора коррекции, т. е. более плавную подгонку.

Рассмотрим пример для случая расположения обоих резов с одной стороны резистивной полоски с коэффициентом формы $k_\phi = 1$ (рис. 4.3).

Участок графика 0 — a соответствует регулировке сопротивления резистора с помощью одного реза длиной L_1 , достигающей в данном случае 40 % от ширины резистора. На участке $a — d$ изменение фактора коррекции осуществляется с помощью второго реза длиной L_2 . Когда размеры обоих резов становятся равными (суммарная длина их составляет в данном случае 80 % относительно ширины резистора), дальнейший ход кривой изменения фактора коррекции параллелен кривой для единичного реза (выше точки d).

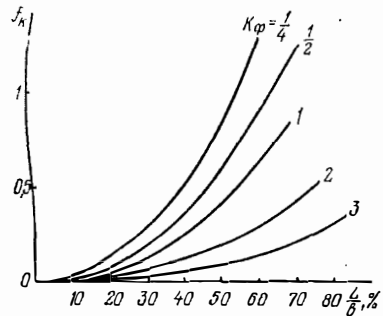


Рис. 4.2. Зависимость фактора коррекции от отношения длины реза к ширине резистора для резисторов с различными коэффициентами формы.

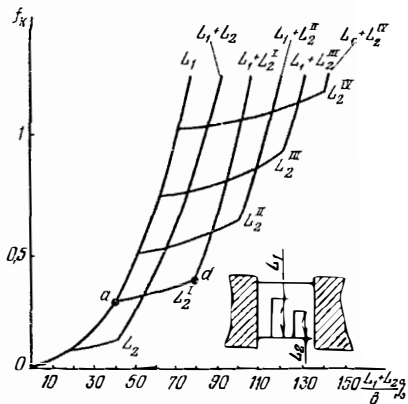


Рис. 4.3. Зависимость фактора коррекции при подгонке с помощью двух резов, расположенных с одной стороны, от отношения суммы длины резов к ширине резистора с коэффициентом формы $k_\Phi = 1$.

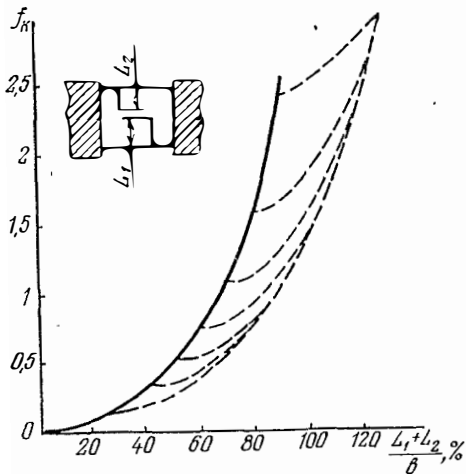


Рис. 4.4. Зависимость фактора коррекции и при подгонке с помощью двух резов, расположенных с двух сторон резистивной полоски, от отношения суммы длин резов к ширине резистора с коэффициентом формы $k_\Phi = 1$.

На рис. 4.4 представлен график изменения фактора коррекции для резистора с коэффициентом формы $k_\Phi = 1$ при нанесении резов по обе стороны резистивной полоски.

Плавное изменение фактора коррекции, т. е. плавная регулировка сопротивления резистора, может быть осуществлено путем сочетания ре-

Табл. 4.6. Значения коэффициентов A и B для фактора коррекции

Форма резистора и расположение реза	A	B
	0,16	0,125
	0,6	0,3
	1,1	0,35
	1,1	0,45
	1,1	0,9
	1,1	1,6

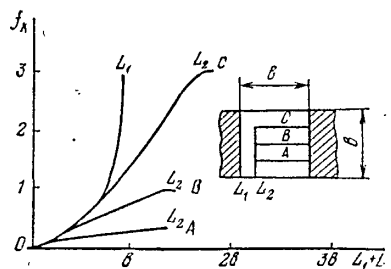


Рис. 4.5. Зависимость фактора коррекции в случае сочетания продольных и поперечных резцов от суммы длин резцов (в единицах ширины резистора) для резистора с $k_\phi = 1$.

зов вдоль и поперек резистивной полоски. Соответствующие кривые приведены на рис. 4.5 (для резистора с коэффициентом формы $k_\phi = 1$) и на рис. 4.6 (для $k_\phi = 4$).

4.5. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Пленочные конденсаторы. Диэлектрические пленки в толсто пленочных микросхемах применяются в качестве диэлектриков конденсаторов, межслойной изоляции, защитных слоев.

Диэлектрические пасты для конденсаторов изготавливаются на основе смеси керамических материалов и флюсов. Толщина пленки после термической обработки составляет 40—60 мкм.

Используя пленки, обеспечивающие удельную емкость $C_0 = 3700$ пФ/см², изготавливают конденсаторы с номинальной емкостью от 500 до 300 пФ, а пленки с $C_0 = 10\,000$ пФ/см² позволяют производить конденсаторы в диапазоне от 100 до 2500 пФ. Погрешность номинальной емкости конденсаторов обычно составляет $\pm 15\%$. Пробивное напряжение не менее 150 В.

Величина диэлектрической проницаемости для диэлектрических паст конденсаторов на основе композиции титанат бария — окись титана — окись алюминия — легкоплавкое стекло составляет от 10 до 2000.

Расчетная площадь верхней обкладки конденсатора определяется по формуле

$$S = C/C_0,$$

где C — номинальное заданное значение емкости; C_0 — удельная емкость.

Нижняя обкладка конденсатора должна выступать за край верхней не менее чем на 0,3 мм, пленка диэлектрика — за край нижней обкладки не менее чем на 0,2 мм.

Толсто пленочные конденсаторы в некоторых случаях допускают подгонку воздушно-абразивной струей, при этом погрешность составляет не более 1 %.

Пасты верхних обкладок должны быть инертны к лужению.

Межслойная и защитная изоляции. Пасты для межслойной изоляции и защиты от внешней среды изготавливаются из низкоплавкого стекла и

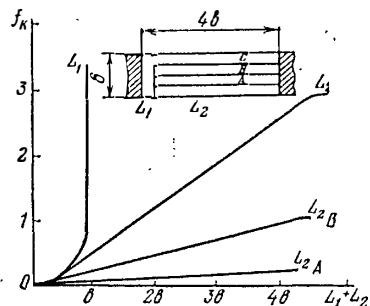


Рис. 4.6. Зависимость фактора коррекции в случае сочетания продольных и поперечных резцов от суммы длин резцов (в единицах ширины резистора) для резистора с $k_\phi = 4$.

Табл. 4.7. Параметры паст для толсто пленочных конденсаторов и межслойной изоляции

Параметры	Конденсаторы		Межслойная изоляция			
	Марки паст					
	ПК 1000-30	ПК-12	ПД-1	ПД-2	ПД-3	ПД-4
Толщина пленки, мм	40—60	40—60	60—70	50—60	30—50	30—50
Минимальный размер, мм	1×1	1×1	—	—	—	—
Диапазон номинальных значений, пФ	50—300	100—2500	—	—	—	—
Допускаемые отклонения величины емкости от номинального значения, %	± 15 3700	± 15 10000	160	220	—	—
Удельная емкость, пФ/см ²	0,035	0,035	20	30	20	30
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1,5 МГц (не более)	0,035	0,035	20	30	20	30
Температурный коэффициент емкости ($T = -60 \dots +85^\circ\text{C}$), град ⁻¹	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$					
Пробивное напряжение, В (не менее)	150	150	500	—	—	—

глинозема. Толщина диэлектрического слоя составляет от 30 до 70 мкм, удельная емкость — от 150 до 200 пФ/см², пробивное напряжение — 500 В.

Диэлектрическая проницаемость паст для изоляции и защиты находится в пределах от 10 до 15. Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте от 1 кГц до 1,5 МГц не превышает $25 \cdot 10^{-4}$; сопротивление изоляции более 10^{12} Ом при постоянном напряжении 100 В.

Для многослойной сложной разводки межсоединений используется кристаллизующееся стекло.

В целях удобства сортировки различных микросхем на операциях сборки применяются разноцветные защитные пасты.

Параметры паст для толсто пленочных конденсаторов и межслойной изоляции приведены в табл. 4.7.

4.6. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ

Общие рекомендации. При разработке топологии учитываются конструктивные и технологические ограничения, обуславливающие размещение на плате пленочных элементов и навесных компонентов, а также внешних выводов ИМС. Принимаются во внимание и при необходимости рассчитываются тепловой режим и паразитные электрические и магнитные связи.

Последовательность разработки топологии толсто пленочных ИМС не отличается от последовательности, принятой при разработке тонко пленочных ИМС.

Проводники, контактные площадки, внешние выводы. Проводники, а также другие пленочные элементы: резисторы, конденсаторы могут располагаться на обеих сторонах платы. Соединения между элементами, расположенными на разных сторонах подложки, осуществляются через отверстия.

Проводники, расположенные в нижнем слое при многослойной разводке межсоединений, не должны находиться под резисторами, подгоняемыми лучом лазера.

Контактные площадки для монтажа навесных компонентов с гибкими выводами способом неавтоматизированной пайки, а также для контроля электрических параметров должны иметь размеры не менее $0,4 \times 0,4$ мм. Автоматизированный монтаж этих компонентов требует размеров контактных площадок не менее $0,6 \times 0,6$ мм, а компонентов с шариковыми выводами — $0,25 \times 0,25$ мм с расстоянием между контактными площадками $0,1$ мм, если шаг выводов навесных компонентов $0,35$ мм.

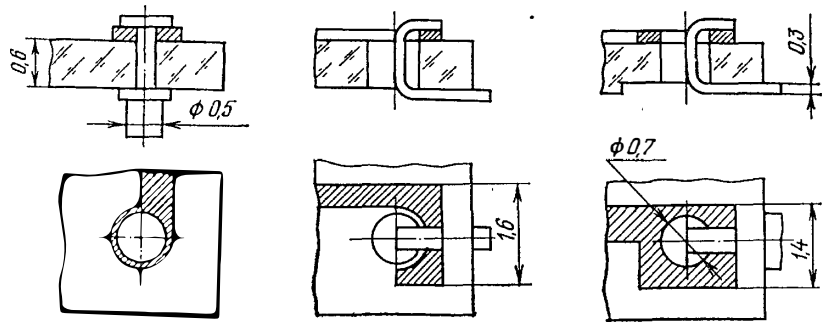


Рис. 4.7. Варианты выполнения внешних контактных площадок и выводов.

Проводники и контактные площадки для присоединения навесных компонентов с целью повышения надежности и уменьшения сопротивления рекомендуется лудить серебрено-оловянным припоем. При монтаже навесных компонентов с шариковыми выводами проводники целесообразно покрывать пленкой защитного диэлектрика, оставляя открытыми лишь контактные площадки. Пленка диэлектрика должна отстоять от края контактной площадки на $0,5$ мм.

Варианты исполнения внешних контактных площадок и конструкций внешних выводов платы показаны на рис. 4.7.

Навесные компоненты. Навесными компонентами могут быть бескорпусные диоды и транзисторы, диодные и транзисторные матрицы, бескорпусные полупроводниковые ИМС, диоды и транзисторы в миниатюрных корпусах, а также конденсаторы и трансформаторы с гибкими и жесткими выводами.

Навесные компоненты рекомендуется располагать рядами на одной стороне платы. Допускается устанавливать их на резисторах и проводниках, защищенных диэлектрической пленкой. Места расположения навесных компонентов целесообразно обозначать метками, выполненными с помощью резистивных или диэлектрических паст.

В целях унификации в однотипных микросхемах необходимо применять навесные компоненты с одинаковым диаметром гибких выводов, максимальная длина гибкого вывода без дополнительного крепления путем приклеивания составляет не более $2,5$ мм. Минимальное расстояние между навесным компонентом и контактной площадкой должно составлять при пайке $0,8$ мм. Расстояние между луженым проводником или контактной площадкой и навесным компонентом должно быть не менее $0,2$ мм. Наименьшее расстояние от навесного компонента до края платы 1 мм.

Резисторы. Количество резистивных слоев на одной стороне подложки, выполненных с помощью паст с различным удельным сопротивлением, может составлять не более трех. Целесообразно ориентировать резисторы на плате одинаково, т. е. располагать их длинными или короткими сто-

ронами параллельно друг другу. На одной стороне платы рекомендуется размещать резисторы, близкие по номинальным значениям сопротивлений. Минимальный размер резисторов $0,8 \times 0,8$ мм. Изготавливать резисторы в виде меандра не рекомендуется.

Если принципиальная электрическая схема не предусматривает внешних контактов для каждого подгоняемого резистора, то для обеспечения контроля сопротивления в процессе лазерной подгонки необходимо при разработке топологии создавать временные проволочные переключки или даже временные выводы, которые после подгонки резисторов удаляются.

Конденсаторы и межслойная изоляция. Пленочные конденсаторы не должны располагаться на той стороне платы, которая при герметизации заливается компаундом.

Между контактной площадкой навесного конденсатора, присоединяемого пайкой, и активным компонентом необходимо предусмотреть расстояние не менее 1 мм.

Круглые отверстия в межслойной изоляции, служащие для контакта между проводниками различных уровней, должны иметь диаметр не менее $0,6$ мм. Квадратные отверстия выполняются с размером стороны не менее $0,5$ мм. Между пленочными элементами, находящимися в разных слоях при многослойной разводке, обеспечивается расстояние не менее $0,2$ мм.

При разработке топологии следует учитывать, что коэффициент заполнения площади платы элементами, расположенными на одном уровне, ограничен значением $0,7$. Минимальное расстояние от края отверстия до края платы должно составлять $0,5$ мм.

5. МАТЕРИАЛЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Подавляющее большинство производимых в настоящее время интегральных микросхем составляют полупроводниковые интегральные микросхемы. Это объясняется их исключительно высокой надежностью и степенью интеграции, способностью функционировать при малых уровнях токов и напряжений, низкой стоимостью при массовых масштабах производства и другими достоинствами.

Основным материалом для изготовления полупроводниковых ИМС является кремний. Элементы кремниевых ИМС работоспособны в широком интервале температур, обладают малыми неконтролируемыми токами утечки, допускают большие кратковременные перегрузки. Кремний технологичен, т. е. обеспечивает широкий диапазон удельных сопротивлений материала путем легирования различными примесями, а пленка двуокиси кремния обладает исключительно ценным свойством препятствовать диффузии сквозь нее легирующих примесей при высоких температурах и играть таким образом роль защитной маски.

Последние годы успешно разрабатываются и внедряются ИМС на основе арсенида галлия. Данный полупроводниковый материал способен обеспечивать работу ИМС при более высоких температурах, чем кремний, а также позволяет изготавливать элементы ИМС с высоким быстродействием, малыми шумами и другими полезными свойствами.

5.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЯ И АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Наиболее важные свойства кремния и арсенида галлия приведены в табл. 5.1.

Для создания ИМС выбирается полупроводниковый материал, в исходном состоянии легированный до необходимой степени теми или иными примесями. В процессе изготовления ИМС полупроводник подвергается дополнительному легированию. На рис. 5.1 приведены данные о положении энергетических уровней некоторых элементов, используемых в качестве примесей в запрещенных энергетических зонах кремния и арсенида галлия при 300 К. Уровни, расположенные ниже середины запрещенной зоны, являются акцепторными (за исключением помеченных индексом Д), энергия этих уровней измеряется от потолка валентной зоны. Уровни, расположенные выше середины запрещенной зоны, являются донорными (за исключением помеченных индексом А), энергия этих уровней отсчитывается от дна зоны проводимости.

Важнейшей характеристикой полупроводникового материала является его удельное сопротивление. Для полупроводника, в котором электрический ток образуется электронами и дырками, удельное сопротивление ρ связано с концентрацией электронов n и дырок p , а также соответственно с их подвижностями μ_n и μ_p следующим соотношением:

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p)}$$

Табл. 5.1. Основные параметры кремния и арсенида галлия

Параметр	Обозначение	Si	Ga As
Ширина запрещенной зоны, эВ	ΔE_g	1,12	1,43
Энергия электронного сродства, эВ	χ	4,01	4,07
Концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике, см^{-3}	n_i	$1,5 \cdot 10^{10}$	$9,2 \cdot 10^8$
Удельное сопротивление собственного полупроводника, Ом·см	ρ_i	$2,3 \cdot 10^5$	$>10^8$
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	11,7	10,9
Коэффициент преломления	n	3,7	3,34
Постоянная кристаллической решетки, см^{-1}	a	5,4307	5,6534
Температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-6}/\text{град}$	α_T	2,33	5
Температура плавления, К	$T_{пл}$	1960	1508
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	d	2,3283	5,307
Микротвердость, Н/мм ²	H	11760	7350

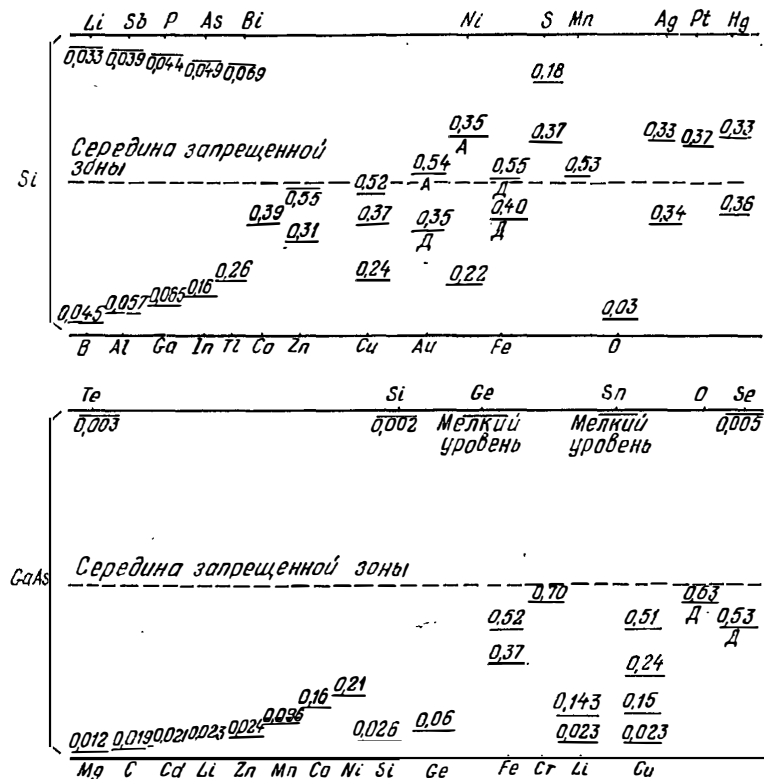


Рис. 5.1. Положение энергетических уровней для различных примесей в кремнии и арсениде галлия.

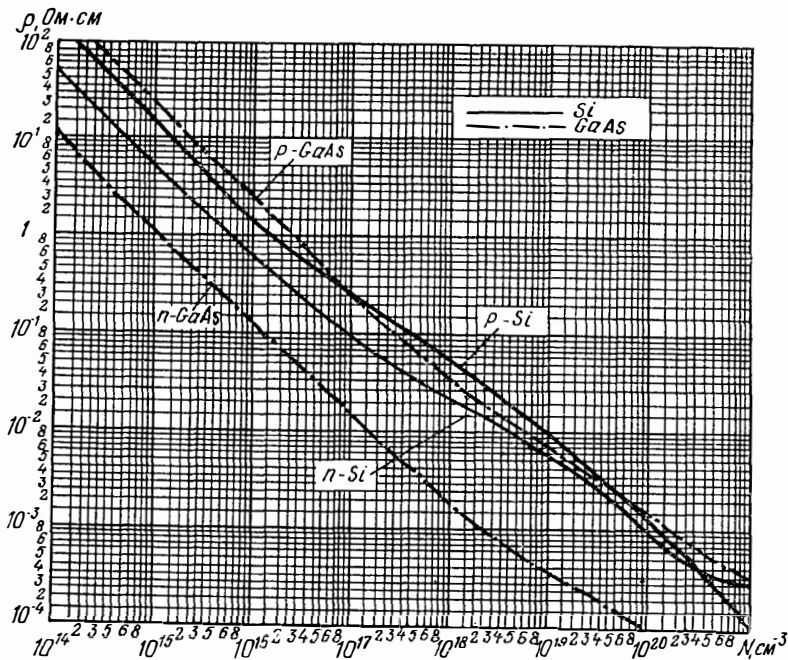


Рис. 5.2. Зависимости удельного сопротивления кремния и арсенида галлия от концентрации примесей при 300 К.

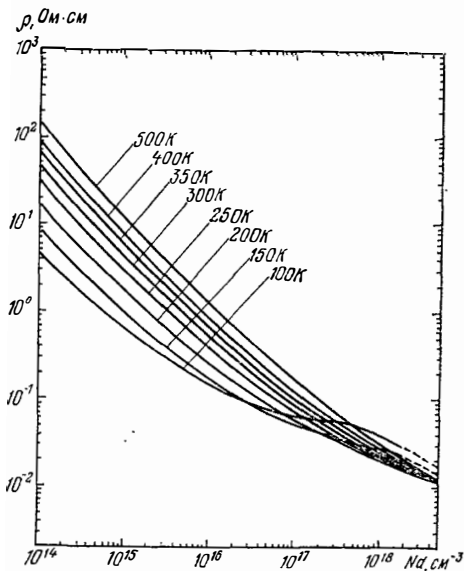


Рис. 5.3. Зависимость удельного сопротивления кремния от концентрации доноров и температуры.

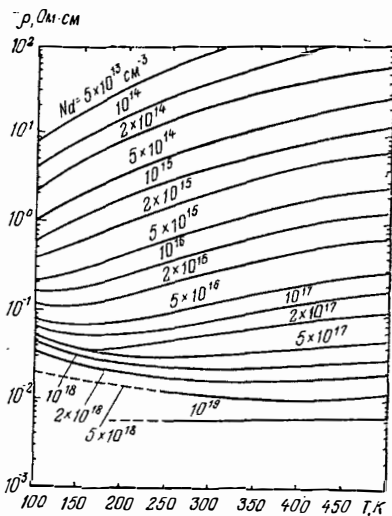


Рис. 5.4. Зависимость удельного сопротивления кремния от температуры при различных значениях концентрации доноров.

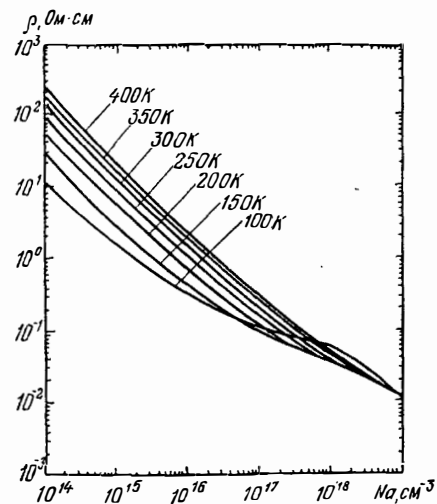


Рис. 5.5. Зависимость удельного сопротивления кремния от концентрации акцепторов и температуры.

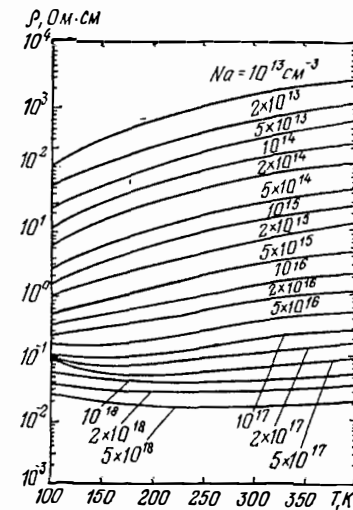


Рис. 5.6. Зависимость удельного сопротивления кремния от температуры при различных значениях концентрации акцепторов.

Если в полупроводнике $n \gg p$, материал является полупроводником n -типа электропроводности, а при $p \gg n$ материал обладает p -типом электропроводности. Полагая, что все примеси, доноры и акцепторы в полупроводниковых материалах соответственно n -типа или p -типа полностью ионизованы, можно считать, что количество электронов и дырок равно количеству содержащихся примесных атомов, т. е. $n \approx N_d$ и $p \approx N_a$. Поэтому выражение для удельного сопротивления полупроводника n -типа может быть приведено к виду

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_d},$$

а для полупроводника p -типа

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_a}.$$

Зависимости удельного сопротивления кремния и арсенида галлия от концентрации примесей при 300 К показана на рис. 5.2.

Температурные зависимости удельного сопротивления для легированного фосфором кремния n -типа показаны на рис. 5.3 и 5.4. Те же данные для кремния p -типа, легированного бором, приведены на рис. 5.5 и 5.6.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) кремния n - и p -типа электропроводности в зависимости от удельного сопротивления материала при температуре 300 К представлен в виде графиков на рис. 5.7.

Зависимости ТКС некомпенсированного кремния n -типа от удельного сопротивления материала при различной температуре, а также от температуры при различном содержании донорных примесей представлены на рис. 5.8 и 5.9. Те же данные для кремния p -типа приведены на рис. 5.10 и 5.11.

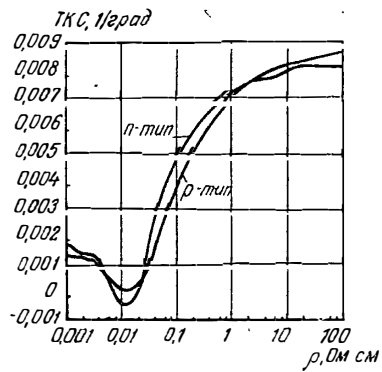


Рис. 5.7. Зависимость ТКС кремния *n*- и *p*-типов электропроводности от удельного сопротивления при 300 К.

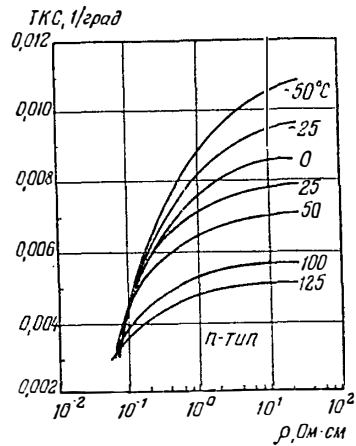


Рис. 5.8. Зависимость ТКС кремния *n*-типа электропроводности от удельного сопротивления и температуры.

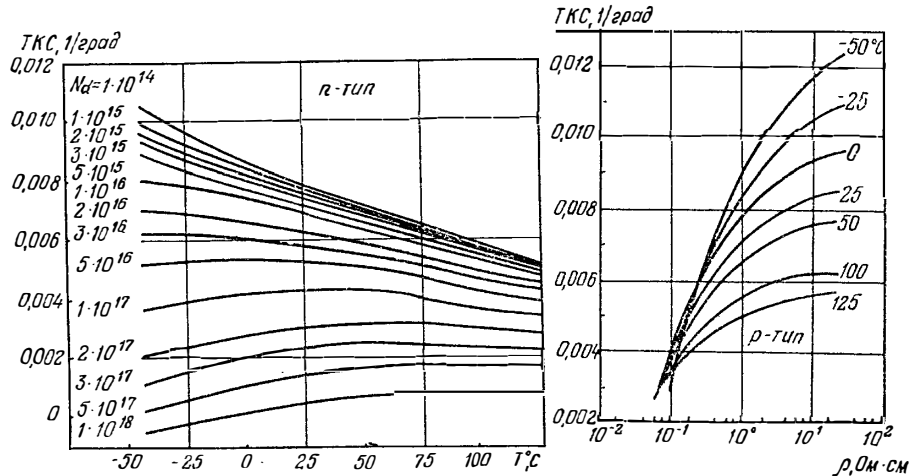


Рис. 5.9. Зависимость ТКС кремния *n*-типа электропроводности от температуры при различных значениях концентрации доноров.

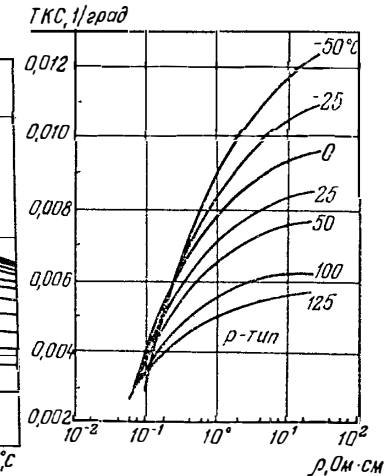


Рис. 5.10. Зависимость ТКС кремния *p*-типа электропроводности от удельного сопротивления и температуры.

Для получения материала с высоким удельным сопротивлением целесообразно применять способ компенсации донорных и акцепторных примесей. Компенсация снижает концентрацию носителей заряда и их подвижность. На рис. 5.12 и 5.13 показаны зависимости ТКС для кремния *n*-типа, частично компенсированного акцепторными примесями, от температуры, количества акцепторных примесей и степени компенсации. Те же данные для кремния *p*-типа, частично компенсированного донорными примесями, представлены на рис. 5.14 и 5.15.

Зависимости подвижностей электронов и дырок от концентрации примесей в кремнии и арсениде галлия показаны на рис. 5.16.

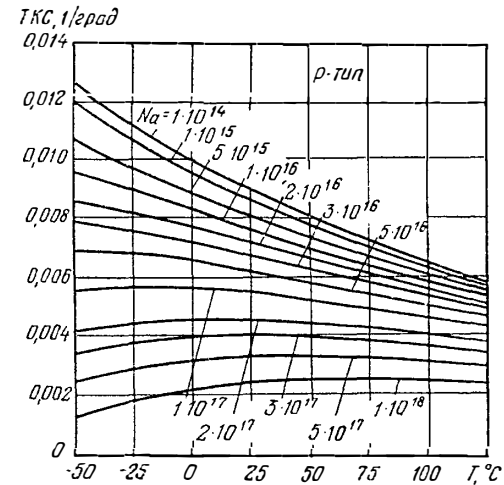


Рис. 5.11. Зависимость ТКС кремния *p*-типа электропроводности от температуры при различных значениях концентрации акцепторов.

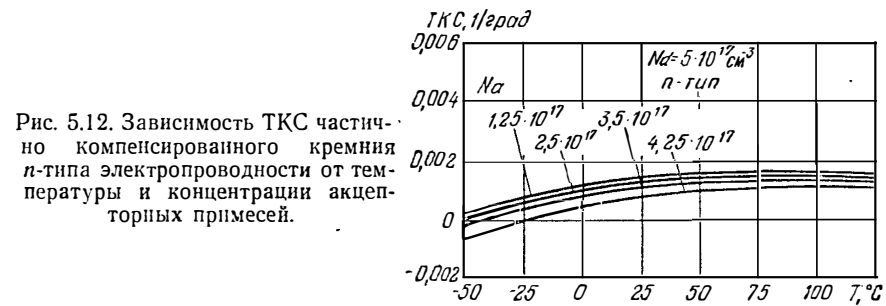


Рис. 5.12. Зависимость ТКС частично компенсированного кремния *n*-типа электропроводности от температуры и концентрации акцепторных примесей.

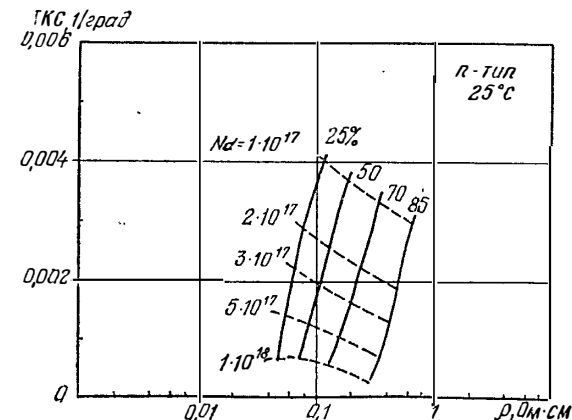


Рис. 5.13. Зависимость ТКС частично компенсированного кремния *n*-типа электропроводности от удельного сопротивления, концентрации доноров и степени компенсации (в процентах).

5.3. ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЯ И АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ВЫПУСКАЕМЫХ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

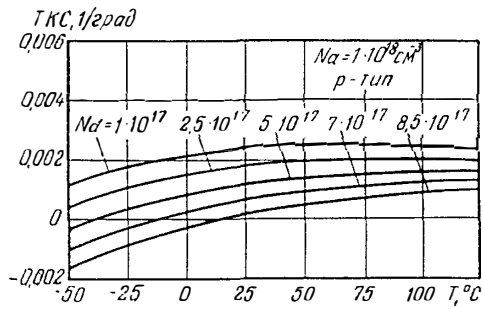


Рис. 5.14. Зависимость ТКС частично компенсированного кремния *p*-типа электропроводности от температуры и концентрации донорных примесей.

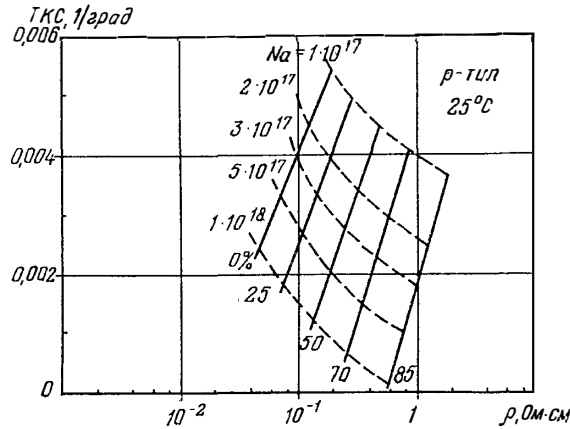


Рис. 5.15. Зависимость ТКС частично компенсированного кремния *p*-типа электропроводности от удельного сопротивления, концентрации акцепторов и степени компенсации (в процентах).

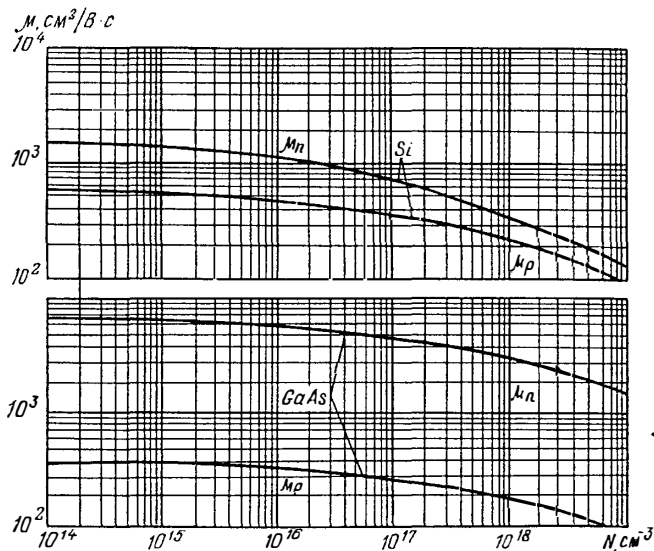


Рис. 5.16. Зависимости подвижностей носителей заряда от концентрации примесей в кремнии и арсениде галлия при 300 К.

Монокристаллический кремний. Промышленностью выпускается для производства интегральных микросхем и полупроводниковых приборов кремний, получаемый методами Чохральского, бестигельной зонной и гарнисажной плавки. Первый метод обеспечивает получение слитков с кристаллографической ориентацией (111) и (100), а два других — с кристаллографической ориентацией (111). Основные параметры монокристаллического кремния, получаемого указанными тремя методами, приведены в табл. 5.2, 5.3 и 5.4.

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

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.

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.

2Б2 БКЭФ 25/0,2—50

Кремний, полученный методом бестигельной зонной плавки (индекс БК). 2Г1 ГКЭФ

Кремний, полученный методом гарнисажной плавки (индекс ГК).

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 с подготовленной 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 $\frac{0,8 \text{ SiO}_2}{0,05 \text{ Si}_3\text{N}_4}$
 $\frac{0,05 \text{ SiO}_2}{250 \text{ КЭФ } 0,01}$

Кремниевая структура с комбинированным диэлектриком, подложка толщиной 250 мкм из кремния марки КЭФ 0,01, нижняя пленка двуокиси кремния и средняя пленка нитрида кремния толщиной 0,05 мкм, верхняя пленка двуокиси кремния толщиной 0,8 мкм.

Табл. 5.2. Основные характеристики кремния, получаемого методом Чохральского

Группа марок	Марка	Подгруппа марок	Интервал номиналов удельного сопротивления, Ом·см	Допустимый разброс удельного сопротивления, % (не более)			Средняя плотность дислокаций, см ⁻² (не более или в пределах)	Тип электропроводности	Легирующий элемент	
				по слитку от номинала	по каждому из торцов слитка	по слитку от среднего значения				
1А	—	1	1—15	±15	Не более ±12	—	от 1·10 ³ до 2·10 ⁴	Э, Д	Фосфор, бор	
		2	1—15	±15	—	—	2·10 ³	Э, Д	То же	
		3	1—15	±20	—	—	от 1·10 ³ до 2·10 ⁴	Э, Д	«	
		4	1—15	±20	Не более ±12	—	2·10 ³	Э, Д	«	
		5	1—15	±20	—	—	10	Э, Д	«	
		6	1—15	±15	—	—	не более 10	Э, Д	«	
2А	—	1	15—25	±20	—	—	от 1·10 ³ до 2·10 ⁴	Э, Д	«	
		2	15—25	±15	—	—	2·10 ⁴	Э, Д	«	
2Б	—	1	25—45	±25	—	—	2·10 ⁴	Э, Д	«	
		2	25—45	±20	—	—	2·10 ⁴	Э, Д	«	
—	2В	1	40—75	±20	—	—	5·10 ⁴	Э	Фосфор	
		2	50—140	—	—	±30	5·10 ⁴	Э	То же	
—	2Г	1	60—120	—	—	±25	2·10 ⁴	Э	«	
		2	60—120	—	—	±25	2·10 ⁴	Э	«	
—	2Д	1	от 100 до 250	—	—	±30	5·10 ⁴	Э	«	
3А	—	1	от 0,005 до 1	±35	—	—	—	Д	Бор	
			от 0,005 до 1	±30	—	—	—	Д	То же	
		3	от 0,005 до 1	±15	—	—	—	5·10 ³	Э, Д	Фосфор, мышьяк, бор
			от 0,005 до 1	±10	—	—	—	5·10 ³	Э, Д	То же
			от 0,01 до 1	±20	—	—	—	10 ³	Э, Д	«
3Б	—	1	от 0,007 до 0,1	±25	—	—	5·10 ³	Э	Сурьма	
			от 0,007 до 0,1	±15	—	—	5·10 ³	Э	То же	
			от 0,007 до 0,1	±15	—	—	2·10 ²	Э	«	
			от 0,007 до 0,1	±10	—	—	5·10 ³	Э	«	
5А	—	1	от 3 до 18	±30	—	—	от 2·10 ³ до 5·10 ⁴	Э	Фосфор, Золото	

Табл. 5.3. Основные характеристики кремния, получаемого методом бестигельной зонной плавки

Группа марок	Марка	Подгруппа марок	Интервал номиналов удельного сопротивления, Ом·см	Допустимый разброс удельного сопротивления по слитку, % (не более)		Средняя плотность дислокаций, см ⁻² (не более или в пределах)	Тип электропроводности	Легирующий элемент	
				от номинала	от среднего значения				
1А	—	1	1—15	±15	—	от 2·10 ³ до 5·10 ⁴	Э, Д	Бор, фосфор	
		2	1—15	±20	—	от 2·10 ³ до 5·10 ⁴	Э, Д	То же	
		3	1—15	±25	—	5·10 ⁴	Э, Д	«	
2А	—	1	15—25	±20	—	5·10 ⁴	Э	Фосфор	
		2	15—25	±15	—	5·10 ⁴	Э	То же	
2Б	—	1	25—45	±20	—	10 ²	Э	«	
		2	25—45	±25	—	5·10 ⁴	Э	«	
—	2В	1	40—75	±25	—	5·10 ⁴	Э	«	
		2	40—75	±25	—	5·10 ⁴	Э	«	
—	2Г	1	от 50 до 140	—	±30	5·10 ⁴	Э	«	
		2	от 60 до 120	—	±25	5·10 ⁴	Э	«	
—	2Д	1	от 100 до 250	—	±30	5·10 ⁴	Э	«	
		2	от 100 до 250	—	±30	5·10 ⁴	Э	«	
—	2Е	1	от 500 и выше	—	±35	5·10 ⁴	Д	Бор	
		2	от 1000 и выше	—	±35	5·10 ⁴	Д	То же	
		3	от 1500 и выше	—	±35	5·10 ⁴	Д	Бор	
		4	от 2000 и выше	—	±35	5·10 ⁴	Д	То же	
3А	—	2Ж	от 1,5 до 3,5	—	±20	5·10 ⁴	Д	«	
			1	0,012—1	±20	—	2·10 ³ —5·10 ⁴	Э	Фосфор
			2	0,012—1	±15	—	2·10 ³ —5·10 ⁴	Э	То же
			3	0,012—1	±7	—	2·10 ³ —5·10 ⁴	Э	«
4А	—	1	0,012—1	±10	—	2·10 ³ —5·10 ⁴	Э	«	
			0,02—0,2	±25	—	—	Д	Алюминий	
			0,02—0,2	±20	—	—	Д	То же	
			3—18	±30	—	от 2·10 ³ до 5·10 ⁴	Э	Фосфор, Золото	

Табл. 5.4. Основные характеристики кремния, получаемого методом гарнисажной плавки

Марка	Подгруппа марок	Интервал номиналов удельного сопротивления, Ом·см	Допустимый разброс удельного сопротивления по слитку от среднего значения, % (не более)	Средняя плотность дислокаций, см ⁻² (не более)	Тип электропроводности	Легирующий элемент
2В	1	40—75	±20	5·10 ⁴	Э	Фосфор
2Г	1	50—140	±30	5·10 ⁴	Э	То же
	2	60—120	±25	5·10 ⁴	Э	«
2Д	1	100—250	±30	5·10 ⁴	Э	«
	2	250—500	±30	5·10 ⁴	Э	«

Табл. 5.5. Параметры кремниевых эпитаксиальных структур

Тип проводимости подложки	Нижний эпитаксиальный слой				Верхний эпитаксиальный слой					
	Тип проводимости	диапазон толщин, мкм	отклонение от номинального значения, %	диапазон удельных сопротивлений, Ом·см	отклонение от номинального значения, %	тип проводимости	диапазон толщин, мкм	отклонение от номинального значения, %	диапазон удельных сопротивлений, Ом·см	отклонение от номинального значения, %
n^+	n	0,5—6,5	± 10 ; ± 15	0,1—1,5	± 10 ; ± 15 ; ± 20	—	—	—	—	—
n^+	n_1	0,5—5	± 20	0,2—1	± 20	n_2	0,5—5	± 20	0,03—0,15	± 20
n^+	n	0,5—5	± 20	0,1—0,5	± 20	p	0,5—5	± 20	0,2—1	± 20
n^+	p	5—80	± 10	0,1—40	± 25	n, p	1,5—75	± 10 ; ± 15	0,03—10	± 15
n^+	n	5—80	± 10	0,1—20	± 25	n, p	1,5—75	± 10 ; ± 15	0,08—10	± 15
p^+	n	5—80	± 10	0,1—20	± 25	n, p	1,5—75	± 10 ; ± 15	0,03—10	± 15
p^+	p	5—80	± 10	0,1—10	± 25	n, p	1,5—75	± 10 ; ± 15	0,03—10	± 15

Кремниевые эпитаксиальные структуры. Для производства полупроводниковых ИМС широко используются эпитаксиальные кремниевые структуры. Кристаллическая структура эпитаксиального слоя представляет собой высокосовершенный 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*. Номенклатура типономиналов одно- и двухслойных кремниевых эпитаксиальных структур, выпускаемых промышленностью, приведена в табл. 5.5.

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

5 КДБ 0,03
60 —————
80 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 дырочный) 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. Поперечный разрез кремниевой эпитаксиальной структуры со скрытым n^+ -слоем изображен на рис. 5.17. Параметры структур представлены в табл. 5.6.

Пример условного обозначения

10 КЭФ 4,5/3,5 КЭС 25
60 —————
320 КДБ 10 (111)

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 марки КЭС (легирован сурьмой) 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).

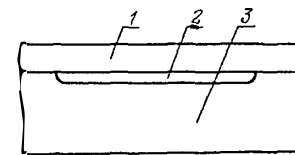


Рис. 5.17. Кремниевая эпитаксиальная структура со скрытым слоем:

1 — эпитаксиальный слой n -типа, 2 — скрытый n^+ -слой, 3 — подложка p -типа.

Табл. 5.6. Параметры кремниевых эпитаксиальных структур со скрытыми слоями

Параметры структур	Значение
Диаметр эпитаксиальной структуры, мм	40; 60
Толщина эпитаксиальной структуры, мкм:	
диаметром 40 мм	300
диаметром 60 мм	350
Толщина эпитаксиального слоя, мкм	6,1—15
Допустимое отклонение толщины эпитаксиального слоя от номинала, %	± 10
Удельное сопротивление эпитаксиального слоя, Ом·см	0,15—5
Толщина скрытого слоя, мкм	2,5; 3,5; 3,5; 5,0; 7; 10
Поверхностное сопротивление скрытого n^+ -слоя, Ом/кв	15; 20; 25; 30; 40; 50

Номенклатура типономиналов кремниевых эпитаксиальных структур со скрытыми слоями, выпускаемых промышленностью, представлена в табл. 5.7.

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.

Табл. 5.7. Номенклатура кремниевых эпитаксиальных структур со скрытыми слоями

Материал подложки	Легирующий элемент скрытого слоя	Эпитаксиальный слой				
		легирующий элемент	толщина		Удельное сопротивление	
			диапазон, мкм	отклонение от номинального значения, %	диапазон, Ом·см	отклонение от номинального значения, %
КДБ 10	As, Sb	P	0,5—3,5	±15	0,1—1,5	±15; ±20
	As, Sb	P, As	2,5—6	±10	0,1—1,5	±15; ±20
	Sb	P	6,1—15	±10	0,15—5	±15; ±20
	As	P	6—13	±10	0,1—2	±10; ±20
	As, Sb	P	1—20	±10	3,7	±25
	Sb, B	As	2—8	±10	0,3—1,5	±15; ±20

Пример условного обозначения

КСКД $\frac{0,5 \text{ SiO}_2}{0,05 \text{ Si}_3\text{N}_4}$
 $\frac{0,05 \text{ SiO}_2}{2 \text{ КЭФ } 1 \cdot 10^{16}}$
 250 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 $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 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 *p*-типа электропроводности) или 0,6; 0,8; 1,2 мкм (для кремния *n*-типа электропроводности). Кристаллографическая ориентация гетероэпитаксиальных слоев — (100). Диаметр структур составляет 40 или 60 мм.

Пример условного обозначения

КНС $\frac{0,8 \text{ КЭФ } 40}{60 \text{ С } 250}$

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. Возможные варианты структур изображены на рис. 5.18. Параметры структур приведены в табл. 5.8.

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

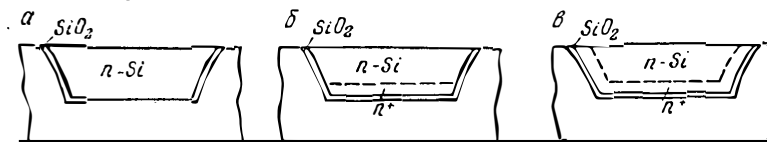


Рис. 5.18. Кремниевая структура с диэлектрической изоляцией элементов: а — без скрытого слоя; б — со скрытым слоем, не выходящим на поверхность; в — со скрытым слоем, выходящим на поверхность.

Табл. 5.8. Параметры кремниевых структур с диэлектрической изоляцией

Параметры КСДИ	Значение
Диаметр структуры	40; 60
Толщина структуры, мкм:	
диаметром 40 мм	200±10
диаметром 60 мм	300±10
Толщина изолированной монокристаллической области, мкм:	
без <i>n</i> ⁺ -слоем	7—20; 10—15
с <i>n</i> ⁺ -слоем, легированным фосфором	15—25
с <i>n</i> ⁺ -слоем, легированным мышьяком	10—22; 15—25
Толщина <i>n</i> ⁺ -слоя, мкм:	
легированного фосфором	8,5±1,5
легированного мышьяком	5±1
Толщина изолирующего оксида, мкм	1,5—3,5

M 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 $\frac{25 \text{ КЭФ } 4,5(111) [n^+ - M]}{300 \text{ SiO}_2 1,5 - 3,5}$

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, легированный мышьяком. Толщина структуры 300 мкм, монокристаллические области изолированы двуокисью кремния толщиной 1,5—3,5 мкм.

Монокристаллический арсенид галлия. Основные параметры монокристаллического арсенида галлия приведены в табл. 5.9.

Табл. 5.9. Параметры монокристаллического арсенида галлия

Марка материала	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Подвижность носителей заряда, см ² /(В·с)	Кристаллографическая ориентация
АГЭ	1·10 ¹⁵ — 2·10 ¹⁷	(4—6)·10 ³	(111)
АГЭТ	2·10 ¹⁷ — 1·10 ¹⁹	(1,5—3,8)·10 ³	(111)
АГДЦ	1·10 ¹⁸ — 1,5·10 ²⁰	30—90	(111)
АГП	1·10 ⁵	—	—
ЭАГЭТ10-18	6·10 ¹⁸	1400	(111)
ЭАГЭТ5-18	2·10 ¹⁸	1600	(100), (111)
ЭАГЭТ14,5-17	7·10 ¹⁷ — 2·10 ¹⁸	2800	(100), (111)
ЭАГЭТ5,5-17	4·10 ¹⁷ — 7·10 ¹⁷	3200	(100), (111)
ЭАГЭС5,5-17	4·10 ¹⁷ — 7·10 ¹⁷	2900	(100), (111)
ЭАГЭТ3-17	1·10 ¹⁷ — 5·10 ¹⁷	3600	(100), (111)
ЭАГЭ03-17	1·10 ¹⁷ — 5·10 ¹⁷	3400	(100), (111)
ЭАГЭ01-17	8·10 ¹⁶ — 2·10 ¹⁷	3600	(111)
ЭАГЭ04-16	3·10 ¹⁶ — 8·10 ¹⁶	3800	(111)
ЭАГЭ02-16	1·10 ¹⁶ — 3·10 ¹⁶	4300	(111)
ЭАГЭ01-16	1·10 ¹⁶	4500	(111)
ЭАГЭ014,5-17	7·10 ¹⁷ — 2·10 ¹⁸	1800	(100), (111)

Условное обозначение монокристаллического арсенида галлия включает в себя сокращенное наименование материала (буквы АГ), тип электропроводности (индексы: Э — электронный, Д — дырочный, П — полупроводящий), обозначение легирующего элемента (Т — 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.

6. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ. КОНТАКТЫ МЕТАЛЛ — ПОЛУПРОВОДНИК

6.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Распределение примесей при диффузии. Электронно-дырочные переходы создаются в основном тремя методами: диффузией и ионной имплантацией примесей, а также путем эпитаксиального наращивания полупроводникового материала на подложку.

При эпитаксиальном наращивании принципиально может быть обеспечен любой профиль распределения концентрации примесей в эпитаксиальном слое (необходимо, однако, принимать во внимание возможности технологии). При диффузии и ионной имплантации профиль распределения концентрации примесей ограничен физическими законами.

Используются два способа диффузии примесей в полупроводник: из неограниченного и ограниченного источников диффузанта.

Если диффузия осуществляется из неограниченного внешнего источника, то распределение концентрации примесей описывается функцией дополнения интеграла ошибок

$$N(x, t) = N_S \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = N_S \operatorname{erfc} z, \quad (6.1)$$

где N — концентрация диффундирующей примеси по глубине диффузионного слоя x в момент времени t ; N_S — поверхностная концентрация примеси; D — коэффициент диффузии.

В табл. 6.1 приведены значения функции $\operatorname{erfc} z$ в интервале значений аргумента z от 0 до 3,90, а на рис. 6.1 она представлена в полулогарифмическом и линейном масштабах.

При расчете профиля распределения примесей поверхностная концентрация примеси N_S принимается равной максимальной растворимости N_{\max} данной примеси в полупроводнике при температуре процесса диффузии. Для кремния соответствующие данные могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 6.2.

Табл. 6.1. Функция дополнения интеграла ошибок $\operatorname{erfc} z$

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

Коэффициент диффузии атомов примеси в полупроводнике зависит от температуры проведения процесса и может быть рассчитан согласно выражению

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (6.2)$$

где D_0 — постоянная, зависящая от свойств примеси и полупроводника; ΔE — энергия активации атомов примеси; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

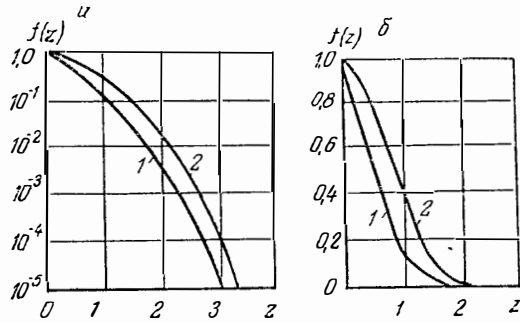


Рис. 6.1. Функции $\operatorname{erfc} z$ (1) и $\exp(-z^2)$ (2):
а — в полулогарифмическом масштабе; б — в линейном масштабе.

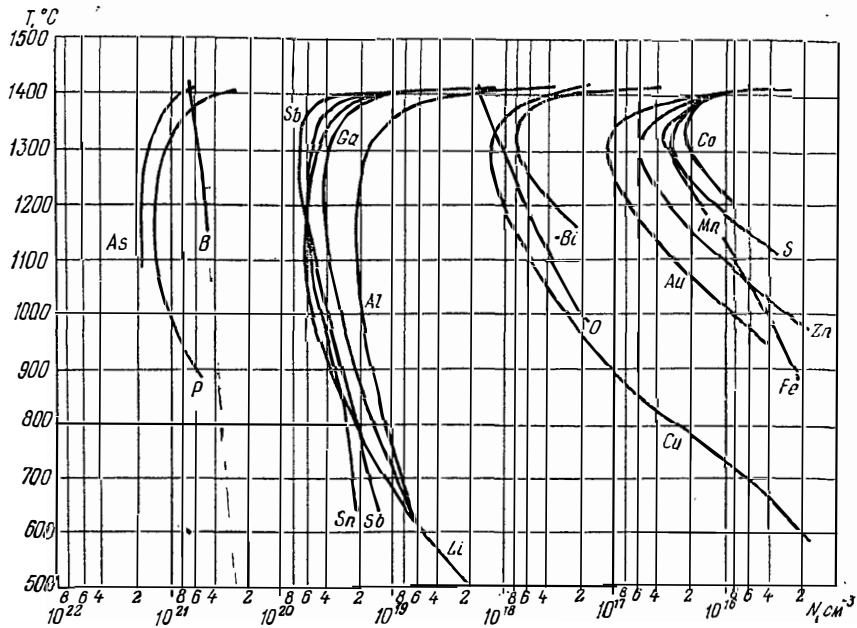


Рис. 6.2. Растворимость атомов примесей в кремнии при различной температуре.

Величины D_0 , ΔE и N_{\max} определяются экспериментально, соответствующие данные для некоторых примесей в кремнии и арсениде галлия приведены в табл. 6.2, 6.3, а также на рис. 6.3 и 6.4.

Табл. 6.2. Коэффициенты диффузии, энергия активации и растворимость примесей в кремнии

Элемент	D_0 , см ² /с	ΔE , эВ	N_{\max} при 1300°C, см ⁻³	Элемент	D_0 , см ² /с	ΔE , эВ	N_{\max} при 1300°C, см ⁻³
B	11,5	3,7	10 ²⁰	Li	2,5 · 10 ⁻³	0,66	5 · 10 ¹⁹
Al	10	3,5	10 ¹⁹	Zn	—	—	5,5 · 10 ¹⁶
Ga	3,3	3,5	10 ¹⁹	Fe	8 · 10 ⁻³	0,9	2,5 · 10 ¹⁶
In	16	3,9	10 ¹⁹	Cu	—	—	1,3 · 10 ¹⁹
Te	16	3,9	10 ¹⁷	Au	9,5 · 10 ⁻³	1,1	1 · 10 ¹⁶
P	1400	4,4	10 ²⁰	H	9,6 · 10 ⁻³	0,48	—
As	0,44	3,6	—	O	—	3,5	—
Sb	4,0	3,9	10 ²⁰				
Bi	770	4,6	10 ¹⁷				

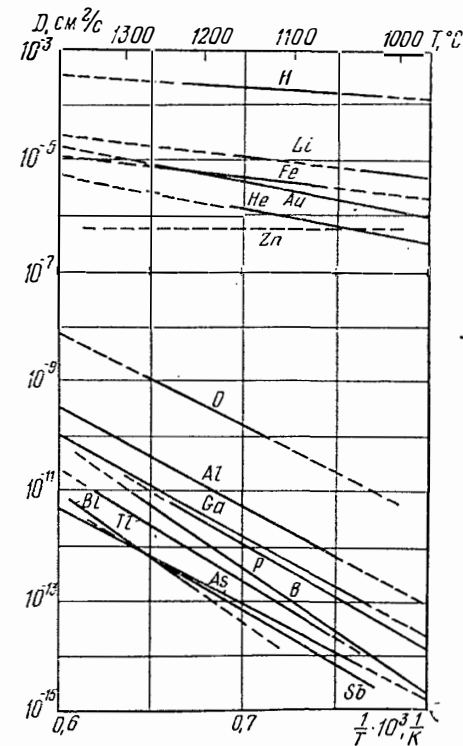


Рис. 6.3. Зависимость коэффициентов диффузии атомов примесей в кремнии от температуры.

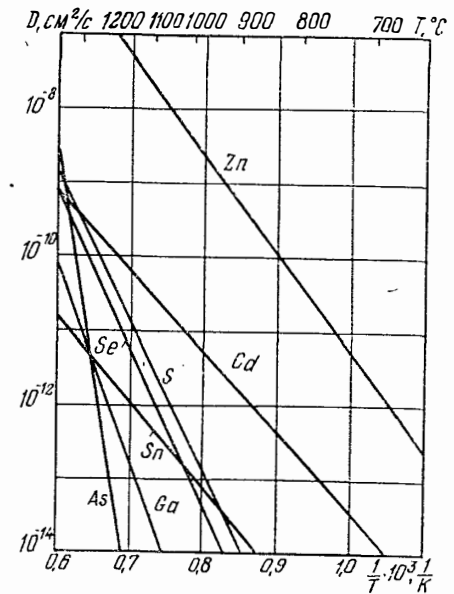


Рис. 6.4. Зависимость коэффициентов диффузии атомов примесей в арсениде галлия от температуры.

Табл. 6.3. Коэффициенты диффузии, энергия активации и растворимость примесей в арсениде галлия

Элемент	D_0 , см ² /с	ΔE , эВ	N_{\max} при 1150°C, см ⁻³	Элемент	D_0 , см ² /с	ΔE , эВ	N_{\max} при 1150°C, см ⁻³
Te	$2,6 \cdot 10^{-5}$	2,0	—	Cd	$1,3 \cdot 10^{-2}$	2,43	10^{21}
S	$4 \cdot 10^3$	2,8	—	Ge	$3 \cdot 10^{-5}$	1,8	$2 \cdot 10^{20}$
Se	$3 \cdot 10^3$	4,16	—	Au	$1 \cdot 10^{-3}$	1,1	—
Sn	$6 \cdot 10^{-4}$	2,5	$2 \cdot 10^{20}$	Ag	$4 \cdot 10^{-4}$	0,8	—
Zn	$8 \cdot 10^{-5}$	1,5	$> 10^{20}$	Li	0,53	1	—

Выражение (6.2) не учитывает влияния на коэффициент диффузии степени легирования исходного полупроводника и поверхностной концентрации диффундирующей примеси. На рис. 6.5 и 6.6 показано, что возрастание этих факторов ведет к увеличению коэффициента диффузии. Если диффузия осуществляется из поверхностного источ-

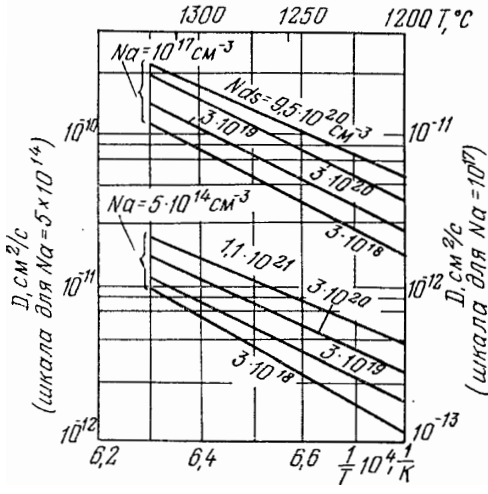


Рис. 6.5. Зависимость коэффициента диффузии атомов фосфора в кремнии от температуры, концентрации акцепторной примеси (бора) и поверхностной концентрации фосфора.

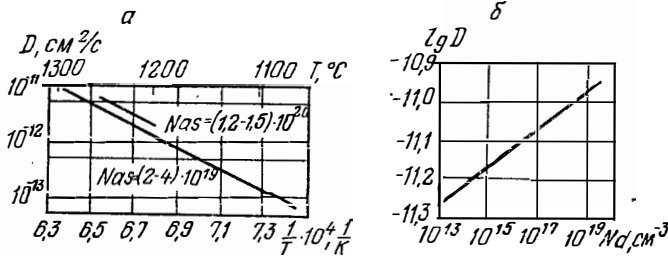


Рис. 6.6. Зависимость коэффициента диффузии атомов бора в кремнии: а — от температуры и поверхностной концентрации бора при концентрации фосфора в исходном материале $N_d = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³; б — от концентрации N_d при 1250 °C и $N_{sa} = 2 \cdot 10^{21}$ см⁻³.

ника с ограниченным количеством примеси, закон распределения примесных атомов в полупроводнике описывается экспоненциальной функцией (функция Гаусса):

$$N(x, t) = N'_s \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) = N'_s \exp(-z^2). \quad (6.3)$$

Функция $\exp(-z^2)$ представлена в полулогарифмическом и линейном масштабах на рис. 6.1.

Поверхностная концентрация N'_s в выражении (6.3) не является постоянной величиной и зависит от нескольких факторов:

$$N'_s = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}, \quad (6.4)$$

где Q — количество примесных атомов на единицу площади бесконечно тонкого поверхностного слоя, из которого ведется диффузия.

Тонкий слой, насыщенный атомами примеси, создается обычно путем проведения диффузии первоначально из источника с неограниченным количеством примеси. Интегрируя выражение (6.1) в интервале значений $0 \leq x \leq \infty$, получим

$$Q = \frac{2N_s}{\pi} \sqrt{D_1 t_1}, \quad (6.5)$$

где D_1 и t_1 — коэффициент диффузии и время ее проведения на первой стадии «загонки» примеси в тонкий полупроводниковый слой.

Учитывая выражения (6.3), (6.4) и (6.5), получим выражение для распределения атомов примеси в полупроводнике для случая двухстадийной диффузии

$$N(x, t) = \frac{2N_s}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right), \quad (6.6)$$

где D_2 и t_2 — коэффициент диффузии и время ее проведения на второй стадии «разгонки» примеси из тонкого слоя.

Уравнение (6.6) справедливо при условии $D_2 t_2 \gg D_1 t_1$. Если это условие не выдерживается, то нельзя считать, что на второй стадии диффузия идет из ограниченного источника. В этом случае для расчета профиля распределения примесей необходимо пользоваться выражением

$$N(x, t) = \frac{2N_s}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-m^2) \operatorname{erf}(am) dm}{\sqrt{\beta}}, \quad (6.7)$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}}$ и $\beta = \frac{x^2}{4(D_1 t_1 + D_2 t_2)}$.

Значения интеграла в выражении (6.7) приведены в табл. 6.3. для различных величин α и β .

Получение электронно-дырочных переходов при изготовлении ИМС осуществляется обычно путем локальной диффузии примесей через отверстия в окисной маске. При этом диффузия происходит не только в глубь полупроводниковой пластинки, но и параллельно границе раздела окисная пленка — полупроводник. На рис. 6.7 показано распределение концентраций примесных атомов у края окисной маски.

Параметр C определяется для первого случая как $C = \left(\frac{N_s}{N_0}\right)^{-1}$

и для второго случая как $C = \left(\frac{N'_s}{N_0}\right)^{-1}$, где N_0 — концентрация примеси в исходном полупроводниковом материале, в который проводится

Табл. 6.4. Значения интеграла для расчета профиля распределения примесей

$\alpha \backslash \beta$	0,6	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5
0,1	0,09015	0,08155	0,07376	0,06035	0,03655	0,01340	0,00491	0,00066
0,2	0,17838	0,16119	0,14566	0,11894	0,07167	0,02603	0,00945	0,00125
0,3	0,26295	0,23723	0,21403	0,17422	0,10416	0,03725	0,01333	0,00174
0,4	0,34254	0,30837	0,27761	0,22501	0,13314	0,04668	0,01640	0,00204
0,5	0,41626	0,37374	0,33557	0,27058	0,15812	0,05419	0,01866	0,00224
0,6	0,48366	0,43290	0,38751	0,31062	0,17900	0,05988	0,02021	0,00236
0,7	0,54464	0,48580	0,43340	0,34515	0,19596	0,06398	0,02120	0,00242
0,8	0,59940	0,53264	0,47347	0,37447	0,20940	0,06680	0,02180	0,00244
0,9	0,64829	0,57380	0,50812	0,39903	0,21979	0,06867	0,02213	0,00245
1,0	0,69176	0,60975	0,53784	0,41935	0,22765	0,06985	0,02231	0,00246
1,5	0,84509	0,72899	0,63065	0,47586	0,24431	0,07141	0,02247	0,00246
2,0	0,92838	0,78491	0,66833	0,49303	0,24682	0,07147	0,02247	0,00246
3,0	0,99920	0,82694	0,68698	0,49825	0,24708	0,07147	0,02247	0,00246
∞	1,02843	0,82795	0,68692	0,49843	0,24709	0,07147	0,02247	0,00246

диффузия. Положение электронно-дырочного перехода может быть определено по формулам:

$$x_j = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad \text{и} \quad y_j = \frac{y}{2\sqrt{Dt}},$$

где x и y определяются из графиков рис. 6.7 для конкретных значений C .

Распределение примесей при ионном внедрении.

Имплантированные полупроводниковые кристаллы с исходной концентрацией примеси N_0 приводит к распределению внедренных ионов, описываемому функцией Гаусса:

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \pm N_0, \quad (6.8)$$

где Q — количество внедренных ионов на единице поверхности, ион/см²; R_p и ΔR_p — средний нормальный пробег и его дисперсия; x — координата в направлении первоначальной скорости иона.

Количество внедренных ионов на единице поверхности кристалла зависит от плотности ионного тока и длительности облучения и рассчитывается по выражению

$$Q = 6,25 \cdot 10^{18} \frac{j t^n}{n}. \quad (6.9)$$

В выражении (6.9) j — плотность полного тока, А/см²; t — время облучения, с; $n=1, 2, 3$ — кратность ионизации. Произведение $j t$ называется дозой облучения и измеряется обычно в мкКл/см². В этом случае формула (6.9) принимает вид

$$Q = 6,25 \cdot 10^{12} \frac{j t}{n}.$$

Величины средних нормальных пробегов и дисперсии пробега ионов некоторых элементов в кремнии приведены в табл. 6.4 (значения R_p и ΔR_p даны в нанометрах).

В отличие от диффузии ионная имплантация примесей создает максимальную концентрацию не на поверхности, а на глубине $x=R_p$

$$N_{\max} = 0,4 \frac{Q}{\Delta R_p}.$$

Приведем значения $\frac{N(x)}{N_{\max}}$ для ряда отношений $\frac{x - R_p}{\Delta R_p}$ согласно выражению (6.8).

$\pm \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)$	1,2	2	3	3,7	4,3	4,8	5,3	5,7
$\frac{N(x)}{N_{\max}}$	0,5	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

Табл. 6.5. Пробеги и дисперсии пробегов ионов в кремнии

E_0 , кэВ	Величина пробега и дисперсии	¹¹ B	¹⁴ N	³¹ P	⁷⁵ As	¹²¹ Sb
10	R_p	41	30	16	11	10,5
	ΔR_p	19	15	8	5	4
20	R_p	79	58	28,5	18	16
	ΔR_p	32	25	13	7	6
40	R_p	153	115	53	30	25
	ΔR_p	50	43	22	11,5	9
100	R_p	344	276	132	62	49
	ΔR_p	83	78	46	22	16
200	R_p	595	504	269	116	87
	ΔR_p	110	113	82	37	26
300	R_p	800	697	404	173	118
	ΔR_p	124	134	112	52	53

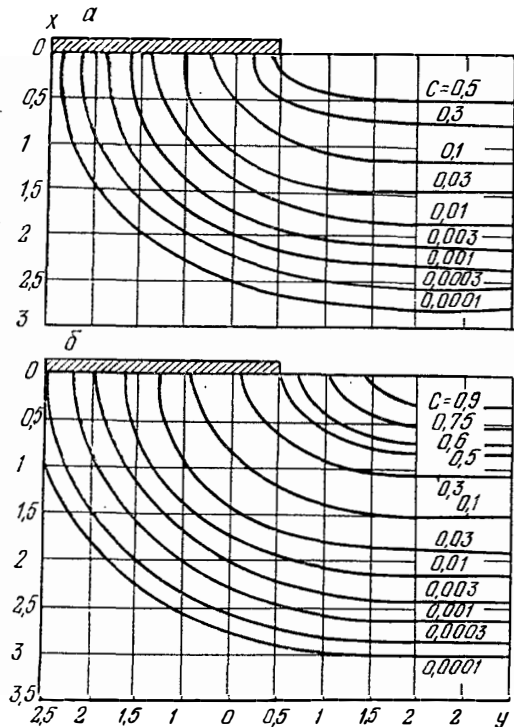


Рис. 6.7. Распределение концентрации примеси у края диффузионной маски: a — при диффузии из неограниченного источника примеси; b — при диффузии из тонкого поверхностного слоя.

Уравнение (6.8) обеспечивает погрешность в расчете распределения примесей не более 10% при условии $R_p \geq 1,65 \Delta R_p$. Если $R_p \leq 3 \Delta R_p$, необходимо пользоваться следующей формулой:

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{\frac{\pi}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{R_p}{\sqrt{2} \Delta R_p}\right)}} \Delta R_p \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \pm N_0.$$

Эффекты каналирования ионов в ориентированных кристаллах, распыления полупроводника ионами, ускоренной диффузии при больших дозах облучения и другие могут привести к тому, что реальное распределение примесей в результате ионной имплантации будет отличаться от расчетного.

6.2. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Контактная разность потенциалов p - n -перехода определяется по формуле

$$\Phi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p n_n}{n_i^2} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}, \quad (6.10)$$

где k — константа Больцмана; T — абсолютная температура; q — заряд электрона; n_i — концентрация носителей заряда в полупроводнике с собственной проводимостью (рис. 6.8); p_p и n_n или N_a и N_d — концентрации носителей заряда или соответственно акцепторов и доноров на границах области пространственного заряда (ОПЗ) p - n -перехода.

В то время как расчет контактной разности потенциалов для резких (сплавных, эпитаксиальных) p - n -переходов не представляет трудности, для плавных (диффузионных, имплантационных) p - n -переходов такой расчет достаточно сложен, в частности, в связи с необходимостью определения границ ОПЗ.

На рис. 6.9 графически представлены зависимости контактной разности потенциалов плавных p - n -переходов в кремнии и арсениде галлия от градиента концентрации примесей. Если известна глубина залегания p - n -перехода x_j и соотношение концентраций примеси на поверхности N_s и в исходном кремнии N_0 , можно воспользоваться графиками, изображенными на рис. 6.10 (пунктиром даны значения Φ_k для резких p - n -переходов с соответствующим отношением концентраций N_s/N_0).

Для p - n -переходов с распределением концентрации примесей, соответствующим законам $\operatorname{erfc} z$ или функции Гаусса, используют, как правило, линейную аппроксимацию распределения концентрации примесей. При таком допущении контактная разность потенциалов переходов, полученных диффузией, может быть найдена из выражения

$$\Phi_k^{-1/2} \exp \frac{m^* q \Phi_k}{kT} = N_0 \left(\frac{2b^2}{x_j n_i^2} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{q}} \right)^{1/2}, \quad (6.11)$$

где m^* — параметр, определяемый по табл. 6.6; x_j — глубина залегания электронно-дырочного перехода; ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника; b — параметр, определяемый в случае распределения концентрации примесей по закону Гаусса, как

$$b = \sqrt{\frac{N_s}{\ln \frac{N_s}{N_0}}}, \quad (6.12)$$

где N_0 — концентрация в исходном полупроводниковом материале, в который проводится диффузия. В случае распределения концентрации примесей по закону $\operatorname{erfc} z$ параметр b определяется из выражения

$$\operatorname{erfc} b = \frac{N_s}{N_0}. \quad (6.13)$$

На рис. 6.11 представлены рассчитанные, согласно выражению (6.11), значения контактной разности потенциалов для переходов, полученных диффузией.

Рис. 6.12 иллюстрирует зависимость контактной разности потенциалов диффузионных переходов от температуры для случая $\frac{N_s}{N_0} = 10^4$.

Ширина области пространственного заряда p - n -перехода определяет границы собственно p - n -перехода. Поэтому ее называют также просто шириной p - n -перехода.

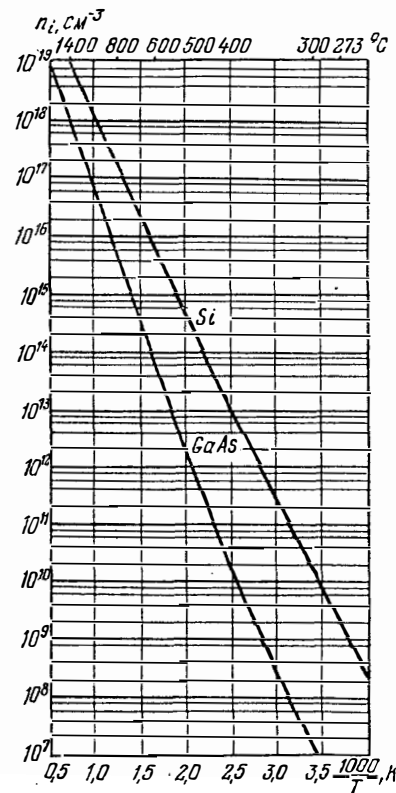


Рис. 6.8. Зависимость концентрации носителей в собственных кремнии и арсениде галлия от температуры.

Табл. 6.6. Значения параметра m^*

N_s/N_0	m^*
10^7	0,649
10^8	0,651
10^9	0,656
10^4	0,663
10^3	0,667

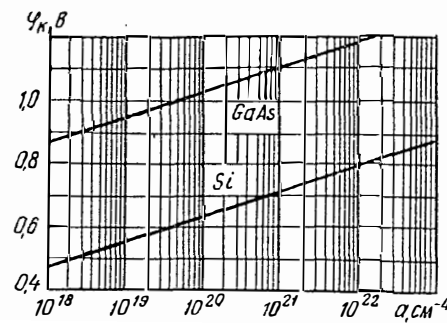


Рис. 6.9. Зависимость контактной разности потенциалов плавных p - n -переходов в кремнии и арсениде галлия от градиента концентрации примесей.

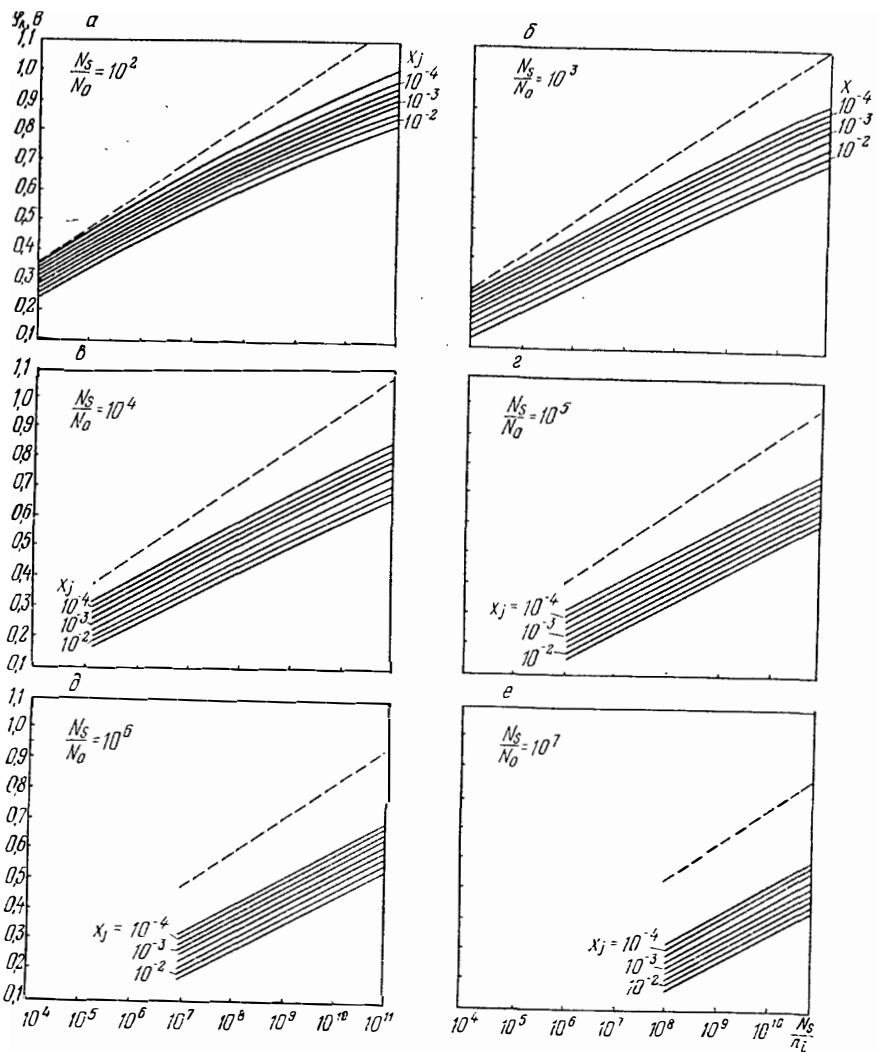


Рис. 6.10. Зависимости контактной разности потенциалов диффузионных $p-n$ -переходов в кремнии от поверхностной концентрации и глубины залегания перехода:

а — при $N_S/N_0=10^2$; б — при $N_S/N_0=10^3$;
 в — при $N_S/N_0=10^4$; г — при $N_S/N_0=10^5$;
 д — при $N_S/N_0=10^6$; е — при $N_S/N_0=10^7$.
 (Глубина перехода приведена для значений $x_j=1, 2, 5 \times 10^{-4}$ см.)

Для резкого $p-n$ -перехода со ступенчатым изменением концентрации примесей ширина ОПЗ определяется по формуле

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 U_{\text{полн}}(N_a + N_d)}{qN_a N_d}}, \quad (6.14)$$

где N_a, N_d — концентрации примесей в p - и n -областях перехода соответственно; $U_{\text{полн}}$ — полное напряжение на переходе, определяемое по формуле

$$U_{\text{полн}} = -(U - \varphi_K). \quad (6.15)$$

Величина U в формуле (6.15) представляет собой приложенное к переходу напряжение, которое при прямом смещении перехода подставляет

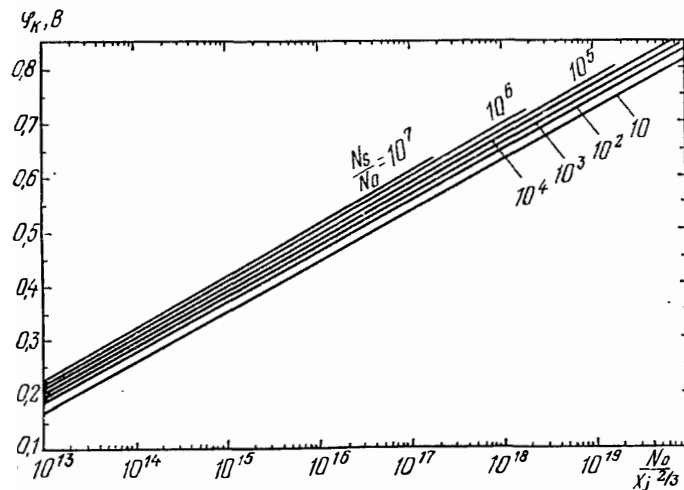


Рис. 6.11. Зависимость контактной разности потенциалов диффузионных $p-n$ -переходов в кремнии от концентрации примеси в исходном материале и глубины залегания переходов.

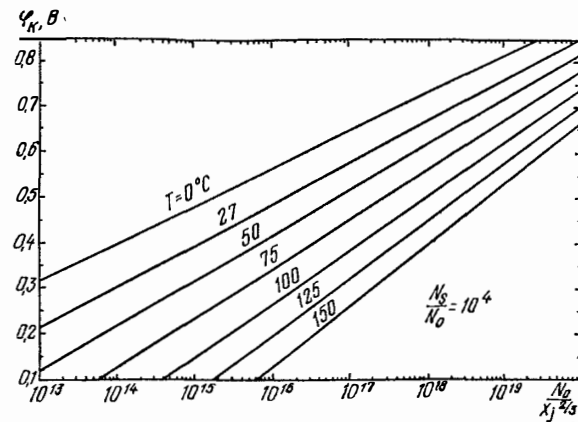


Рис. 6.12. Зависимость контактной разности потенциалов диффузионных $p-n$ -переходов в кремнии от концентрации примеси в исходном материале, глубины залегания переходов и температуры при $N_S/N_0=10^4$.

ся в эту формулу со знаком плюс, а при обратном смещении — со знаком минус.

Для плавных $p-n$ -переходов ширина ОПЗ может быть найдена из выражения

$$d = \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0 U_{\text{полн}}}{qa}}, \quad (6.16)$$

где a — градиент концентрации примесей в диффузионном переходе, ко-

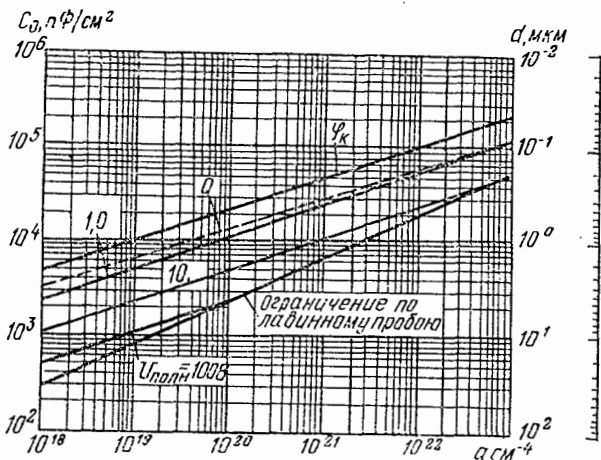


Рис. 6.13. Зависимость ширины ОПЗ и удельной емкости плавных $p-n$ -переходов в кремнии от градиента концентрации примесей и напряжения на переходе.

торый при экспоненциальной аппроксимации распределения концентрации примеси определяется согласно следующему выражению:

$$a = \frac{N'_s}{2Dt} x_j \exp\left(-\frac{x_j^2}{4Dt}\right). \quad (6.17)$$

Если примесь распределяется в соответствии с функцией дополнения интеграла ошибок, то

$$a = \frac{2Nsb}{x_j\pi} \exp(-b^2), \quad (6.18)$$

где параметр b определяется по формуле (6.13).

На рис. 6.13 представлена зависимость ширины ОПЗ от градиента концентрации примесей в плавных (линейная аппроксимация) $p-n$ -переходах в кремнии.

Ширину ОПЗ в кремниевых плоском, цилиндрическом и сферическом $p-n$ -переходах с распределениями концентрации примесей, соответствующими функции Гаусса и функции дополнения интеграла ошибок, можно определить по графикам, представленным на рис. 6.14 и 6.15. Символом x_j обозначены глубина залегания плоского или радиусы цилиндрического и сферического $p-n$ -переходов. Поскольку ОПЗ распространяется как в слабо-, так и в сильнолегированную области полупроводника, ширина ОПЗ представляет собой сумму $d=d_1+d_2$, где d_1 — часть ОПЗ, приходя-

щаяся на более сильнолегированную область. Величина d_1 может быть найдена из графиков на рис. 6.16 и 6.17.

Максимальная напряженность электрического поля в диффузионных $p-n$ -переходах с указанными распределениями концентрации примесей может быть определена по графикам на рис. 6.18 и 6.19.

Зарядная емкость $p-n$ -перехода может быть рассчитана по формуле

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}, \quad (6.19)$$

где S — площадь перехода; d — ширина ОПЗ перехода.

На рис. 6.20 представлены зависимости ширины ОПЗ и удельной за-

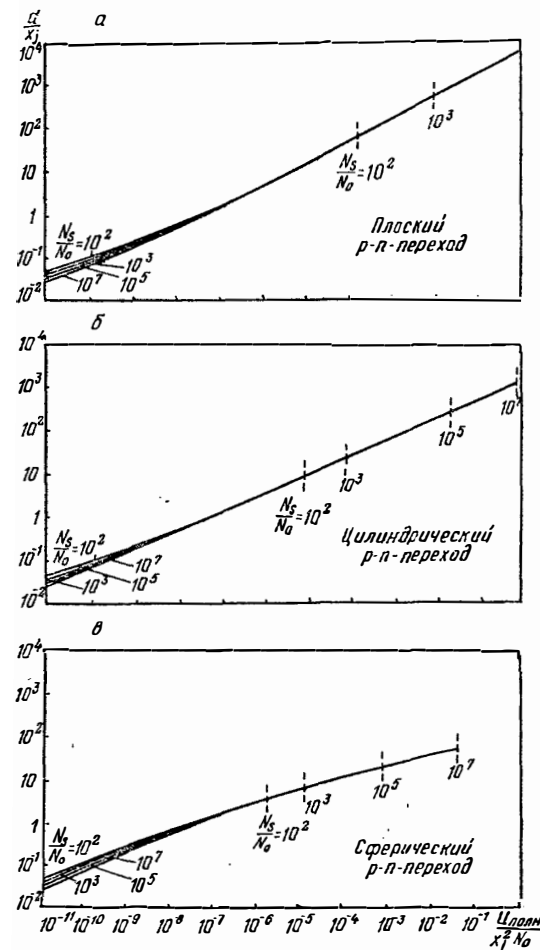


Рис. 6.14. Зависимость ширины ОПЗ переходов с изменением профиля концентрации примесей по закону Гаусса от полного напряжения на переходе, глубины залегания $p-n$ -перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

а — плоский $p-n$ -переход; б — цилиндрический $p-n$ -переход; в — сферический $p-n$ -переход. (Пунктирные линии указывают предельные полные напряжения, при которых обедненная область достигает поверхности.)

рядной емкости $C_0 = C/S$ кремниевых $p-n$ -переходов, полученных диффузией, от полного напряжения на переходе, отнесенного к исходной концентрации примесей в полупроводнике. Кривыми можно пользоваться при обоих видах распределения примеси в диффузионных переходах и при значительных обратных напряжениях на переходе.

Если необходимо получить данные о емкости $p-n$ -перехода при приложенных к нему напряжениях, близких к нулю, целесообразно пользоваться графиками, изображенными на рис. 6.21. Характеристическая длина L при этом определяется как

$$L = \frac{l^2}{2x_j} \quad (6.20)$$

где l находится из выражений:

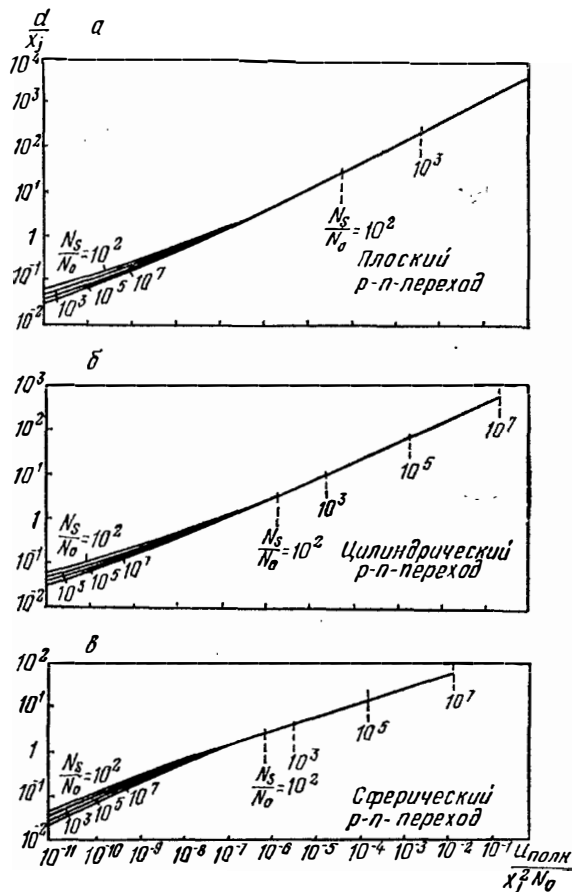


Рис. 6.15. Зависимость ширины ОПЗ переходов с изменением профиля концентрации примесей согласно функции дополнения интеграла ошибок от полного напряжения на переходе, глубины залегания $p-n$ -перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

a — плоский $p-n$ -переход; $б$ — цилиндрический $p-n$ -переход; $в$ — сферический $p-n$ -переход.

(Пунктирные линии указывают предельные полные напряжения, при которых обедненная область достигает поверхности.)

$$l^2 = \frac{x_j^2}{\ln(N_s/N_0)}$$

для распределения концентрации примеси согласно функции Гаусса;

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{x_j}{l}\right) = \frac{N_0}{N_s}$$

для распределения концентрации примеси согласно функции дополнения интеграла ошибок.

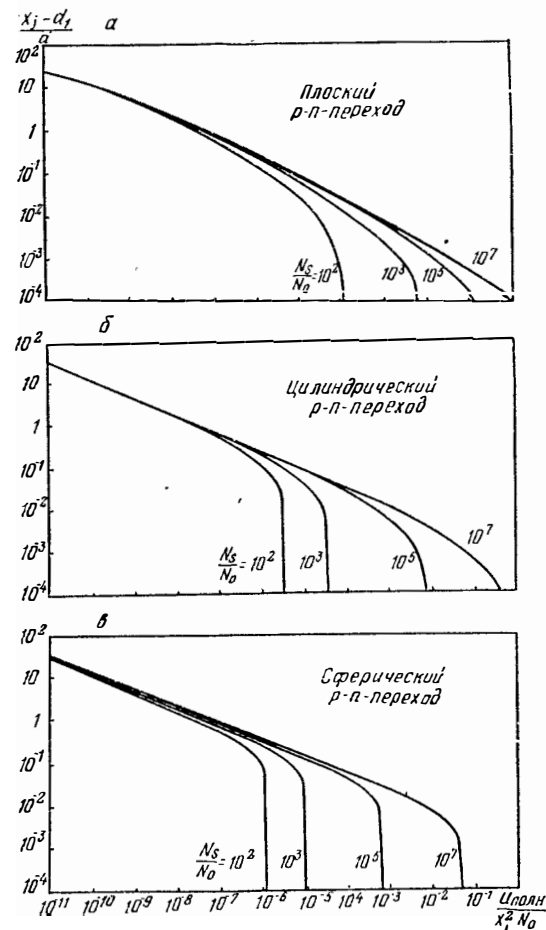


Рис. 6.16. Зависимость ширины доли ОПЗ, расположенной в более сильнолегированной области $p-n$ -перехода с изменением профиля концентрации примесей по закону Гаусса, от полного напряжения на переходе, глубины залегания перехода, ширины перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

a — плоский $p-n$ -переход; $б$ — цилиндрический $p-n$ -переход; $в$ — сферический $p-n$ -переход.

На рис. 6.22 и 6.23 представлены графики, позволяющие найти удельные зарядные емкости плоского $C_{оп}$ (Ф/см²) и цилиндрического $C_{оц}$ (Ф/см), а также полную емкость сферического $C_{оэф}$ (Ф) $p-n$ -переходов в зависимости от полного напряжения на переходе $U_{полн}$, глубины залегания x_j (радиусов цилиндрического и сферического) перехода и соотношения концентраций примесей на поверхности диффузионной области N_S и в исходном полупроводнике N_0 .

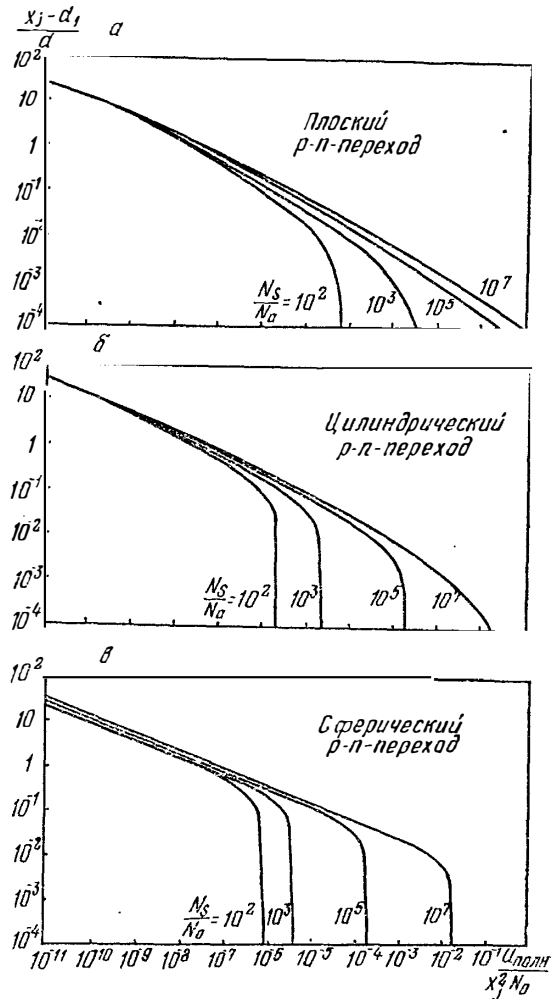


Рис. 6.17. Зависимость ширины зоны ОПЗ, расположенной в более сильнолегированной области $p-n$ -перехода с изменением профиля концентрации примесей согласно функции дополнения интеграла ошибок, от полного напряжения на переходе, глубины залегания перехода, ширины перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

a — плоский $p-n$ -переход; $б$ — цилиндрический $p-n$ -переход; $в$ — сферический $p-n$ -переход.

Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода описывается выражением

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{U}{m\Phi_T} \right) - 1 \right], \quad (6.21)$$

где $\Phi_T = \frac{kT}{q}$ — температурный потенциал; I_0 — начальный ток (называемый иногда током насыщения); U — приложенное напряжение; m — коэффициент «неидеальности» экспоненты, учитывающий про-

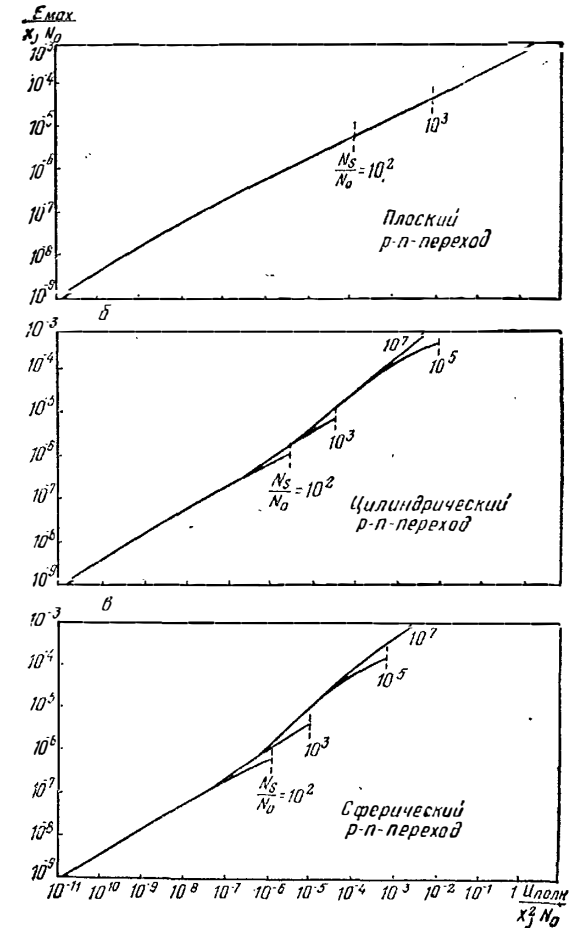


Рис. 6.18. Зависимость максимальной напряженности электрического поля в диффузионных $p-n$ -переходах с изменением профиля концентрации примесей по закону Гаусса от полного напряжения на переходе, глубины залегания перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

a — плоский $p-n$ -переход; $б$ — цилиндрический $p-n$ -переход; $в$ — сферический $p-n$ -переход.

(Пунктирные линии указывают предельные полные напряжения, при которых обедненная область достигает поверхности.)

цессы рекомбинации, наличие канальных утечек и прочих неоднородностей в реальных $p-n$ -переходах.

Выражение (6.21), решенное относительно U , записывается следующим образом:

$$U = m\varphi_T \ln\left(1 + \frac{I}{I_0}\right).$$

Если известны значения токов и напряжений в двух точках вольт-амперной характеристики, то параметр m может быть определен в виде

$$m = \frac{U_2 - U_1}{\varphi_T \ln \frac{I_2}{I_1}},$$

где I , U_1 и I_2 , U_2 — токи и напряжения в соответствующих точках характеристики.

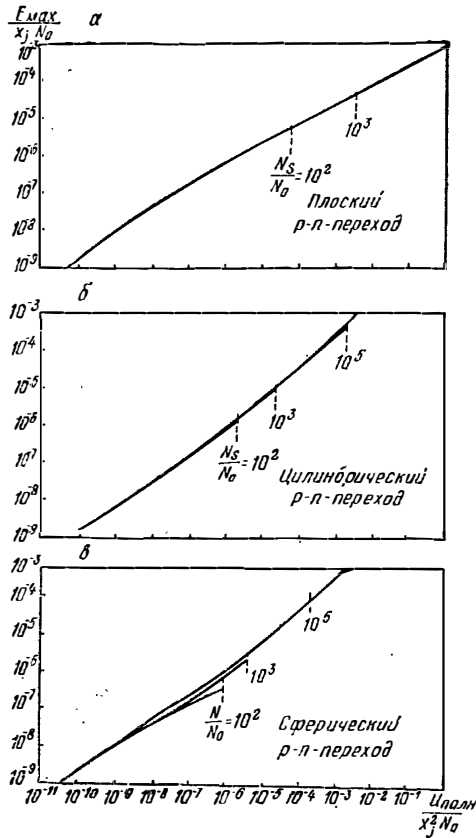


Рис. 6.19. Зависимость максимальной напряженности электрического поля в диффузионных $p-n$ -переходах с изменением профиля концентрации примесей согласно функции дополнения интеграла ошибок от полного напряжения на переходе, глубины залегания перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

a — плоский $p-n$ -переход; $б$ — цилиндрический $p-n$ -переход; $в$ — сферический $p-n$ -переход.

(Пунктирные линии указывают предельные полные напряжения, при которых обедненная область достигает поверхности.)

Параметр m для $p-n$ -переходов в кремнии принимает значения $m=1-2$, а при наличии поверхностных или объемных каналов $m=2-4$ и более. Для $p-n$ -переходов в арсениде галлия, как правило, $m \geq 2$.

Дифференциальное сопротивление $p-n$ -перехода при прямом смещении определяется по формуле

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{m\varphi_T}{I_0 \exp\left(\frac{U}{m\varphi_T}\right)} \approx \frac{m\varphi_T}{I}.$$

Начальный ток $p-n$ -перехода I_0 в общем случае включает в себя диффузионный, рекомбинационный и генерационный компоненты:

$$I_0 = I_{0 \text{ диф}} + I_{0 \text{ рек}} + I_{0 \text{ ген}}.$$

Диффузионный компонент может быть рассчитан в соответствии с выражением

$$I_{0 \text{ диф}} = qSn_i^2 \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{1}{N_d} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{1}{N_a} \right),$$

где D_n , τ_n и D_p , τ_p — коэффициенты диффузии и времена жизни электронов и дырок соответственно в тех областях $p-n$ -перехода, где они являются неосновными носителями зарядов; S — площадь $p-n$ -перехода.

Рекомбинационный компонент определяется согласно соотношению

$$I_{0 \text{ рек}} = 0,5qSn_i N_t \sqrt{S_n \bar{v}_n S_p \bar{v}_p},$$

где N_t — концентрация рекомбинационных центров (для рекомбинации на поверхности кремниевых $p-n$ -переходов $N_t \approx 1 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); S_n, S_p — сечения захвата рекомбинационных центров для электронов и дырок ($S_n \approx S_p \approx 10^{-15} \text{ см}^2$); \bar{v}_n, \bar{v}_p — средние тепловые скорости электронов и дырок ($\bar{v}_n \approx \bar{v}_p \approx 10^7 \text{ см/с}$).

Для расчетов можно принимать ориентировочные значения произведения

$$N_t \sqrt{S_n \bar{v}_n S_p \bar{v}_p} = 100 - 500 \text{ см/с}.$$

Генерационный компонент описывается выражением

$$I_{0 \text{ ген}} = qS \frac{n_i d}{\sqrt{\tau_n \tau_p}},$$

где d — ширина ОПЗ $p-n$ -перехода.

Время жизни носителей заряда зависит от параметров исходного материала, степени легирования и технологических факторов при изготовлении

микросхем. Для кремниевых $p-n$ -переходов эффективное время жизни колеблется в пределах

$$\sqrt{\tau_n \tau_p} = 10^{-6} - 10^{-9} \text{ с.}$$

При прямом смещении $p-n$ -перехода начальный ток образуется суммой диффузионного и рекомбинационного компонентов. Если $p-n$ -пере-

ход смещен в обратном направлении, то ток I_0 представляет собой сумму диффузионного и генерационного компонентов, причем генерационный компонент является преобладающим.

Напряжение электрического пробоя $p-n$ -перехода зависит от природы процесса пробоя.

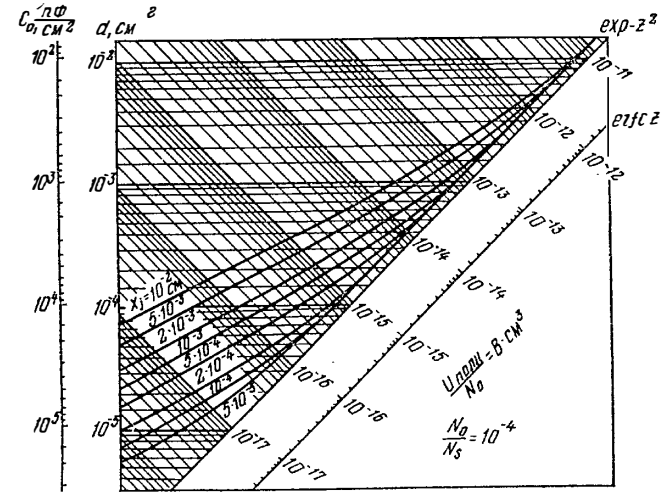
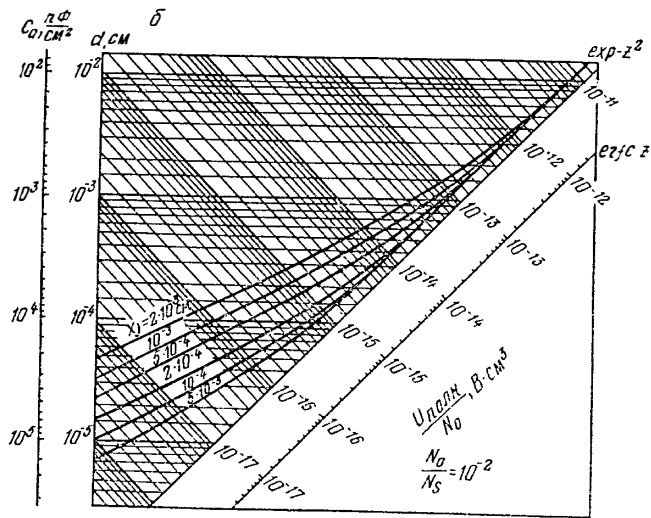
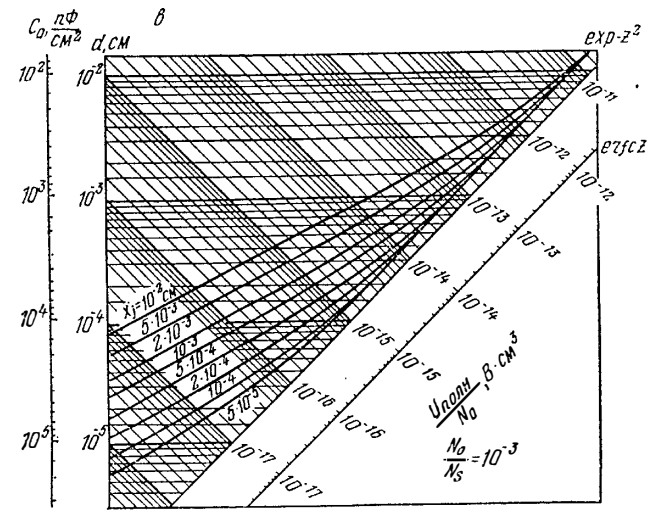
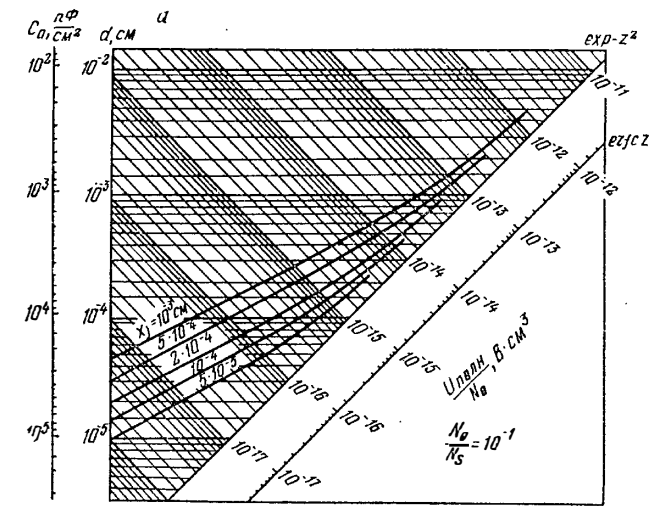


Рис. 6.20. Зависимости ширины ОПЗ и удельной зарядной емкости диффузион примесей в исходном

$a - N_0/N_S = 10^{-1}$; $b - N_0/N_S = 10^{-2}$;

ных $p-n$ -переходов в кремнии от полного напряжения на переходе, концентрации кремния и на поверхности:

$a - N_0/N_S = 10^{-3}$; $z - N_0/N_S = 10^{-4}$.

Лавинный пробой — следствие ударной ионизации, когда носители заряда под действием сильного электрического поля в $p-n$ -переходе достигают энергии, достаточной для ионизации атомов и образования, таким образом, новых электронно-дырочных пар.

Сущность туннельного пробоя заключается в том, что под действием сильного электрического поля электроны из валентной зоны полупроводника с одной стороны $p-n$ -перехода на основе туннельного механизма проникают сквозь потенциальный барьер в зону проводимости по другую сторону $p-n$ -перехода.

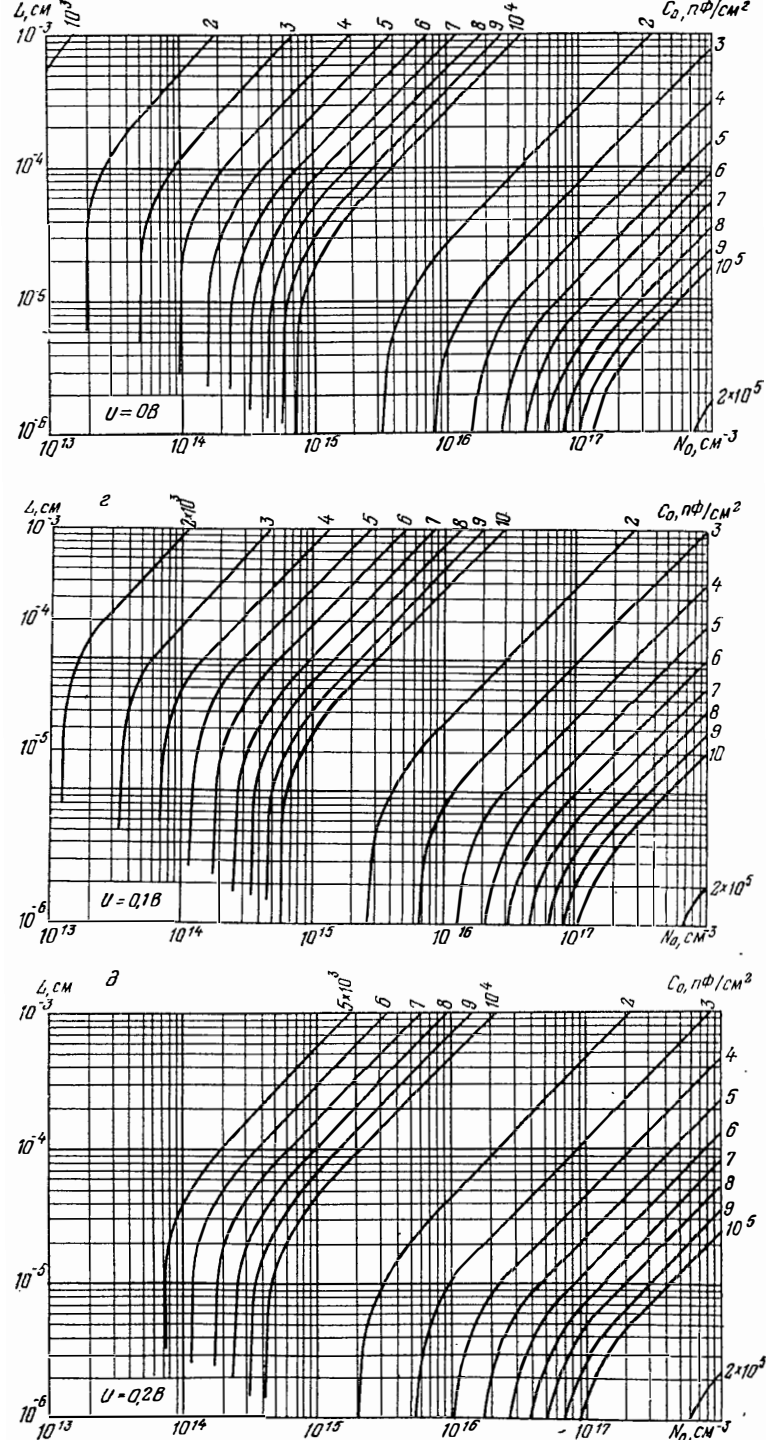
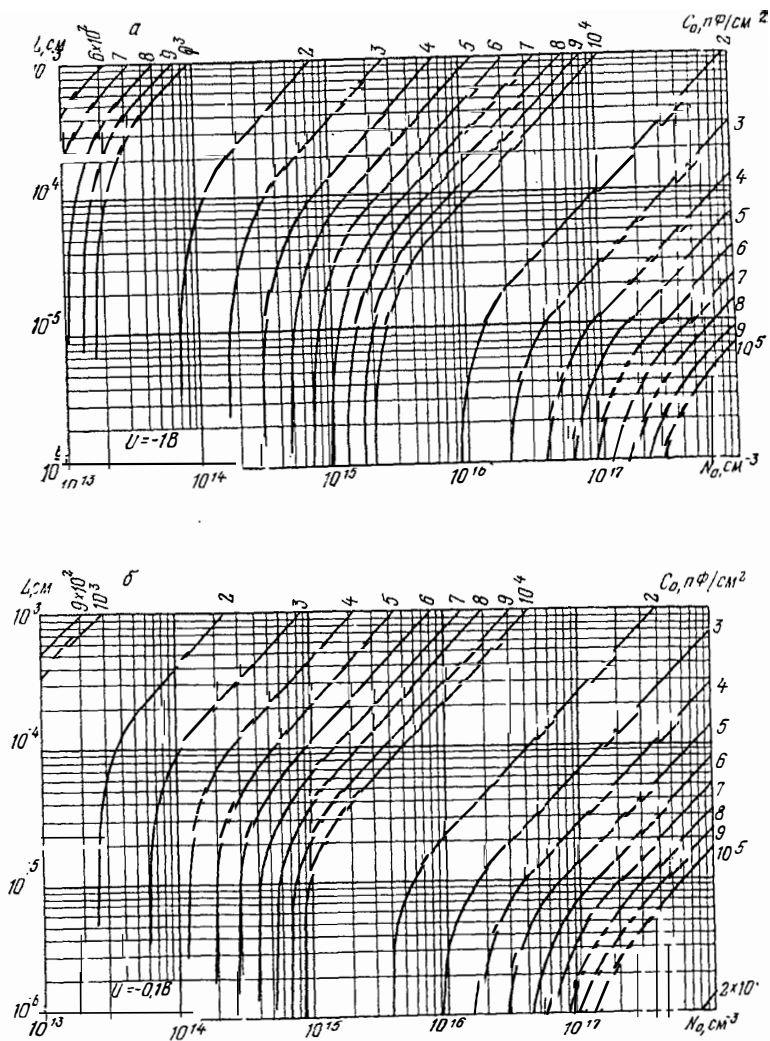


Рис. 6.21. Линии равной удельной зарядной емкости $p-n$ -перехода в зависимости от концентрации примесей в исходном кремнии и характеристической длины [см. формулу (6.20)] при различных приложенных напряжениях: а — $U = -1$ В; б — $U = -0,1$ В; в — $U = -0,18$ В; г — $U = 0,1$ В; д — $U = 0,2$ В.

Рис. 6.21. Окончание.

Пробой $p-n$ -переходов транзисторов и других элементов полупроводниковых ИМС носит, как правило, лавинный характер, поскольку здесь используются такие степени легирования полупроводника, которых недостаточно для наступления туннельного пробоя.

На рис. 6.24 представлены зависимости максимальной ширины ОПЗ d_{\max} и максимальной напряженности поля E_{\max} при пробое резких и плавных (линейная аппроксимация) $p-n$ -переходов в кремнии и арсениде галлия от концентрации примесей в исходном материале N_0 или градиента концентрации a .

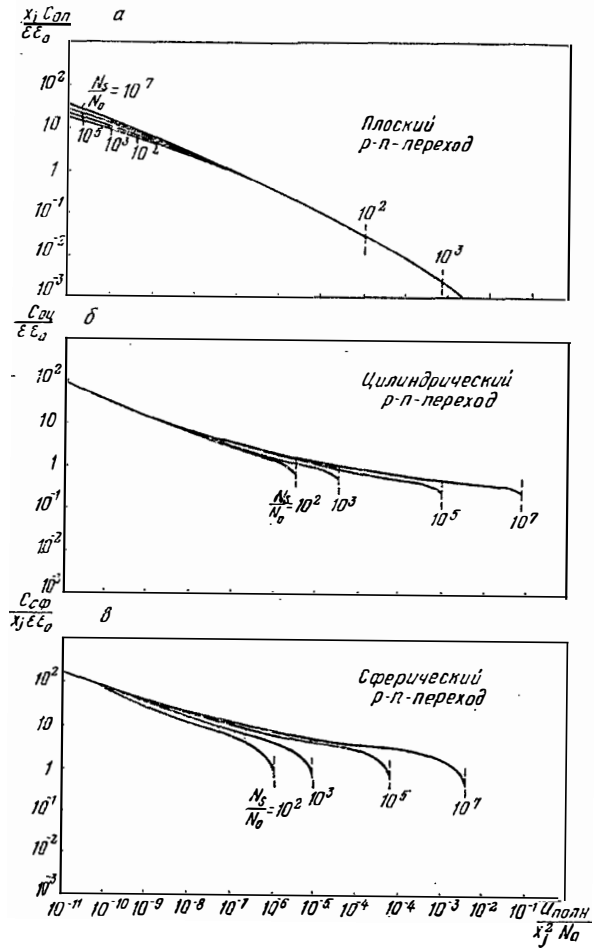


Рис. 6.22. Зависимость зарядной емкости $p-n$ -переходов с изменением профиля концентрации примесей по закону Гаусса от полного напряжения на переходе, глубины залегания перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

a — плоский $p-n$ -переход; b — цилиндрический $p-n$ -переход; c — сферический $p-n$ -переход.

(Пунктирные линии указывают предельные полные напряжения, при которых обедненная область достигает поверхности.)

Максимальная ширина ОПЗ при пробое цилиндрического $p-n$ -перехода зависит от радиуса кривизны r_j перехода (рис. 6.25).

Напряжение лавинного пробоя (в вольтах) резкого $p-n$ -перехода в кремнии или арсениде галлия может быть рассчитано по формуле

$$U_{\text{пр}} = 60 \left(\frac{N_0}{10^{16}} \right)^{-3/4} \cdot \left(\frac{\Delta E_g}{1,1} \right)^{3/2}, \quad (6.22)$$

где N_0 — концентрация примеси в слаболегированной области $p-n$ -перехода, см^{-3} .

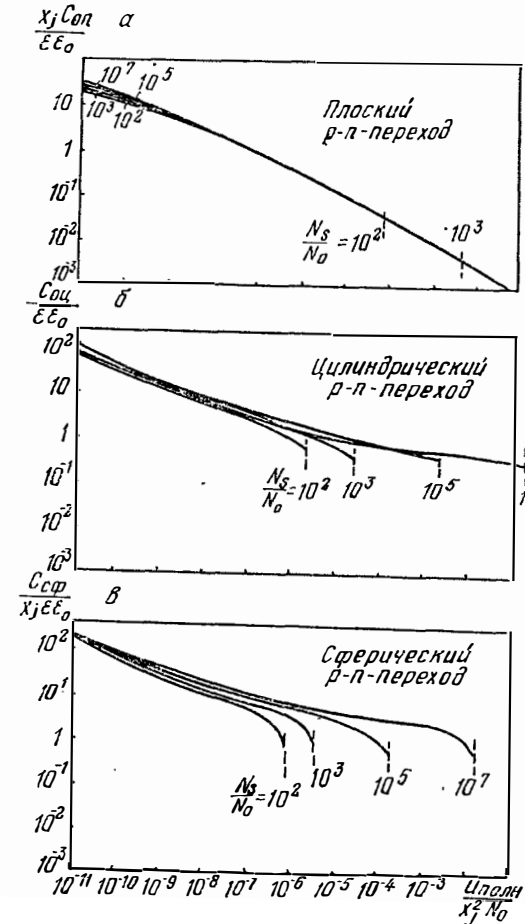


Рис. 6.23. Зависимость зарядной емкости $p-n$ -переходов с изменением профиля концентрации примесей согласно функции дополнения интеграла ошибок от полного напряжения на переходе, глубины залегания перехода, концентрации примесей в исходном кремнии и поверхностной концентрации примесей:

a — плоский $p-n$ -переход; b — цилиндрический $p-n$ -переход; c — сферический $p-n$ -переход.

(Пунктирные линии указывают предельные полные напряжения, при которых обедненная область достигает поверхности.)

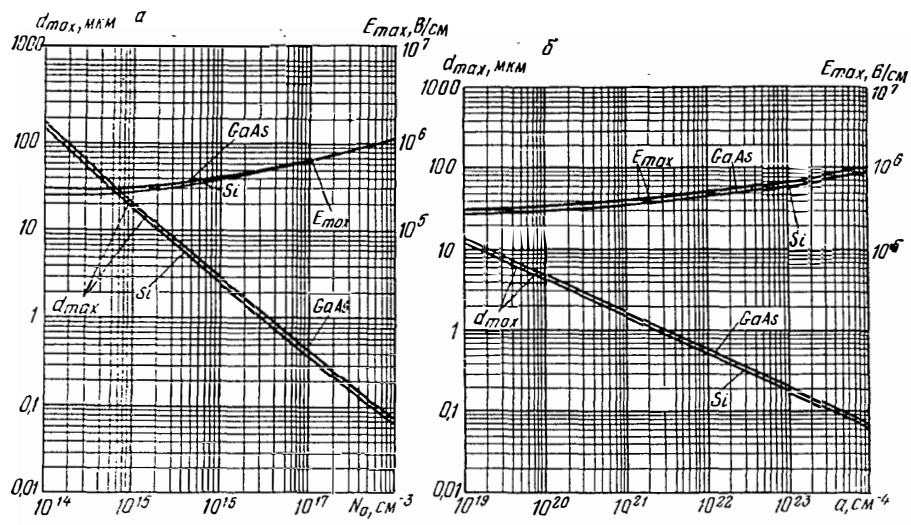


Рис. 6.24. Зависимости максимальной ширины ОПЗ и максимальной напряженности поля при пробое $p-n$ -переходов в кремнии и арсениде галлия от концентрации примесей в исходном материале или градиента концентрации примесей: а — резкий переход; б — плавный переход.

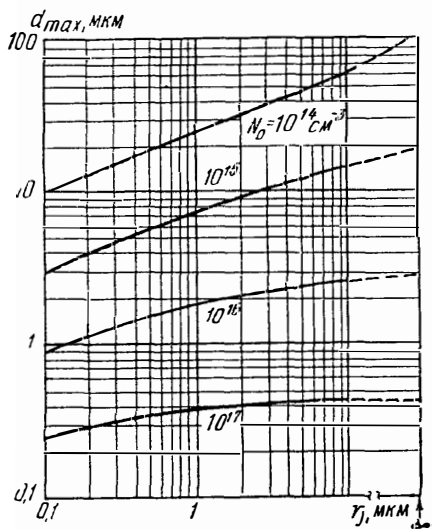


Рис. 6.25. Зависимость максимальной ширины ОПЗ при пробое цилиндрического $p-n$ -перехода в кремнии от радиуса кривизны перехода и концентрации примесей в исходном кремнии.

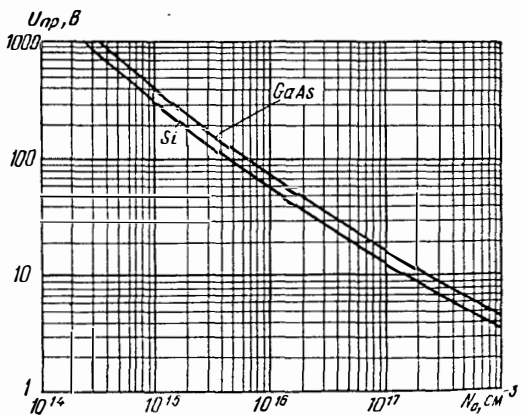


Рис. 6.26. Зависимости напряжения лавинного пробоя резких $p-n$ -переходов в кремнии и арсениде галлия при 300 К от концентрации примесей в исходном материале.

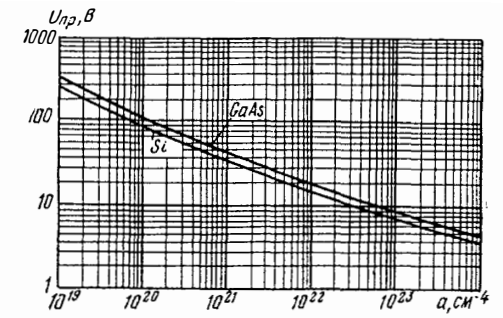


Рис. 6.27. Зависимости напряжения лавинного пробоя плавных $p-n$ -переходов в кремнии и арсениде галлия при 300 К от градиента концентрации примесей в переходе.

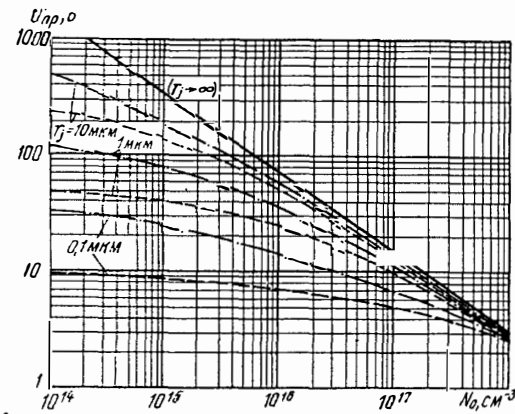
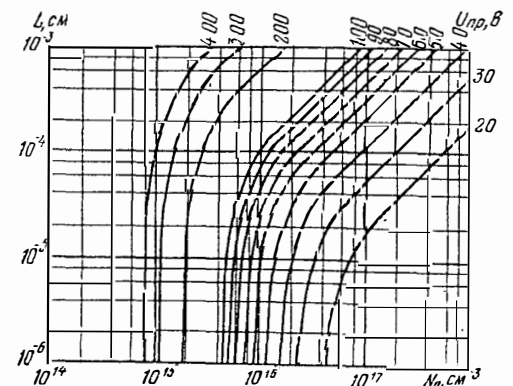


Рис. 6.28. Зависимости напряжений лавинного пробоя от концентрации примесей в исходном кремнии для резких переходов при 300 К: сплошная линия — плоский переход; штрих-пунктирная линия — цилиндрический переход; пунктирная линия — сферический переход.

Рис. 6.29. Линии равных напряжений пробоя диффузионных $p-n$ -переходов в кремнии в зависимости от концентрации примесей в исходном материале и характеристической длины [см. формулу (6.20)].



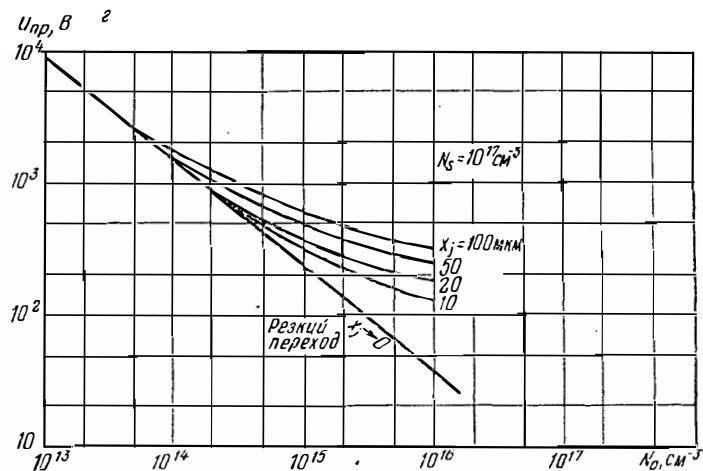
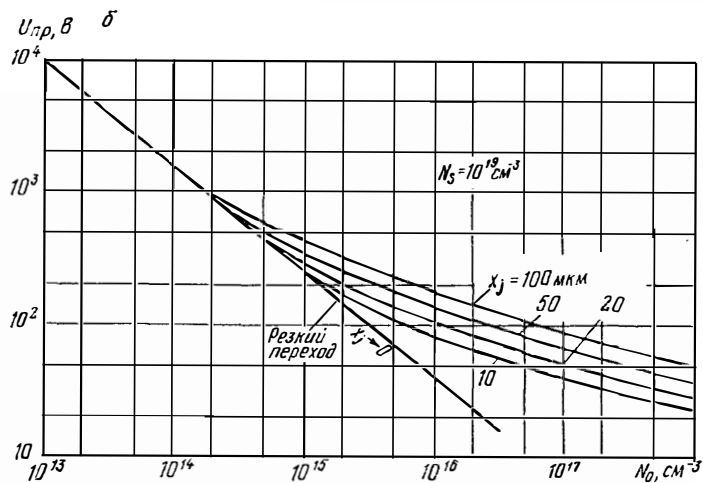
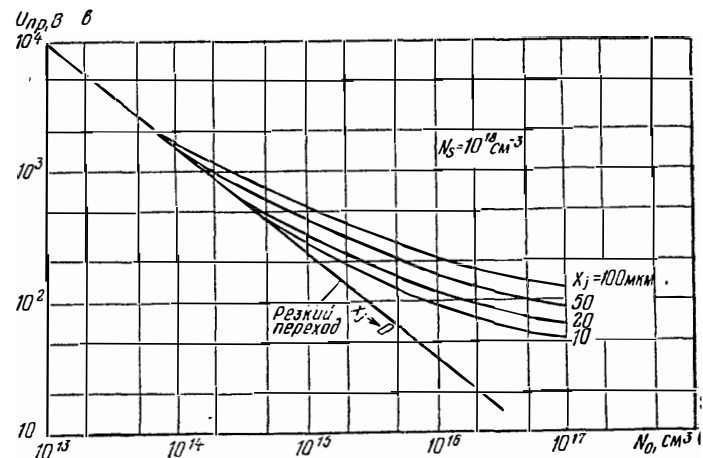
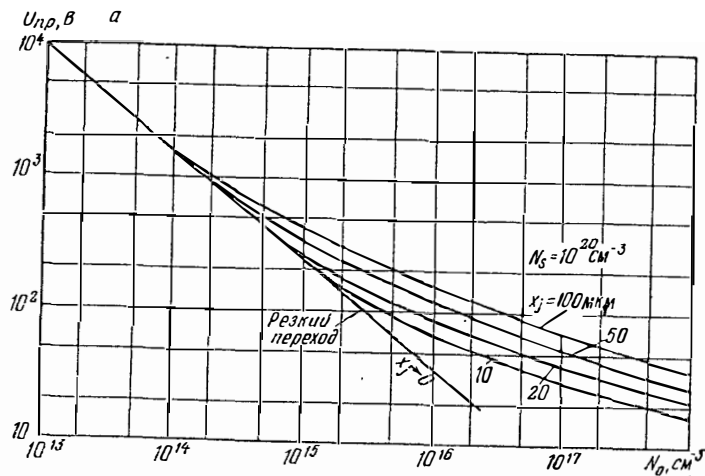


Рис. 6.30. Зависимости напряжений пробоя диффузионных переходов в кремнии от концентрации примесей в исходном материале и глубины залегания переходов:

а — $N_S = 10^{20} \text{ см}^{-3}$; б — $N_S = 10^{19} \text{ см}^{-3}$;

б — n -переходов в кремнии от концентрации примесей в исходном материале и глубины залегания переходов:

б — $N_S = 10^{18} \text{ см}^{-3}$; з — $N_S = 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Для переходов с плавным (линейным) распределением примесей действительно следующее соотношение:

$$U_{пр} = 60 \left(\frac{a}{3 \cdot 10^{20}} \right)^{-2/5} \cdot \left(\frac{\Delta E_g}{1,1} \right)^{6/5}, \quad (6.23)$$

где a — градиент концентрации примесей, см^{-4} .

Соотношения (6.22) и (6.23) справедливы для $T=300 \text{ К}$. С повышением температуры напряжение лавинного пробоя увеличивается, а туннельного — уменьшается.

На рис. 6.26 показаны зависимости напряжения лавинного пробоя резких p - n -переходов в кремнии и арсениде галлия при 300 К от концентрации примесей в исходном материале. При концентрации выше $N_0 \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ преобладающую роль при пробое начинает играть туннельный эффект.

Зависимости напряжения лавинного пробоя от градиента концентрации плавных (линейных) p - n -переходов при 300 К представлены на рис. 6.27. При градиентах выше $a \approx 2 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ преобладающую роль играет туннельный эффект.

Напряжение пробоя (в вольтах) резких переходов с определенным радиусом кривизны в кремнии и арсениде галлия может быть рассчитано по формуле

$$U_{пр} = 60 \left(\frac{\Delta E_g}{1,1} \right)^{3/2} \left(\frac{N_0}{10^{18}} \right)^{-3/4} \{ [(n+1+\gamma)\gamma]^{1/(n+1)} - \gamma \},$$

где $n=1$ для цилиндрического перехода и $n=2$ для сферического перехода; $\gamma=r/d$ — отношение радиуса кривизны r к ширине области пространственного заряда d .

Зависимости напряжения лавинного пробоя от концентрации примесей в исходном кремнии для резких плоского, цилиндрических и сферических переходов при 300 К представлены на рис. 6.28. Для линейных переходов напряженне пробоя практически не зависит от радиуса кривизны.

Используя рис. 6.29, можно определить величину напряжения пробоя диффузионных $p-n$ -переходов в зависимости от концентрации примесей в исходном материале N_0 и от параметра L , который определяется по формуле (6.20).

Напряжения пробоя диффузионных кремниевых $p-n$ -переходов можно определить также по графикам, приведенным на рис. 6.30 в зависимости от концентраций примеси на поверхности диффузионной области, в исходном материале и от глубины залегания $p-n$ -перехода.

6.3. КОНТАКТ МЕТАЛЛ — ПОЛУПРОВОДНИК

Контакты металл — полупроводник в ИМС применяются в качестве невыпрямляющих, омических контактов, а также для создания диодов Шоттки.

В зависимости от соотношения величин работы выхода электронов из металла и полупроводника теоретически возможны четыре электрофизических варианта контакта металл — полупроводник. В двух случаях на границе полупроводника с металлом образуется запирающий (обедненный) слой, а в двух других — антизапирающий (обогащенный) слой. Это соответствует образованию диодов Шоттки или невыпрямляющих контактов.

Однако в реальных условиях образование выпрямляющего или невыпрямляющего контакта на границе металла с полупроводником зависит от многих факторов, в основном технологического характера.

В табл. 6.7 приведены значения работы выхода электронов из некоторых металлов, а также экспериментально полученные величины потенциальных барьеров, образующихся в контакте данных металлов с кремнием и арсенидом галлия при 300 К.

Вольт-амперная характеристика диода Шоттки описывается уравнением (6.21). Начальный ток при этом зависит от величины потенциального барьера и может быть рассчитан по формуле

$$I_0 = SA^*T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_0}{\Phi_T}\right),$$

где S — площадь контакта; T — температура; Φ_0 — потенциальный барьер; A^* — константа Ричардсона, значения которой для кремния и арсенида галлия приведены в табл. 6.8.

Сопrotивление невыпрямляющего контакта между металлом и тонким полупроводниковым слоем рассчитывается по формуле

$$R_K = \frac{\sqrt{\rho_{кв} \cdot \rho_K}}{b} \cdot \operatorname{cth} l \sqrt{\frac{\rho_{кв}}{\rho_K}},$$

где $\rho_{кв}$ — удельное сопротивление тонкого полупроводникового слоя, Ом/кв; ρ_K — удельное контактное сопротивление, Ом · см²; l — длина контакта (в направлении протекания тока); b — ширина контакта.

Свойства некоторых металлов, используемых при создании невыпрямляющих контактов и токопроводящих дорожек в полупроводниковых интегральных микросхемах, приведены в табл. 6.9.

Наиболее широко в настоящее время для получения невыпрямляющих контактов к кремнию применяется алюминий. Удельное контактное сопро-

Табл. 6.7. Величина работы выхода некоторых металлов и высота барьеров в контактах металл — полупроводник при 300 К

Металл или соединение	Работа выхода Φ_M , эВ	Высота барьера металл — полупроводник Φ_0 , эВ			
		Кремний n -типа		Арсенид галлия, скелотая поверхность	
		скелотая поверхность	химически обработанная поверхность	n -типа	p -типа
Al	2,98—4,36	0,76—0,77	0,5	0,80	0,50—0,63
Au	4,02—5,2	0,81—0,82	0,81	0,90—0,95	0,42—0,48
Pt	4,09—6,35	—	0,90	0,86—0,94	—
Pd	4,99	—	0,71	—	—
Cu	3,85—5,61	0,79—0,79	0,69	0,82—0,87	—
Ni	3,67—5,24	0,68—0,70	0,67	—	—
Ag	3,09—4,81	0,77—0,79	0,56	0,88—0,93	—
W	4,25—5,01	—	0,66	0,71—0,80	—
Mo	4,08—4,48	0,68	0,56	—	—
PtSi	—	—	0,85	—	—
WSi ₂	—	—	0,86	—	—

Табл. 6.8. Значения константы Ричардсона для кремния и арсенида галлия

Тип электропроводности	Кристаллографическая ориентация	Константа Ричардсона A^* , А/см ² ·К ²	
		Кремний	Арсенид галлия
n	(111)	264	8,16
p	(110)	252	144
p	—	79,2	74,4

Табл. 6.9. Параметры некоторых металлов

Металл	Температура плавления T , °С	Объемное удельное сопротивление ρ , мкОм·см	Сопrotивление пленки толщиной $d = 0,6$ мкм $\rho_{кв}$, Ом/кв
Au	1063	2,44	4,1
Al	659	2,74	$4,6 \cdot 10^{-2}$
W	3380	5,3	8,8
Mo	2610	5,3	8,8
Pt	1770	9,8	16,4
Pd	1550	10,8	18,0

Табл. 6.10. Удельное контактное сопротивление системы алюминий—кремний p -типа

Удельное сопротивление кремния ρ , Ом·см	Удельное контактное сопротивление ρ_K , мкОм·см ²	Удельное сопротивление кремния ρ , Ом·см	Удельное контактное сопротивление ρ_K , мкОм·см ²
0,001	$0,26 \pm 0,02$	0,01	$2,05 \pm 0,07$
0,0041	$1,03 \pm 0,02$	0,011	$2,65 \pm 0,13$
0,0052	$1,78 \pm 0,10$	0,022	$3,59 \pm 0,10$

Табл. 6.11. Удельное контактное сопротивление в системе Pd₂Si—pSi

Ориентация	Удельное сопротивление кремния ρ , Ом·см	Удельное контактное сопротивление ρ_K , мкОм·см ²
(111)	0,0010	0,68±0,08
(111)	0,0011	1,20±0,32
(111)	0,0041	1,81±0,69
(111)	0,0042	1,82±0,63
(111)	0,0054	4,69±1,50
(111)	0,0065	3,85±1,32
(111)	0,0066	3,62±1,33
(111)	0,0184	5,68±2,25
(100)	0,0100	3,37±0,79
(100)	0,0101	1,89±0,59
(100)	0,0106	4,13±0,50

Табл. 6.12. Удельное контактное сопротивление в системе Pd₂Si—nSi

Легированная примесь	Ориентация	Удельное сопротивление кремния ρ , Ом·см	Удельное контактное сопротивление ρ_K , мкОм·см ²	
Фосфор	(111)	0,0013	2,32±0,41	
	(111)	0,0021	0,63±0,10	
	»	(111)	0,0024	1,72±0,52
	»	(111)	0,0055	5,17±0,41
Сурьма	»	(111)	0,0057	7,59±1,36
	(111)	0,0085	8,66±0,59	
	То же	(111)	0,0089	5,59±0,56
	»	(111)	0,0091	8,92±0,65
	»	(111)	0,0091	27,7±2,3
	»	(111)	0,0142	40,8±2,1
Фосфор	(100)	0,0055	3,43±0,68	
	То же	(100)	0,0058	3,64±1,24
	»	(100)	0,0059	7,17±1,37

Табл. 6.13. Удельное контактное сопротивление в системе PtSi—nSi

Концентрация примесей в кремнии N_0 , Ом ⁻³	Удельное контактное сопротивление ρ_K , Ом·см ²		
	200 К	300 К	400 К
10 ¹⁶	5·10 ¹¹	2·10 ⁵	20
10 ¹⁷	2·10 ¹¹	10 ⁵	10
10 ¹⁸	2·10 ⁹	10 ⁴	6
10 ¹⁹	10	1	0,5
10 ²⁰	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵

тивление системы алюминий — кремний p -типа, легированный бором, с ориентацией (111) приведено в табл. 6.10.

Величина ρ_K для системы Al— p Si может быть рассчитана также по формуле $\rho_K = 1,35 \cdot 10^2 \rho^{(0,88 \pm 0,09)}$ мкОм·см² (для $\rho = 0,0001—0,02$ Ом·см).

Нелинейность вольт-амперной характеристики (неомичность) контакта алюминий — кремний p -типа электропроводности наблюдается при удель-

ном сопротивлении кремния свыше 1 Ом·см. Неомичность контакта алюминия с кремнием n -типа происходит при удельном сопротивлении кремния более 0,01 Ом·см.

В последние годы для создания омических контактов к кремнию сравнительно широко стали использоваться палладий и платина. Для определения удельного контактного сопротивления силицида палладия с кремнием можно пользоваться следующими формулами:

контакт Pd₂Si — кремний p -типа:

$$\rho_K = 3,29 \cdot 10^2 \rho^{(0,87 \pm 0,13)} \text{ мкОм} \cdot \text{см}^2 \text{ (для } \rho = 0,001—0,018 \text{ Ом} \cdot \text{см)};$$

контакт Pd₂Si — кремний n -типа:

$$\rho_K = 7,75 \cdot 10^3 \rho^{(1,37 \pm 0,29)} \text{ мкОм} \cdot \text{см}^2 \text{ (для } \rho = 0,001—0,014 \text{ Ом} \cdot \text{см)}.$$

Экспериментальные значения удельного контактного сопротивления Pd₂Si— p Si (кремний легирован бором) приведены в табл. 6.11. Те же данные в отношении контакта Pd₂Si— n Si (кремний легирован фосфором или сурьмой) приведены в табл. 6.12.

Среднее значение удельного контактного сопротивления для системы Au—Cr—Pd₂Si—Si на кремнии p -типа с $\rho = 0,001$ Ом·см и на кремнии n -типа, легированном мышьяком и фосфором, с $\rho = 0,0015$ Ом·см, равно $8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

Контакты на основе силицида палладия на кремнии n - и p -типов становятся неомическими для кремния с удельным сопротивлением более 0,02 Ом·см.

В табл. 6.13 приведены экспериментальные значения удельного контактного сопротивления (в Ом·см²) системы PtSi— n Si (ориентация (111)) для различной температуры окружающей среды в диапазоне 200—400 К.

7. ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

7.1. РЕЗИСТОРЫ

В полупроводниковых интегральных микросхемах в качестве резисторов используются обычно участки полупроводника, создаваемые одновременно с коллекторными или базовыми областями транзисторов. Области, создаваемые вместе с эмиттерами транзисторов, применяются для этой цели реже, так как они имеют слишком малое удельное сопротивление.

Структуры резисторов показаны на рис. 7.1. Там же схематично показано распределение концентрации примесей в областях полупроводника, образующих собственно резистор.

Если микросхема должна содержать резисторы с достаточно высоким сопротивлением (порядка нескольких десятков килоом и более), то изготавливаются так называемые сжатые резисторы (пинч-резисторы). В варианте пинч-резистора, изображенного на рис. 7.1, *а*, в качестве резистивного слоя используется базовый слой, в который проведена также диффузия эмиттерной примеси. Эмиттерная область полностью перекрывает резистивную базовую полосу и в полупроводниковой структуре непосредственно контактирует с коллекторной областью. Соединенные таким образом коллекторная и эмиттерная области могут играть роль полевых затворов, если на них подавать обратное по отношению к базовой резистивной полоске смещение. Аналогичную конструкцию имеет пинч-резистор, в котором резистивной областью является коллекторная область транзистора (рис. 7.1, *б*).

Изображенный на рис. 7.1, *в* пинч-резистор подобен варианту рис. 7.1, *б*. Однако ширина резистора здесь может быть очень малой, в связи с чем данные резисторы обладают сопротивлением более 100 кОм.

Параметры полупроводниковых резисторов приведены в табл. 7.1.

Полупроводниковые резисторы обладают паразитной распределенной емкостью, что является их недостатком. Паразитная емкость может быть охарактеризована коэффициентом

$$k_R = \frac{C_{кв}}{\rho_{кв} b^2},$$

Табл. 7.1. Параметры полупроводниковых резисторов

Тип резистора	Номинальные значения сопротивления, Ом	Погрешность, %	Удельное сопротивление $\rho_{кв}$, Ом/кв	ТКС, 1/град
Эмиттерный слой	2,5—10 ³	±10	2—6	2·10 ⁻³
Базовый слой	150—20·10 ³	±10	50—250	2·10 ⁻³
Коллекторный слой	250—10·10 ³	±10	200—300	5·10 ⁻³
Сжатые резисторы	(5—500)10 ³	±20	(2—10)10 ³	5·10 ⁻³

Табл. 7.2. Коэффициент паразитной емкости резисторов

Тип резистора	Коэффициент k_R (пФ/кОм·мкм ²) при удельном сопротивлении эпитаксиального коллекторного слоя ρ		
	$\rho = 1$ Ом·см	$\rho = 5$ Ом·см	$\rho = 10$ Ом·см
Базовый слой	1·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴	4,5·10 ⁻⁴
Сжатые резисторы на основе:			
базового слоя	2,7·10 ⁻⁵	1,6·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁵
коллекторного слоя	8·10 ⁻⁵	4·10 ⁻⁵	2,8·10 ⁻⁵

где $C_{кв}$ — удельная паразитная распределенная емкость квадрата резистивной полоски, пФ/кв; $\rho_{кв}$ — сопротивление квадрата резистивной полоски, кОм/кв; b — ширина резистора, мкм.

Значения коэффициента k_R для некоторых вариантов резисторов приведены в табл. 7.2.

К недостаткам полупроводниковых резисторов относятся также сравнительно высокий ТКС и зависимость номинального сопротивления от величины приложенного к резистору напряжения, которое может модулировать площадь поперечного сечения резистивной полоски вследствие полевого эффекта. Кроме того, в резисторах, изолированных $p-n$ -переходом, может проявляться паразитный транзисторный эффект.

Максимально допустимое напряжение зависит от характеристик слоя, образующего резистор, и определяется пробивным напряжением $p-n$ -перехода, отделяющего резистивный слой от остальных областей структуры.

Ширина резистивной полоски рассчитывается на основании удельной допустимой мощности рассеивания по формуле

$$b_p = \sqrt{\frac{\rho_{кв} P}{R P_0}}.$$

Номинальная рассеиваемая мощность полупроводниковых резисторов обычно не превышает 10 мВт. Максимально допустимая удельная рассеиваемая мощность составляет 4,5 Вт на 1 мм² площади диффузионной резистивной области.

Требования, предъявляемые к точности номинального значения сопротивления резистора, также ограничивают минимальную ширину резистивной полоски. Она может быть рассчитана по формуле

$$b_{\min} = \Delta b \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\rho_{кв}}{R}\right)^2}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 - \left(\frac{\Delta \rho_{кв}}{\rho_{кв}}\right)^2}},$$

где Δb — абсолютная погрешность ширины резистивной полоски, обусловленная в основном процессами фотолитографии. Для типовых технологических процессов можно принимать $\Delta b = 0,1$ мкм и $\Delta \rho_{кв}/\rho_{кв} = 0,1$.

Полное сопротивление резистора

$$R = \rho_{кв} (k_\phi + 2k_p),$$

где k_p — коэффициент, учитывающий растекание тока в контакте.

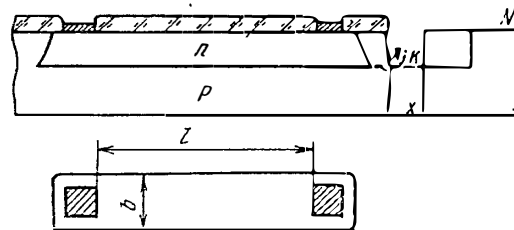
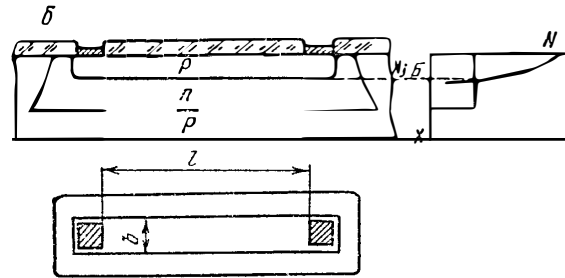
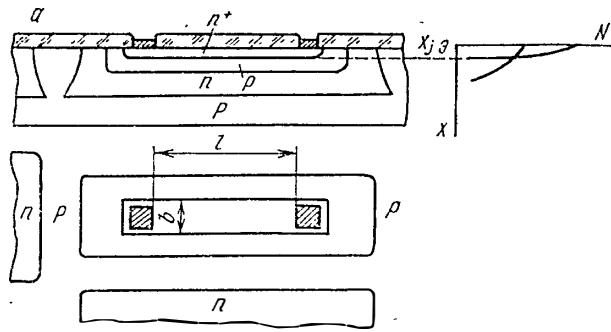
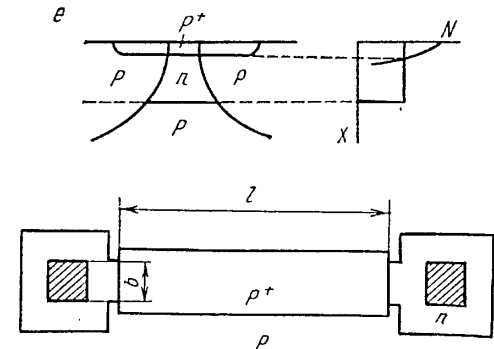
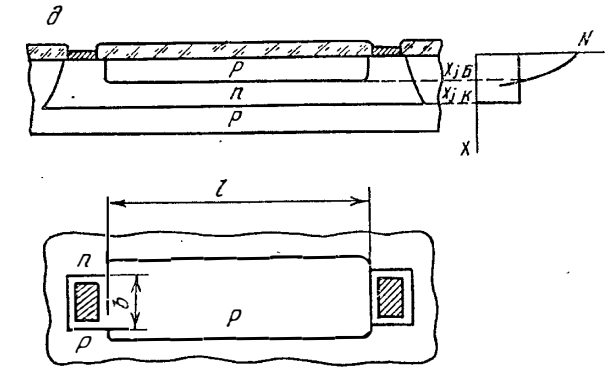
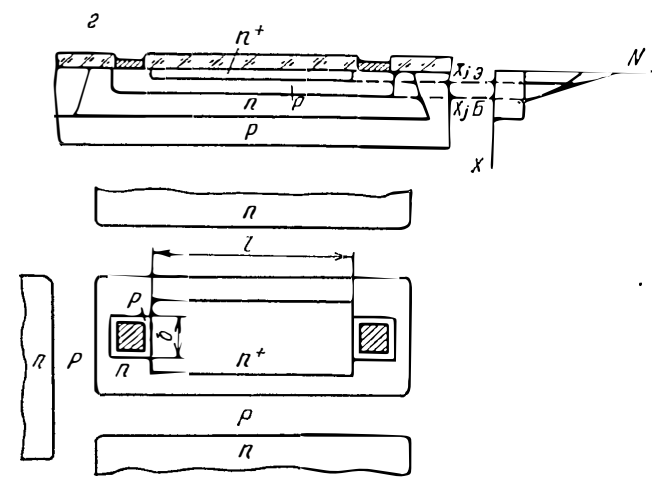


Рис. 7.1. Структуры интегральных
а — на основе эмиттерного слоя; б — на основе базового слоя;
в — на основе базового слоя; г, е — сжатые резисторы



полупроводниковых резисторов:
в — на основе коллекторного слоя; г — сжатый резистор на осно-
на основе коллекторного слоя.

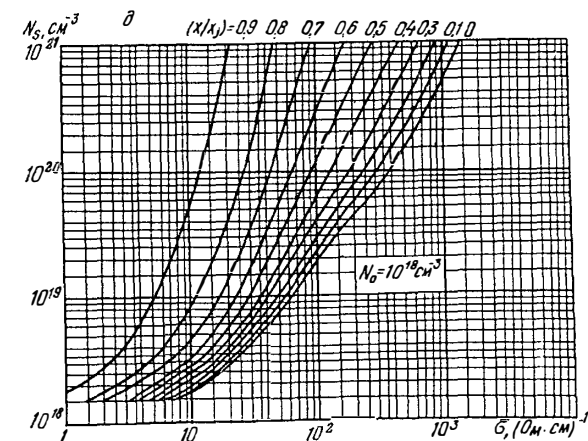
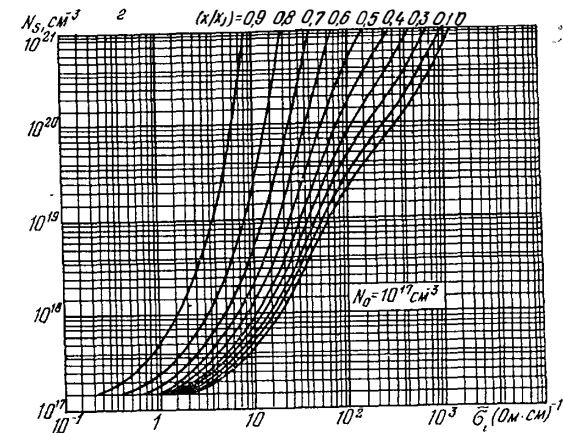
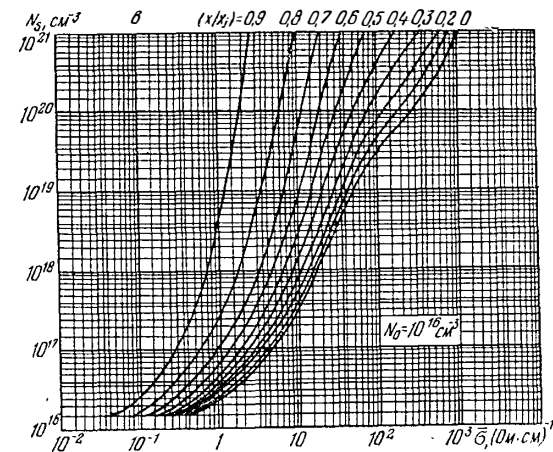
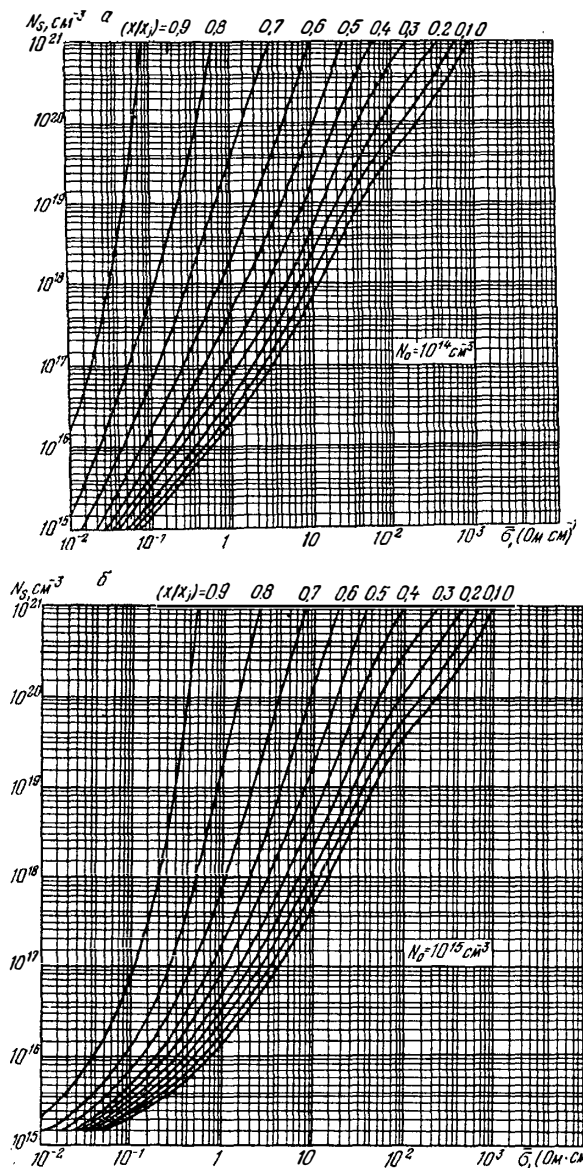


Рис. 7.2. Зависимость усредненной удельной объемной проводимости диффузных слоев с распределением концентрации примеси, соответствующим функции дополнения интеграла ошибок, от поверхностной концентрации примеси, концентрации примеси в исходном материале и отношения глубины p - n -переходов, ограничивающих резистивные слои n - и p -типа соответственно:

- $a - N_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}; \quad б - N_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}; \quad в - N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}; \quad г - N_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3};$
 $д - N_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}; \quad е - N_0 = 10^{19} \text{ см}^{-3}; \quad ж - N_0 = 10^{20} \text{ см}^{-3}; \quad з - N_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3};$
 $и - N_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}; \quad к - N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}; \quad л - N_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}; \quad м - N_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3};$
 $н - N_0 = 10^{19} \text{ см}^{-3}; \quad о - N_0 = 10^{20} \text{ см}^{-3}.$

Рис. 7.2. Продолжение.

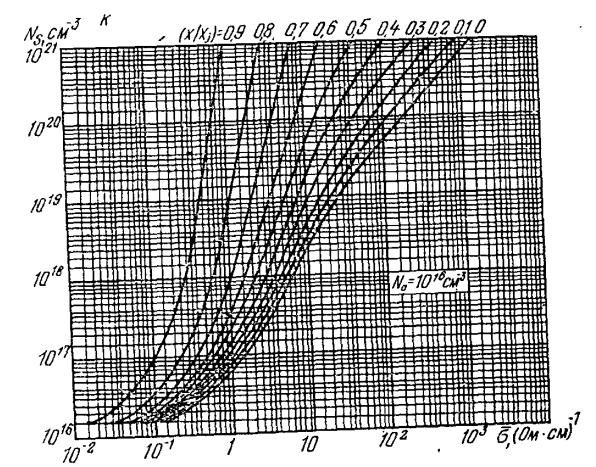
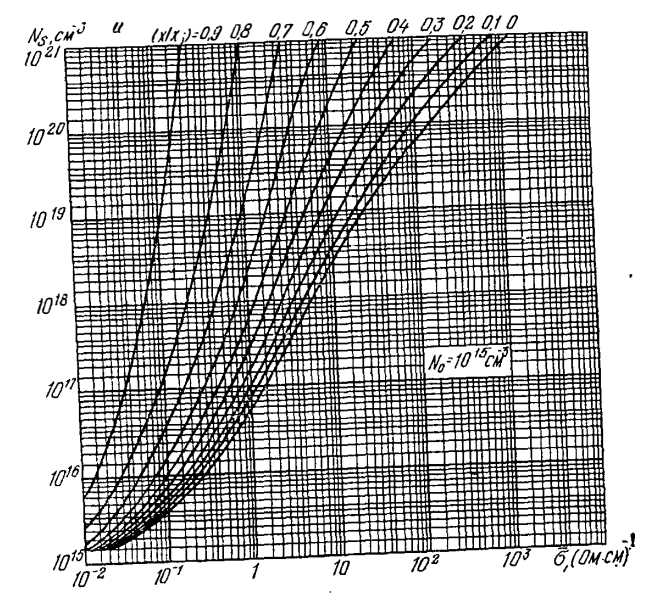
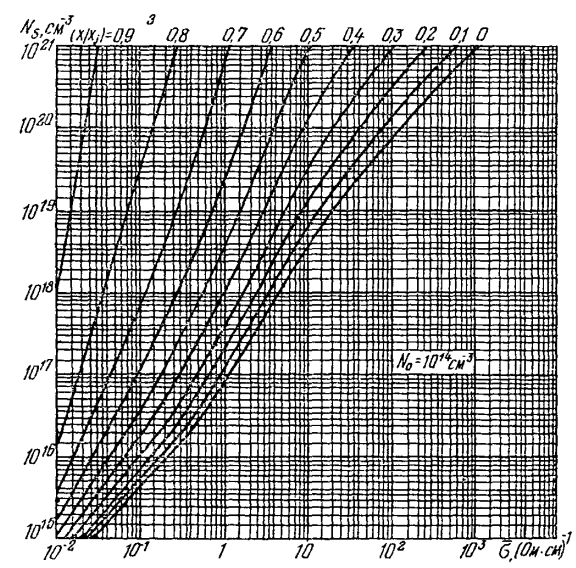
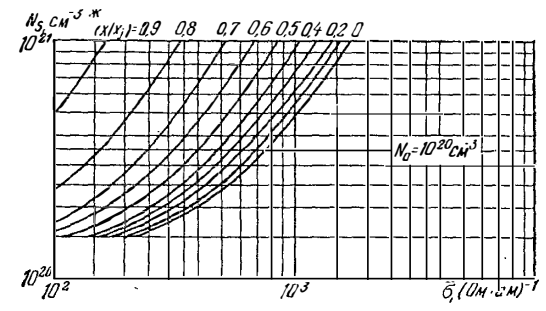
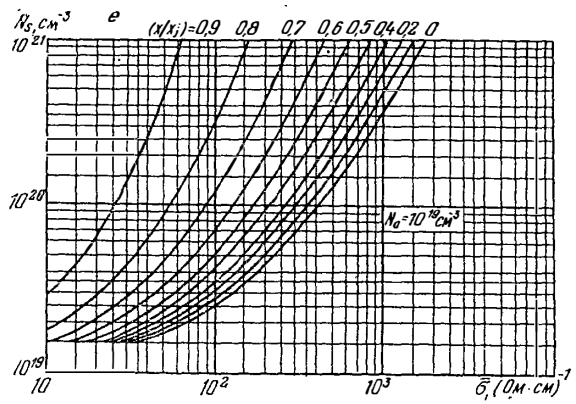


Рис. 7.2. Продолжение.

Рис. 7.2. Продолжение.

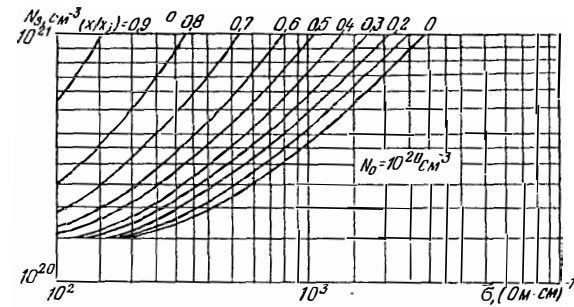
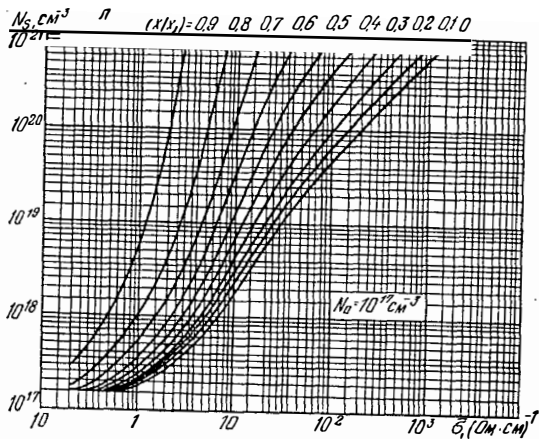


Рис. 7.2. Окончание.

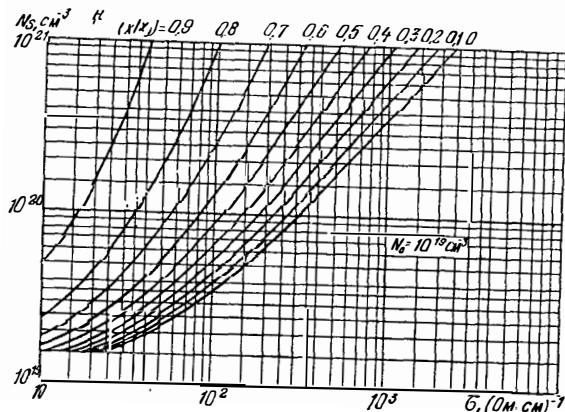
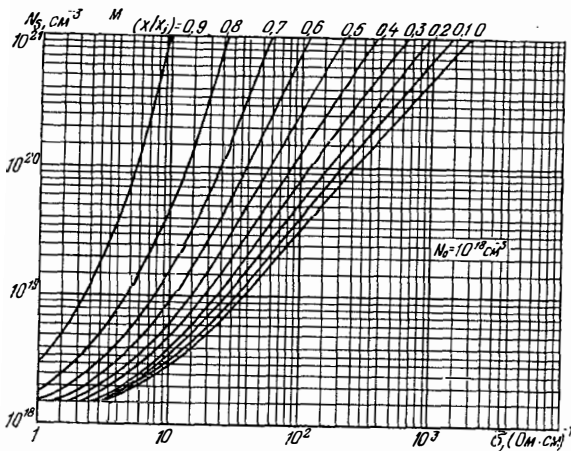


Рис. 7.2. Продолжение.

Значение этого коэффициента зависит от конструктивных данных контактов: $k_p=0,07$ для структур, изображенных на рис. 7.1, $a-7.1, \partial$, и $k_p=0,65$ для структуры, представленной на рис. 7.1, e .

Удельное сопротивление квадрата площади резистивного слоя зависит от толщины слоя и структуры резистора. Резистивный слой может быть ограничен одним (рис. 7.1, $a-7.1, \partial$) или двумя (рис. 7.1, $z-7.1, e$) $p-n$ -переходами. Поскольку примесь в полученном диффузией резистивном слое распределена неравномерно, расчет удельного объемного сопротивления материала слоя трудоемок. Поэтому целесообразно пользоваться номограммами, представленными на рис. 7.2 и 7.3.

Номограммы позволяют найти усредненную удельную объемную проводимость $\bar{\sigma}$ резистивного слоя в зависимости от поверхностной концентрации примесей N_s , концентрации примесей в исходном материале (эпитаксиальном слое) N_0 и отношения текущей координаты x $p-n$ -перехода, если он имеется, ограничивающего резистивный слой сверху к глубине $p-n$ -перехода x_j , ограничивающего резистивный слой снизу. Например, для резистора, изображенного на рис. 7.1, a , это отношение $x/x_j=0$, поскольку резистивный слой начинается непосредственно на поверхности кристалла.

Таким образом, удельное сопротивление квадрата резистивного слоя

$$\rho_{\text{кв}} = \frac{1}{\bar{\sigma} d_{\text{рез}}},$$

где $d_{\text{рез}}=x_j-x$ — толщина резистивного слоя.

7.2. КОНДЕНСАТОРЫ

В качестве конденсаторов полупроводниковых ИМС чаще всего используются обратномещенные $p-n$ -переходы. Кроме того, применяются структуры типа металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) (в том числе

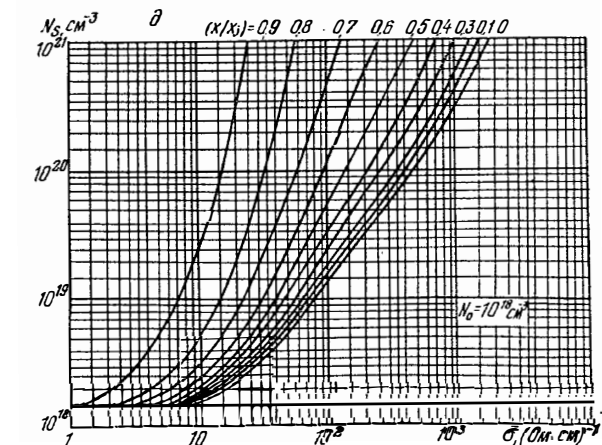
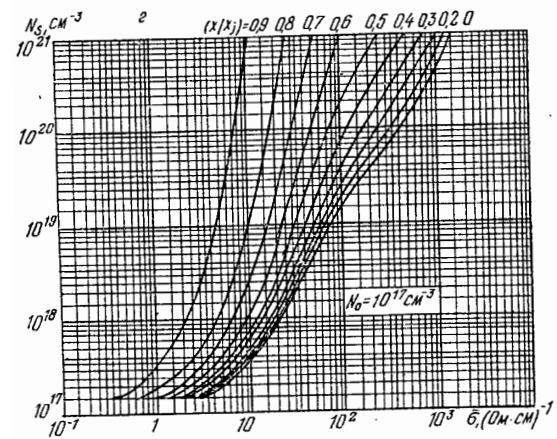
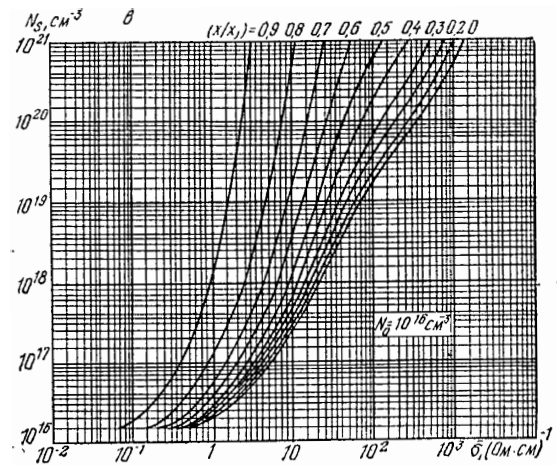
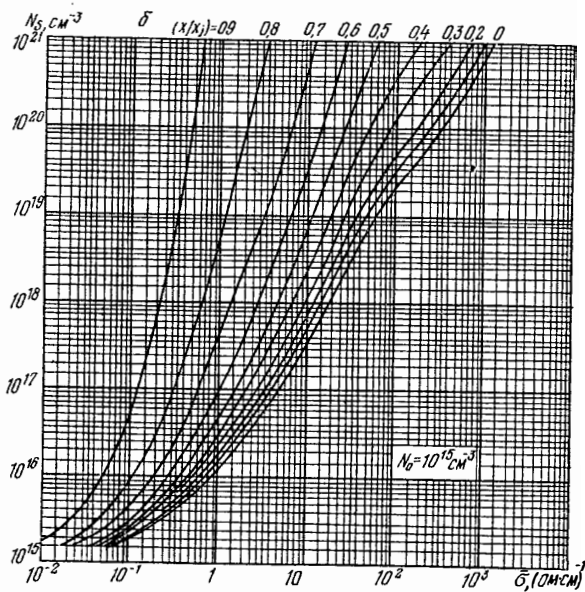
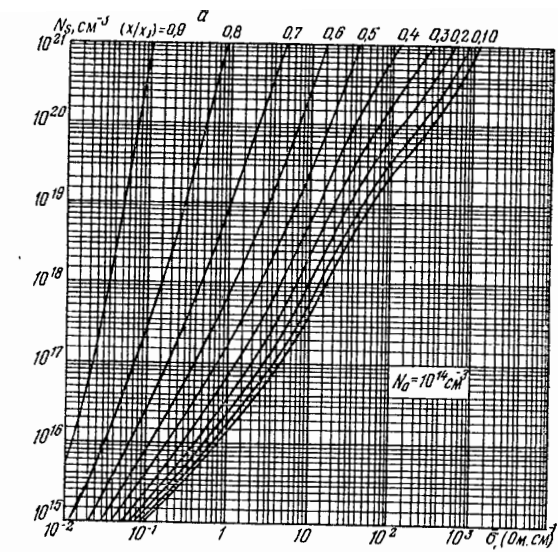


Рис. 7.3. Зависимость усредненной удельной объемной проводимости диффузионных слоев с распределением концентрации примесей по закону Гаусса от поверхностной концентрации примеси, концентрации примеси в исходном материале и отношения глубины p - n -переходов, ограничивающих резистивные слои n - и p -типа соответственно:

- $a - N_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}; \quad б - N_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}; \quad в - N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}; \quad г - N_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3};$
 $д - N_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}; \quad е - N_0 = 10^{19} \text{ см}^{-3}; \quad ж - N_0 = 10^{20} \text{ см}^{-3}; \quad з - N_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3};$
 $и - N_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}; \quad к - N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}; \quad л - N_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}; \quad м - N_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3};$
 $н - N_0 = 10^{19} \text{ см}^{-3}; \quad о - N_0 = 10^{20} \text{ см}^{-3}.$

Рис. 7.3. Продолжение.

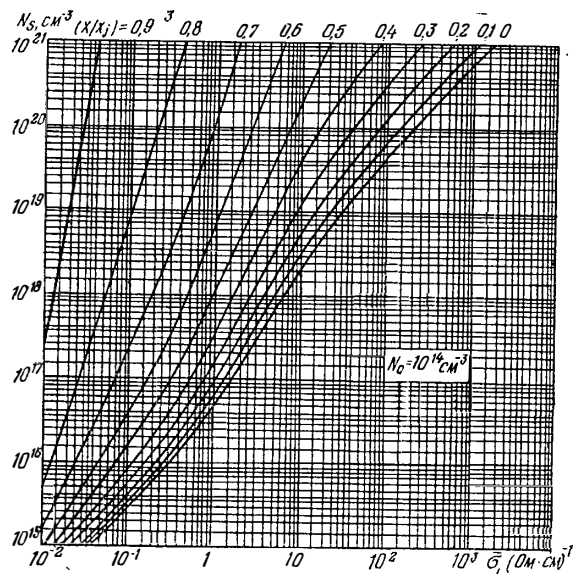
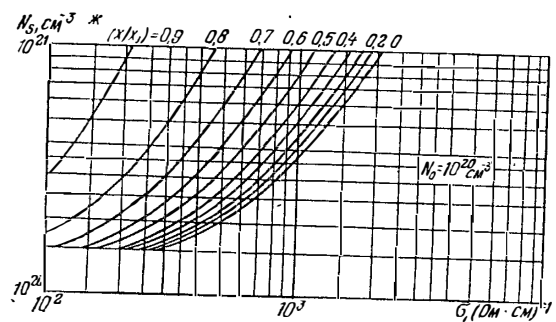
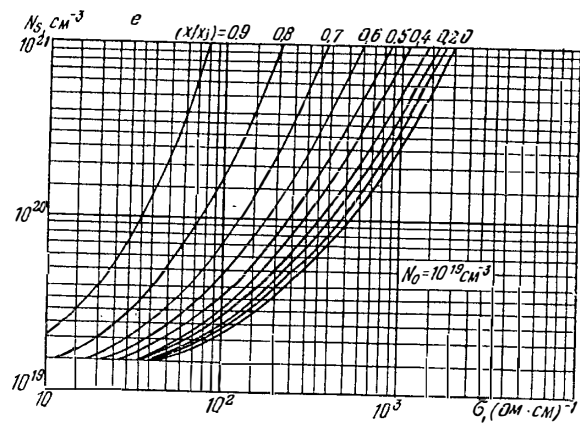


Рис. 7.3. Продолжение.

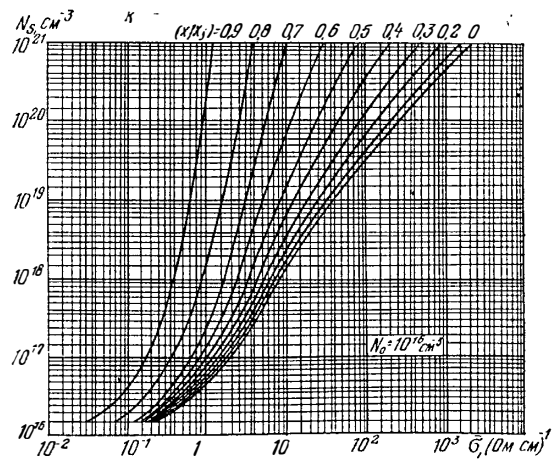
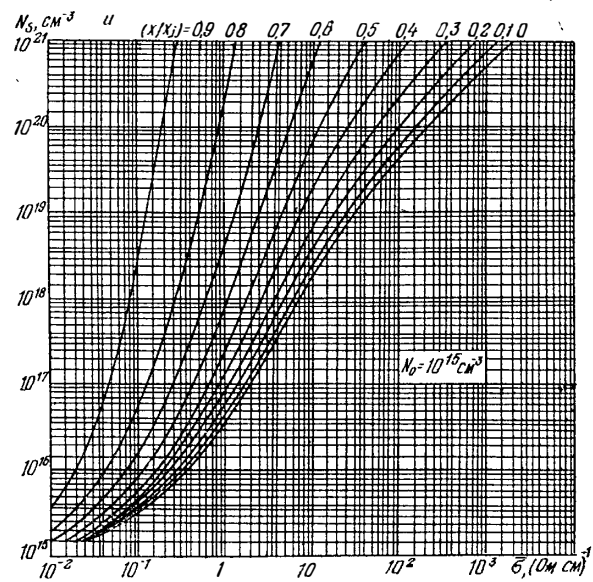


Рис. 7.3. Продолжение.

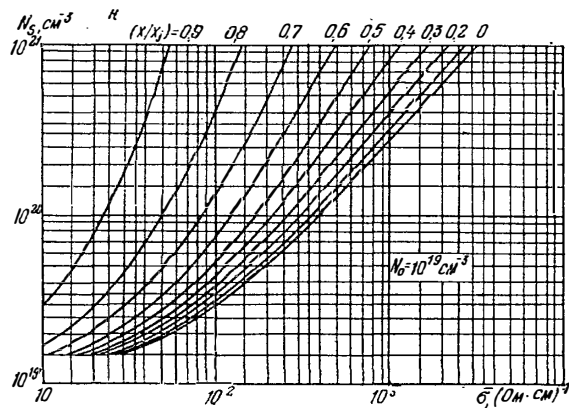
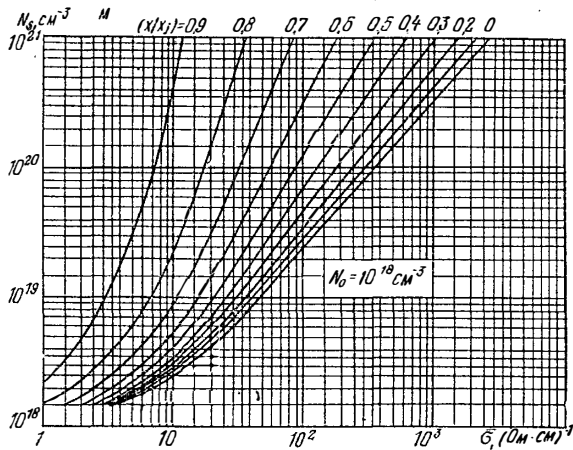
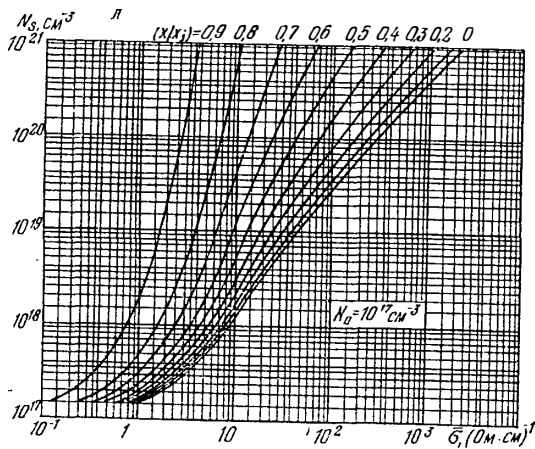


Рис. 7.3. Продолжение.

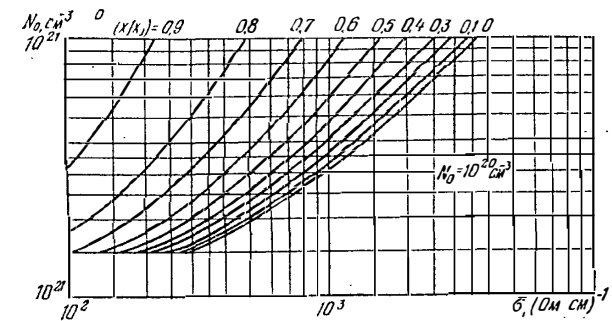


Рис. 7.3. Окончание.

в биполярных микросхемах). Значительно реже используются структуры типа металл — диэлектрик — металл (МДМ).

Емкости $p-n$ -переходов рассчитываются по формуле (6.19), удельные емкости могут быть при этом определены по графикам, представленным на рис. 6.20—6.23.

На рис. 7.4 изображены структуры конденсаторов полупроводниковых микросхем, а в табл. 7.3 представлены ориентировочные значения их параметров. Структура типа МДП (рис. 7.4, д) обладает удельной емкостью $C_0 = 400-600$ пФ/мм² и пробивным напряжением $U_{пр} = 10-50$ В.

Добротность полупроводниковых конденсаторов на основе резких $p-n$ -переходов определяется в соответствии с выражением

$$Q = \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 U_{пр} N_a N_d}{2(N_a + N_d)}}, \quad (7.1)$$

где N_a , N_d — концентрации примесей (акцепторов и доноров) по обе стороны $p-n$ -перехода; $U_{пр}$ — напряжение пробоя (см. § 6.2).

Добротность полупроводниковых конденсаторов на основе плавных $p-n$ -переходов (линейная аппроксимация) рассчитывается по формуле

$$Q = \sqrt[3]{\frac{1q(\epsilon\epsilon_0)^2 a U_{пр}^2}{12}}, \quad (7.2)$$

где a — градиент концентрации примесей, определяемый по формулам (6.17) и (6.18).

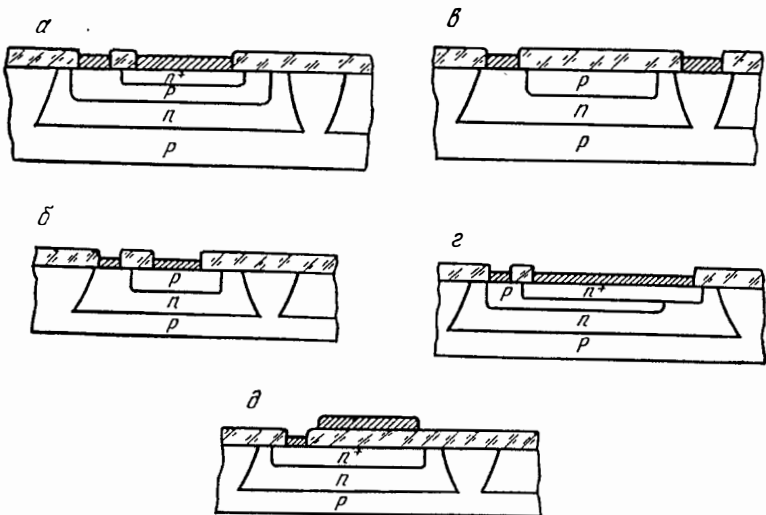


Рис. 7.4. Структуры конденсаторов полупроводниковых микросхем:

а — на основе эмиттерного $p-n$ -перехода; б — на основе коллекторного $p-n$ -перехода; в — на основе $p-n$ -перехода коллектор-подложка; г — на основе параллельно включенных эмиттерного и коллекторного $p-n$ -переходов; д — типа металл — диэлектрик — полупроводник.

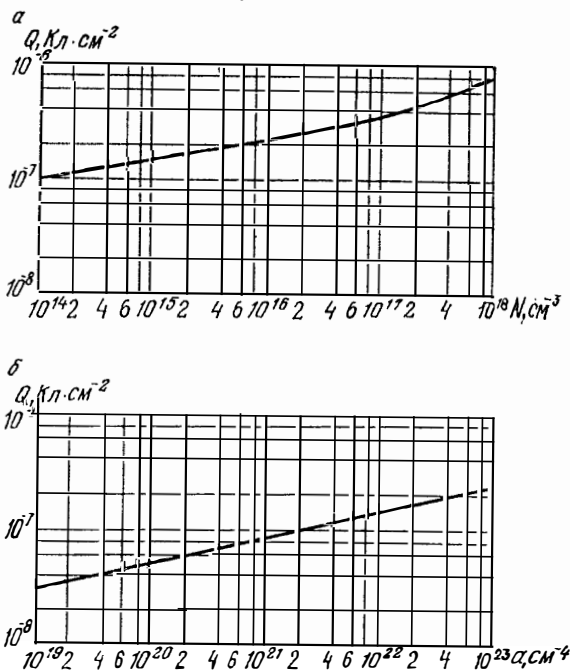


Рис. 7.5. Добротность полупроводниковых конденсаторов в зависимости от характера распределения примесей:

а — на основе $p-n$ -перехода; б — на основе плавного $p-n$ -перехода.

Табл. 7.3. Параметры конденсаторов полупроводниковых биполярных микросхем

Номер рисунка	Плоскость $p-n$ -перехода	Удельная емкость и пробивное напряжение			
		Удельное сопротивление коллектора $\rho = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$		Удельное сопротивление коллектора $\rho = 1,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$	
		C_0 , пФ/мм ²	$U_{пр}$, В	C_0 , пФ/мм ²	$U_{пр}$, В
7.4, а	Горизонтальная	600	7	350	7
	Вертикальная (боковая)	1000	7	1000	7
7.4, б	Горизонтальная	350	25	150	70
	Вертикальная (боковая)	350	25	150	70
7.4, в	Горизонтальная	100	35	100	100
	Вертикальная (боковая)	250	35	100	100
7.4, г	Горизонтальная	600 и 100	7	350 и 100	7
	Вертикальная (боковая)	1000 и 250	7	1000 и 100	7

Соотношения (7.1) и (7.2) представлены графически на рис. 7.5. Значение N (рис. 7.5, а) рассчитывается согласно равенству

$$N = \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}$$

Емкость конденсаторов типа металл — диэлектрик — полупроводник рассчитывается следующим образом. Поскольку полная удельная емкость структуры типа МДП C_m состоит из последовательно включенных удельных емкостей диэлектрика C_d и пространственного заряда в полупроводнике C_n , она может быть определена согласно соотношению

$$C_m = \frac{C_d C_n}{C_d + C_n}$$

Удельная емкость диэлектрика является величиной постоянной, определяет максимальную удельную емкость всей структуры и рассчитывается по формуле

$$C_d = \frac{\epsilon_d \epsilon_0}{d_1}, \quad (7.3)$$

где ϵ_d и d_1 — диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрической пленки.

Емкость области пространственного заряда в поверхностном слое полупроводника зависит от приложенного к МДП-конденсатору напряжения.

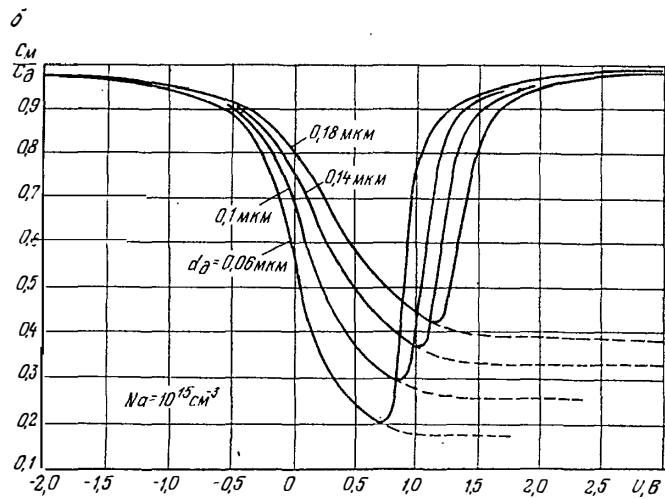
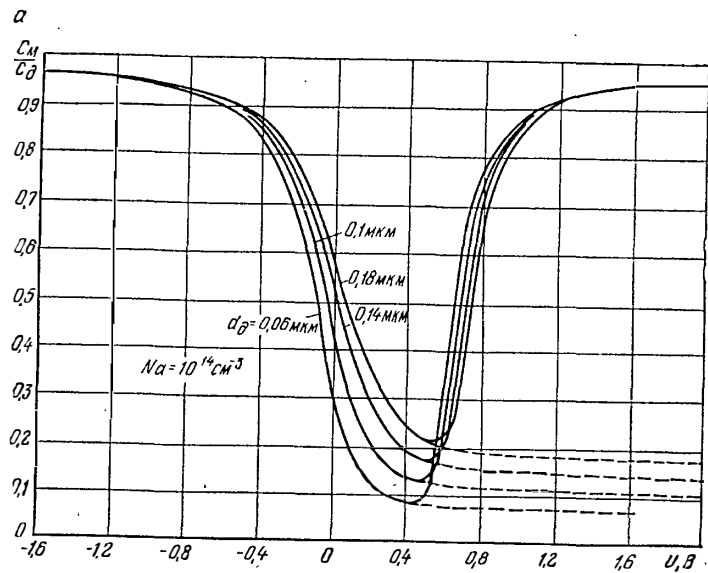
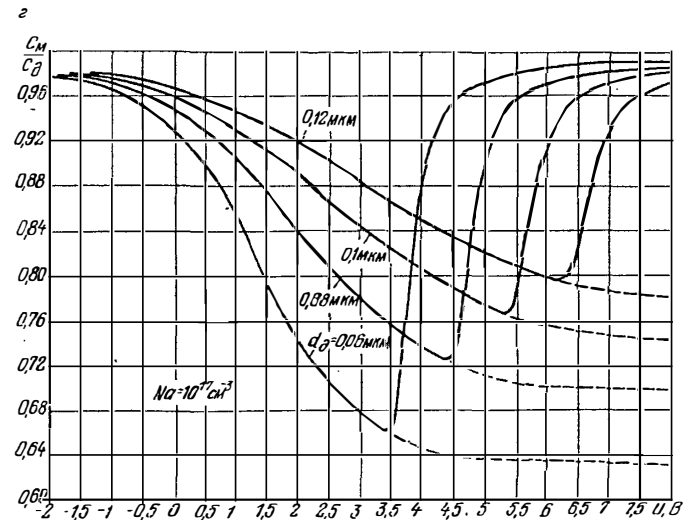
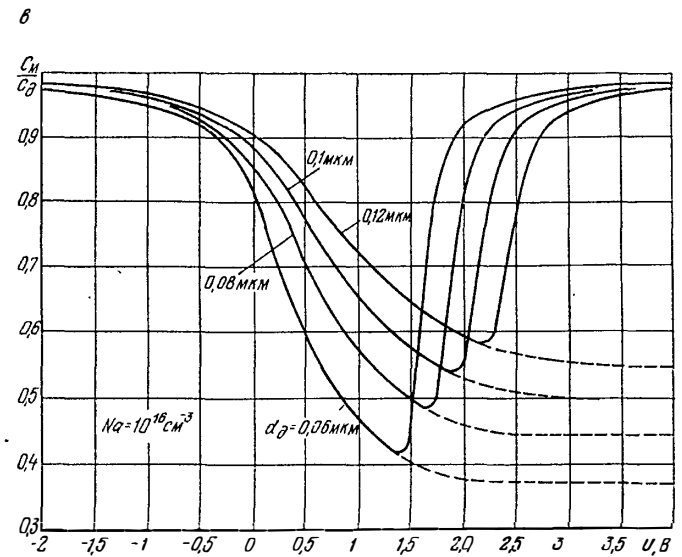


Рис. 7.6. Зависимости удельной емкости
 $a - N_a = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $b - N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

Зависимости отношения полной удельной емкости к удельной емкости диэлектрика C_M/C_D от напряжения U , приложенного к идеальному (без поверхностных состояний на границе диэлектрик — полупроводник) МДП-конденсатору, представлены на рис. 7.6. Толщина диэлектрика d_D при этом является параметром (структура алюминий — двуокись кремния — кремний). Как видно из рис. 7.6, при определенных величинах при-



МДП-конденсатора от напряжения:
 $в - N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $г - N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

ложенного напряжения полная емкость структуры принимает минимальные значения.

На рис. 7.7 представлены зависимости отношения полной минимальной емкости к емкости диэлектрика $C_{M \text{ min}}/C_D$ идеального МДП-конденсатора от толщины диэлектрика; концентрация акцепторных примесей в полупроводнике p -типа является при этом параметром.

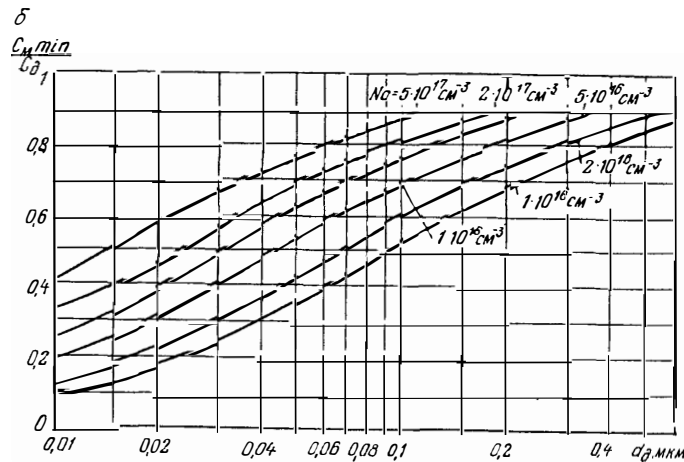
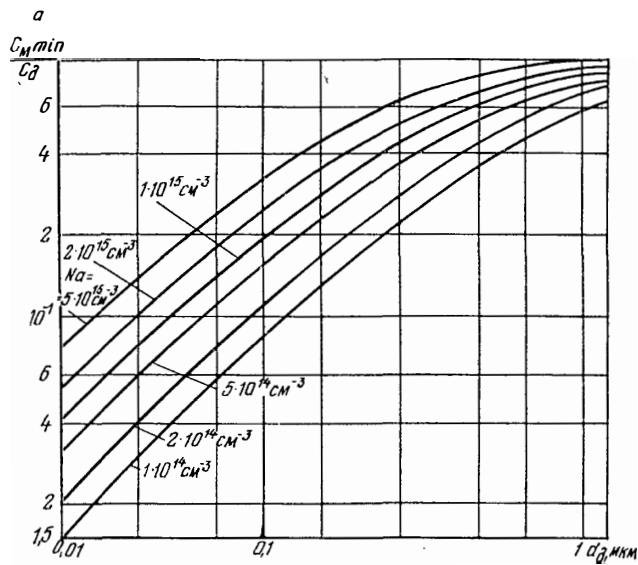


Рис. 7.7. Зависимости минимальной удельной емкости МДП-конденсатора от толщины диэлектрика и концентрации акцепторов в полупроводнике:
 $a - N_a = 1 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $b - N_a = 1 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

7.3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С $p-n$ -ПЕРЕХОДОМ

Структура интегрального полевого транзистора с затвором на основе $p-n$ -перехода изображена на рис. 7.8. Транзистор имеет затвор, который состоит из верхней n^+ -области и нижней n -области. Обе области затвора соединены между собой в пределах полупроводниковой структуры благодаря тому, что верхняя n^+ -область несколько выходит за пределы p -обла-

сти, образующей исток, сток и канал, и контактирует таким образом с нижней n -областью затвора.

Некоторые другие конструктивно-технологические варианты полевых транзисторов представлены в табл. 7.4.

Принцип действия полевого транзистора основан на управлении током канала с помощью напряжения, подаваемого на затвор. Если к затвору прикладывается напряжение, то области пространственного заряда

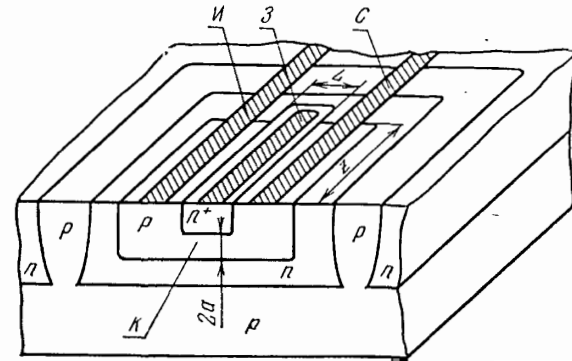


Рис. 7.8. Структура полевого транзистора с $p-n$ -переходом:
 $И$ — исток; $З$ — затвор; $С$ — сток; $К$ — канал.

$p-n$ -перехода затвора модулируют сечение канала, изменяя его сопротивление.

Важным параметром транзистора является *напряжение отсечки*, т. е. напряжение на затворе, при котором области пространственного заряда $p-n$ -переходов нижней и верхней областей затвора смыкаются, полностью перекрывая канал. В схеме с общим истоком при заземленных истоке и затворе напряжение отсечки достигается за счет увеличения напряжения на стоке. При этом области пространственного заряда нижней и верхней областей затвора наиболее близки к смыканию у конца канала, обращенного к стоку. В данном случае отсечки тока до нуля нет, происходит лишь отсечка его приращений.

Параметром, характеризующим усилительные свойства транзистора, является *крутизна*:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{з.н}}$$

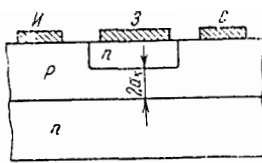
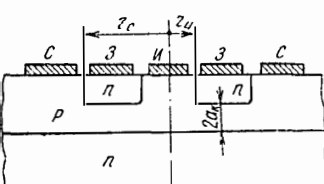
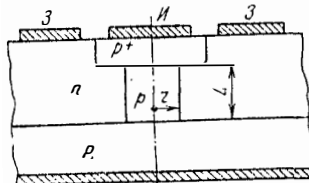
где ΔI_c — изменение тока стока; $\Delta U_{з.н}$ — изменение напряжения затвор — исток.

Если канал транзистора легирован равномерно и $p-n$ -переход затвор — канал является резким, то семейство вольт-амперных характеристик в триодной области описывается выражением

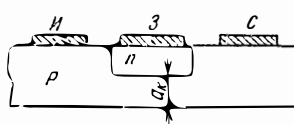
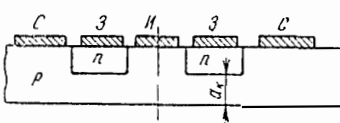
$$I_c = I_{c \max} \left[\frac{U_{з.н} + U_c}{U_{отс}} - \left(3 - 2 \sqrt{\frac{U_{з.н} + U_c}{U_{отс}}} \right) - \frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \left(3 - 2 \sqrt{\frac{U_{з.н}}{U_{отс}}} \right) \right],$$

где I_c — ток стока; $I_{c \max}$ и $U_{отс}$ — максимальный ток стока и напряже-

Табл. 7.4. Формулы для расчета напряжения отсечки, максимальных крутизны и тока стока при $U_{з.н} = 0$ полевых транзисторов с $p-n$ -переходом

Структура транзистора	Распределение примесей в переходе затвор-канал	Конструктивные параметры транзистора	Напряжение отсечки, $U_{отс}$	Максимальная крутизна на низкой частоте, S_{max}	Максимальный ток стока, $I_{с max}$
1	2	3	4	5	6
	Ступенчатый $p-n$ -переход	Прямоугольный канал, два перехода, толщина канала $2a_k$	$\frac{qN_a a_k^2}{2\epsilon\epsilon_0}$	$2q\mu_p N_a a_k \frac{Z}{L}$	$\frac{q^2 \mu_p N_a^2 a_k^3 Z}{3\epsilon\epsilon_0 L}$
	То же	Кольцевой канал, радиус истока r_n , радиус стока r_c , два перехода, толщина канала $2a_k$	$\frac{qN_a a_k^2}{2\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{4\pi q\mu_p N_a a_k}{\ln(r_n/r_c)}$	$\frac{2\pi q^2 \mu_p N_a^2 a_k^3}{3\epsilon\epsilon_0 \ln(r_n/r_c)}$
	»	Цилиндрический канал, радиус r , длина L	$\frac{qN_a r^2}{4\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{\pi r^2 q \mu_p N_a}{L}$	$\frac{\pi q^2 \mu_p N_a^2 r^4}{16\epsilon\epsilon_0 L}$

Продолжение табл. 7.4

1	2	3	4	5	6
	Переход с линейно-изменяющимся распределением концентрации примесей	Прямоугольный канал, один переход, толщина канала $2a_k$, градиент концентрации примесей a	$\frac{2qa a_k^3}{3\epsilon\epsilon_0}$	$q\mu_p a a_k^2 \frac{Z}{2L}$	$\frac{2q^2 \mu_p a^2 a_k^5 Z}{15\epsilon\epsilon_0 L}$
	То же	Кольцевой канал, один переход, толщина канала $2a_k$, градиент концентрации примесей a	$\frac{2qa a_k^3}{3\epsilon\epsilon_0}$	$\frac{\pi q \mu_p a a_k^2}{\ln(r_n/r_c)}$	$\frac{4\pi q^2 \mu_p a^2 a_k^5}{15\epsilon\epsilon_0 \ln(r_n/r_c)}$

ние отсечки, определяемые по данным табл. 7.4, $U_{з.н}$ — напряжение затвор — исток; U_c — напряжение сток — исток.

Крутизна определяется по формуле

$$S = S_{\max} \left(1 - \sqrt{\frac{U_c - U_{з.н}}{U_{отс}}} \right),$$

где S_{\max} — максимальная крутизна, определяемая по данным табл. 7.4.

Проводимость канала на постоянном токе и при нулевом напряжении на затворе

$$\sigma_k = \frac{I_c}{U_c} = \frac{I_{c \max}}{U_{отс}} \left(3 - 2 \sqrt{\frac{U_c}{U_{отс}}} \right).$$

Для пентодной области вольт-амперных характеристик действительны следующие выражения.

Величина тока стока в области насыщения

$$I_{c \text{ нас}} = I_{c \max} \left[1 - \frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \left(3 - 2 \sqrt{\frac{U_{з.н}}{U_{отс}}} \right) \right];$$

крутизна

$$S = S_{\max} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{з.н}}{U_{отс}}} \right).$$

Если распределение примеси в p - n -переходе затвор — канал подчиняется линейному закону, соответствующие выражения для триодной области характеристик имеют вид:

$$I_c = -\frac{I_{c \max}}{2} \left\{ \frac{U_{з.н} + U_c}{U_{отс}} \left[5 - 3 \sqrt{\left(\frac{U_{з.н} + U_c}{U_{отс}} \right)^2} \right] - \frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \left[5 - 3 \sqrt{\left(\frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \right)^2} \right] \right\};$$

$$S = S_{\max} \left[1 - \sqrt{\left(\frac{U_{з.н} + U_c}{U_{отс}} \right)^2} \right];$$

$$\sigma_k = \frac{I_{c \max}}{2U_{отс}} \left[5 - 3 \sqrt{\left(\frac{U_c}{U_{отс}} \right)^2} \right].$$

Для пентодной области характеристик:

$$I_{c \text{ нас}} = I_{c \max} \left[1 - \frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \left(\frac{5}{2} - \frac{3}{2} \sqrt{\left(\frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \right)^2} \right) \right];$$

$$S = S_{\max} \left[1 - \sqrt{\left(\frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \right)^2} \right].$$

В пентодной области характеристик при любом характере распределения примесей в канале зависимость тока стока от напряжения имеет вид

$$I_c = I_{c \max} \left(1 - \frac{U_{з.н}}{U_{отс}} \right).$$

Полевой транзистор с p - n -переходом может работать в режиме высокого усиления малых токов, если к его затвору прикладывать прямое

смещение, не превышающее контактной разности потенциалов p - n -перехода затвора. Статический коэффициент усиления по току в схеме с общим истоком может быть определен в данном случае по формуле

$$B = \frac{2U_c Z \left(\alpha_k - \sqrt{2\epsilon\epsilon_0\mu\rho \left(\varphi_{к.з} - \varphi_T \ln \left(\frac{I_3}{I_{30}} \right) \right)} \right)}{\rho L I_3},$$

где U_c — приложенное напряжение сток — исток; μ и ρ — подвижность носителей заряда и удельное сопротивление материала в области канала; $\varphi_{к.з}$ — контактная разность потенциалов p - n -перехода затвора; I_3 — ток прямого смещенного затвора; I_{30} — начальный ток (ток насыщения) p - n -перехода затвора [см. формулу (6.22)].

7.4. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ТИПА МДП

Структура интегрального транзистора типа МДП (металл — диэлектрик — полупроводник) показана на рис. 7.9. МДП-транзистор является, как и интегральные транзисторы других типов, четырехэлектродным прибором, поскольку, помимо контактов к истоку, стоку и затвору, создается контакт к подложке. Управление током канала МДП-транзистора осуществляется потенциалом, приложенным к затвору, и происходит за счет регулирования количества основных носителей заряда в канале.

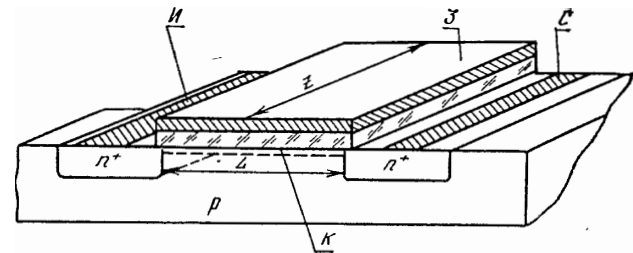


Рис. 7.9. Структура полевого транзистора типа МДП:
И — исток; З — затвор; С — сток; К — канал.

Транзисторы типа МДП по конструктивно-технологическим признакам подразделяются на две большие группы: со встроенным и индуцированным (наведенным) каналами. Встроенный канал создается в процессе изготовления транзистора путем диффузии или ионной имплантации примесей. Такой канал существует независимо от наличия или отсутствия потенциала на затворе.

В противоположность встроенному индуцированный канал появляется в МДП-транзисторе только в результате приложения потенциала к затвору.

Как встроенный, так и индуцированный каналы могут быть p - или n -типа электропроводности. Таким образом, в целом возможны четыре разновидности транзисторов типа МДП.

В транзисторах с индуцированным каналом под действием приложенного к затвору потенциала в поверхностном слое полупроводника, т. е. в канале, создается увеличение количества основных носителей заряда. Поэтому такие транзисторы работают только в так называемом режиме обогащения.

Транзисторы со встроенным каналом могут работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения канала от основных носителей заряда, в зависимости от знака приложенного к затвору потенциала.

Одним из важнейших параметров МДП-транзисторов со встроенным каналом является *напряжение отсечки*.

Напряжение отсечки представляет собой такое минимальное (по модулю) напряжение на затворе, при котором проводимость канала становится равной нулю. Для приборов с *n*-каналом напряжение отсечки имеет отрицательный знак.

Аналогичный параметр транзисторов с индуцированным каналом называется *пороговым напряжением*.

Пороговым напряжением является такое максимальное (по модулю) напряжение на затворе, при котором проводимость канала становится не равной нулю. Для приборов с *n*-каналом пороговое напряжение имеет положительный знак.

Пороговое напряжение определяется по формуле

$$U_0 = \Phi_{м.п} + 2\Phi_F - \frac{Q_n + Q_c}{C_d},$$

где $\Phi_{м.п}$ — разность работ выхода электронов в системе металл — затвор — полупроводник; Φ_F — потенциал уровня Ферми в полупроводнике, отсчитываемый от потенциала середины запрещенной зоны; Q_n — плотность заряда нескомпенсированных ионизированных атомов примеси в подложке; Q_c — плотность фиксированного заряда на поверхности раздела диэлектрик — полупроводник; C_d — удельная емкость затвор — канал, определяемая по формуле (7.3).

Разность работ выхода электронов в системе металл — полупроводник может быть найдена из выражения

$$\Phi_{м.п} = \Phi_{м.п.с} \pm \Phi_T \ln(N/n_i),$$

где $\Phi_{м.п.с}$ — разность работ выхода электронов в системе металл — собственный полупроводник; N — концентрация примесей в полупроводнике. Знак + в выражении для $\Phi_{м.п}$ соответствует транзистору с *n*-каналом.

Плотность заряда нескомпенсированных атомов примеси в подложке может быть найдена по формуле

$$Q_n = \pm \sqrt{2q\epsilon_n \epsilon_0 N |2\Phi_F|},$$

где ϵ_n — диэлектрическая проницаемость полупроводника. Знак + соответствует транзистору с *p*-каналом.

Плотность заряда поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик — полупроводник оказывает решающее влияние на величину порогового напряжения, она определяется экспериментально из электрофизических измерений.

Зависимость порогового напряжения МДП-транзистора с *p*-каналом от толщины диэлектрика и концентрации примеси в *n*-подложке показана на рис. 7.10.

Усижительные свойства МДП-транзисторов характеризуются крутизной, максимальное значение которой определяется по формуле

$$S_{max} = \mu C_d \frac{Z}{2L},$$

где μ — подвижность носителей заряда в канале; Z и L — ширина и длина канала.

Полупроводниковая подложка, на основе которой создается МДП-транзистор, имеет тип электропроводности, противоположный типу

электропроводности канала. Воздействие подложки на параметры МДП-транзистора характеризуется коэффициентом влияния подложки, максимальное значение которого зависит от конструктивно-технологических факторов, согласно следующему выражению:

$$\eta_{max} = \frac{1}{2C_d} \sqrt{\frac{\epsilon_n \epsilon_0 q N}{\Phi_F}}. \quad (7.4)$$

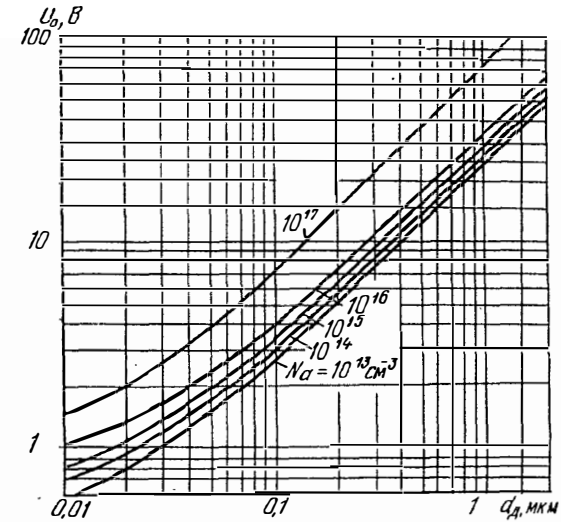


Рис. 7.10. Зависимость порогового напряжения МДП-транзистора с полупроводниковым *p*-каналом от толщины диэлектрика затвора и концентрации донорной примеси в подложке.

На рис. 7.11 представлена зависимость коэффициента влияния подложки η_{max} от концентрации донорной примеси в подложке N_d (транзистор с *p*-каналом) и толщины диэлектрика d_d .

При подаче на подложку обратного по отношению к истоку смещения она действует как затвор в полевом транзисторе с *p-n*-переходом. Изменение постоянного смещения на подложке оказывает влияние на пороговое напряжение и крутизну. С учетом приложенного напряжения соотношение (7.4) принимает вид

$$\eta = \eta_{max} \sqrt{\frac{2\Phi_F}{U_{н.п} + 2\Phi_F}},$$

где $U_{н.п}$ — приложенное напряжение исток — подложка (ориентировочное значение $U_{н.п} \approx 3U_0$).

Обозначая напряжения затвор — подложка и сток — подложка соответственно как $U_{з.п}$ и $U_{с.п}$ и используя

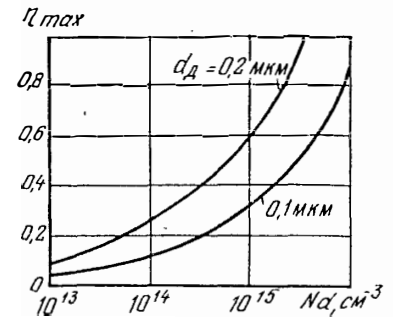


Рис. 7.11. Зависимость коэффициента влияния подложки от концентрации донорной примеси в подложке и толщины диэлектрика.

понятия эффективного напряжения на затворе $U_{эф} = (U_{з.п} - U_0)(1 + \eta)$ и эффективной крутизны $S_{эф} = S_{max}(1 + \eta)$, семейство вольт-амперных характеристик МДП-транзистора можно описать следующими выражениями.

Для триодной области, где $U_{с.п} \leq U_{эф}$:

$$I_c = S_{эф}(2U_{эф} - U_{с.п} - U_{и.п})(U_{с.п} - U_{и.п}).$$

Для пентодной области, где $U_{с.п} > U_{эф}$:

$$I_c = S_{эф}(U_{эф} - U_{и.п})^2.$$

Для частного случая при $U_{и.п} = 0$ и $U_{с.п} \leq U_{эф}$

$$I_c = S_{эф}(2U_{эф} - U_{с.п})U_{с.п}.$$

Для частного случая при $U_{и.п} = 0$ и $U_{с.п} > U_{эф}$

$$I_c = S_{эф}U_{эф}^2.$$

7.5. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Широкое использование биполярных транзисторов в интегральных микросхемах привело к созданию чрезвычайно большого количества конструктивно-технологических вариантов интегральных транзисторов данного типа, характеризующихся еще большим разнообразием электрических параметров. В то же время в научно-технической литературе почти отсутствуют сведения универсального справочного характера, относящиеся к конструированию и расчету структуры интегральных биполярных транзисторов. В связи с этим в настоящем параграфе рассматривается методика расчета интегрального планарно-эпитаксиального $n-p-n$ -транзистора маломощной полупроводниковой аналоговой ИМС средней степени интеграции. Данная методика достаточно универсальна, при необходимости она может быть применена для расчета биполярных транзисторов ИМС других типов.

В процессе физико-топологического расчета решается совокупность уравнений, связывающих электрофизические параметры исходных материалов, параметры технологических процессов изготовления, геометрические размеры и электрофизические параметры транзистора с его электрическими характеристиками.

Структура биполярного транзистора представлена на рис. 7.12. Планарно-эпитаксиальный транзистор типа $n-p-n$ с полосковой геометрией обладает двумя базовыми контактами и изолирован от подложки и остальных элементов микросхемы $p-n$ -переходом.

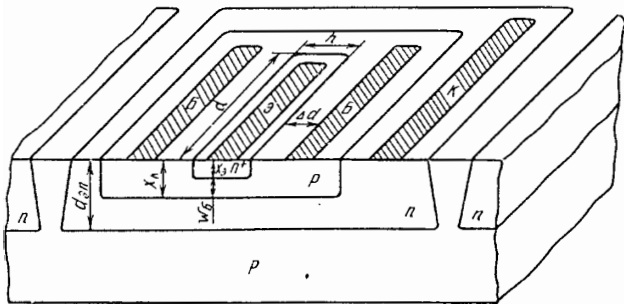


Рис. 7.12. Структура биполярного транзистора типа $n-p-n$.

Первоначально, принимая во внимание несколько наиболее важных заданных электрических параметров транзистора (коэффициент передачи тока, граничная частота), выбираются параметры исходного материала подложки и эпитаксиального слоя, в котором непосредственно будет создаваться транзистор (тип проводимости, удельное сопротивление). Затем оценивается диапазон дискретных значений основных расчетных размеров структуры (глубин залегания переходов, толщин базы), а также основные геометрические размеры в плане.

Далее проводится точный машинный расчет распределения концентрации примесей в структуре и всех электрических параметров.

Для расчета профиля распределения примесей в областях базы и эмиттера, а также в эмиттерном и в коллекторном $p-n$ -переходах используются соотношения (6.1), (6.3) и (6.6). В результате определяются времена диффузии акцепторных и донорных примесей для создания базы и эмиттера, а также проверяется соответствие глубин залегания переходов заданным $x_э$ расч и $x_к$ расч.

Электрический режим транзистора по постоянному току определяется током коллектора I_k и напряжением на нем U_k . Для расчета основных электрических характеристик задается начальное приближение напряжения на эмиттерном переходе $U_{э.б}$. Величина $U_{э.б}$ определяется из выражения для вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода, причем ток эмиттера считается первоначально равным току коллектора:

$$I_э = I_k = I_{э0} \exp\left(\frac{U_{э.б}}{\Phi_T}\right).$$

Начальный ток эмиттерного перехода $I_{э0}$ определяется из соотношения

$$I_{э0} = S_э q \frac{n_i^2 \exp(U_{э.б}/\Phi_T)}{\int_{x_э}^{x_к} \frac{N_a - N_d}{D_n} dx},$$

где $S_э$ — площадь эмиттерного перехода; $x_э$ и $x_к$ — координаты границ областей пространственных зарядов эмиттерного и коллекторного переходов в базовой области (разность координат определяет толщину нейтральной области базы $x_к - x_э = W_б$).

Значение координаты $x_э$ можно определить из выражения

$$x_э = x_э + \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0(\Phi_{к.э} - U_{э.б})}{qa}},$$

где $x_э$ — координата металлургического перехода эмиттер — база; $\Phi_{к.э}$ — контактная разность потенциалов эмиттерного перехода; a — градиент концентрации примесей в эмиттерном переходе.

Координата $x_к$ определяется из соотношения

$$x_к = x_к + L_a \ln \frac{l_k/L_a}{1 - \exp(-l_k/L_a)},$$

где $L_a = \frac{W_б}{\ln N_a(x_э)/N_{dk}}$ и $l_k = L_a + \sqrt{L_a^2 + \frac{2\epsilon\epsilon_0(\Phi_{к.к} + U_k)}{qN_{dk}}}$.

Символами $\Phi_{к.к}$ и $N_{ак}$ обозначены контактная разность потенциалов коллекторного перехода и концентрация донорных примесей в области коллектора.

Емкости эмиттерного и коллекторного переходов рассчитываются в соответствии с формулой (6.19).

Омическое сопротивление базы транзистора состоит из суммы сопротивлений активной и пассивной областей, т. е.

$$r'_б = r'_{б.а} + r'_{б.п}$$

Составляющие полного сопротивления базы могут быть найдены из выражений:

$$r'_{б.а} = \frac{h}{x'_к};$$

$$12d \int_{x'_э}^{x'_к} q\mu N dx$$

$$r'_{б.п} = \frac{\Delta d}{2d \int_0^{x'_к} q\mu N dx}.$$

Для приблизительного расчета омических сопротивлений областей транзисторов можно воспользоваться также формулами, представленными в табл. 7.5 (стрелками показаны направления токов).

Коэффициент передачи тока транзистора в схеме с общим эмиттером определяется соотношением

$$B_{ст} = \frac{I_к}{I_{бp} + I_{бp-n} + I_{бс}}$$

где $I_{бp}$, $I_{бp-n}$ и $I_{бс}$ — составляющие тока базы, обусловленные инжекцией дырок в область эмиттера, рекомбинацией в области пространственного заряда эмиттерного перехода и рекомбинацией на поверхности пассивной области базы соответственно. Указанные составляющие тока базы могут быть найдены из следующих выражений:

$$I_{бp} = \frac{qS_э\rho_n \exp(U_{э.б}/\Phi_T) L_d}{\tau_p},$$

где ρ_n и τ_p — концентрация дырок на границе области пространственного заряда в эмиттере и время жизни дырок в области эмиттера; $L_d = L_a/3$ — характеристическая длина в распределении доноров.

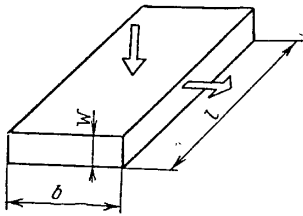
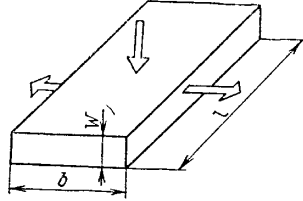
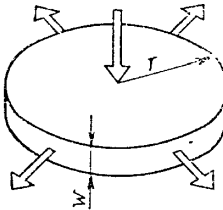
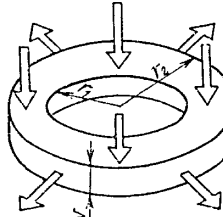
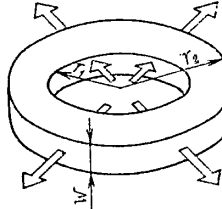
$$I_{бp-n} = \frac{qS_э n_i \exp(U_{э.б}/2\Phi_T) l_э}{\sqrt{\tau_{n0}\tau_{p0}} (\Phi_{к.э} - U_{э.б})},$$

где τ_{n0} и τ_{p0} — времена жизни электронов и дырок.

$$I_{бс} = qn_i 0,5 N_t \sqrt{S_n \bar{v}_n S_p \bar{v}_p L_n P_э} \exp(U_{э.б}/2\Phi_T),$$

где N_t — концентрация рекомбинационных центров на поверхности

Табл. 7.5. Формулы для расчета сопротивления областей транзисторов

Форма и размеры области	Сопротивление
	$R = \frac{\rho}{3W} \frac{b}{l}$
	$R = \frac{\rho}{12W} \frac{b}{l}$
	$R = \frac{\rho}{8\pi W}$
	$R = \frac{\rho}{4\pi W} \ln \frac{r_2}{r_1}$
	$R = \frac{\rho}{2\pi W} \ln \frac{r_2}{r_1}$

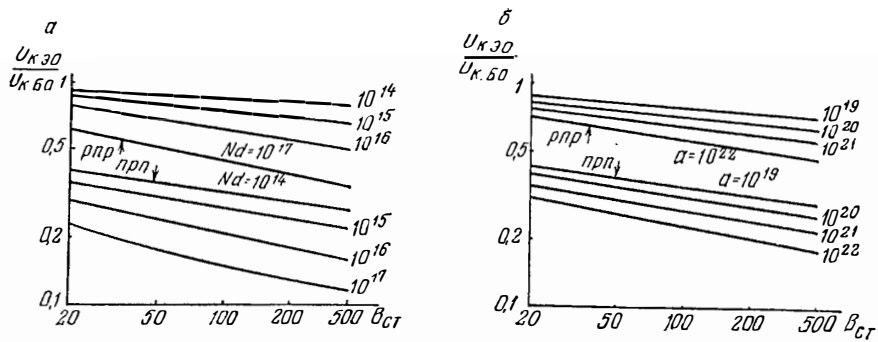


Рис. 7.13. Соотношения между напряжением пробоя коллекторного перехода транзистора $U_{к.60}$ и напряжением пробоя в схеме с оборванной базой $U_{к.30}$ в зависимости от коэффициента передачи тока $B_{ст}$:
 а — транзисторы с резким коллекторным переходом; б — транзисторы с линейным распределением концентрации примесей в коллекторном переходе.

пассивной области базы; S_n и S_p — сечения ловушек захвата для электронов и дырок; \bar{v}_n и \bar{v}_p — средние тепловые скорости электронов и дырок; L_n' — диффузионная длина электронов в поверхностном слое пассивной базы; $P_э$ — периметр эмиттера.

Граничная частота усиления транзистора определяется согласно выражению

$$f_T = [2\pi[\varphi_T C_э/I_э + 1/\omega_T' + (R_K + r_б') C_K]]^{-1},$$

где $\omega_T' = D_n/L_n W_6$ — предельная частота; $R_K = \frac{d_{эп} - x_K - l_K}{qN_{dk} \mu_n S_э}$ — омическое сопротивление области коллектора; $d_{эп}$ — толщина эпитаксиального слоя.

Напряжение пробоя перехода коллектор — база рассчитывается в соответствии с соотношением (6.23).

Между напряжением пробоя перехода коллектор — база $U_{к.60}$ и напряжением пробоя транзистора в схеме с оборванной базой $U_{к.30}$ существует соотношение

$$\frac{U_{к.30}}{U_{к.60}} = \frac{1}{n \sqrt{B_{ст}}},$$

где $n \approx 3$.

Для определения напряжения $U_{к.30}$ можно воспользоваться графиками, представленными на рис. 7.13, для транзисторов типов $n-p-n$ с резкими и линейными переходами.

Минимальный коэффициент шума транзистора на низкой частоте при оптимальном сопротивлении источника сигнала рассчитывается по формуле

$$F = 1 + \left(\frac{2qr_б' I_K}{kTB_{ст}} \right)^{1/2} + B_{ст}^{1/2}.$$

Дифференциальное сопротивление коллекторного $p-n$ -перехода определяется согласно выражению

$$r_K = \sqrt{\frac{2qN_a}{\epsilon \epsilon_0} \frac{L_n^2}{W_6} \frac{\sqrt{U_K}}{I_э}},$$

где L_n — диффузионная длина электронов в области базы.

Блок-схема алгоритма автоматизированного расчета биполярного транзистора $n-p-n$ -типа по вышеописанной методике представлена на

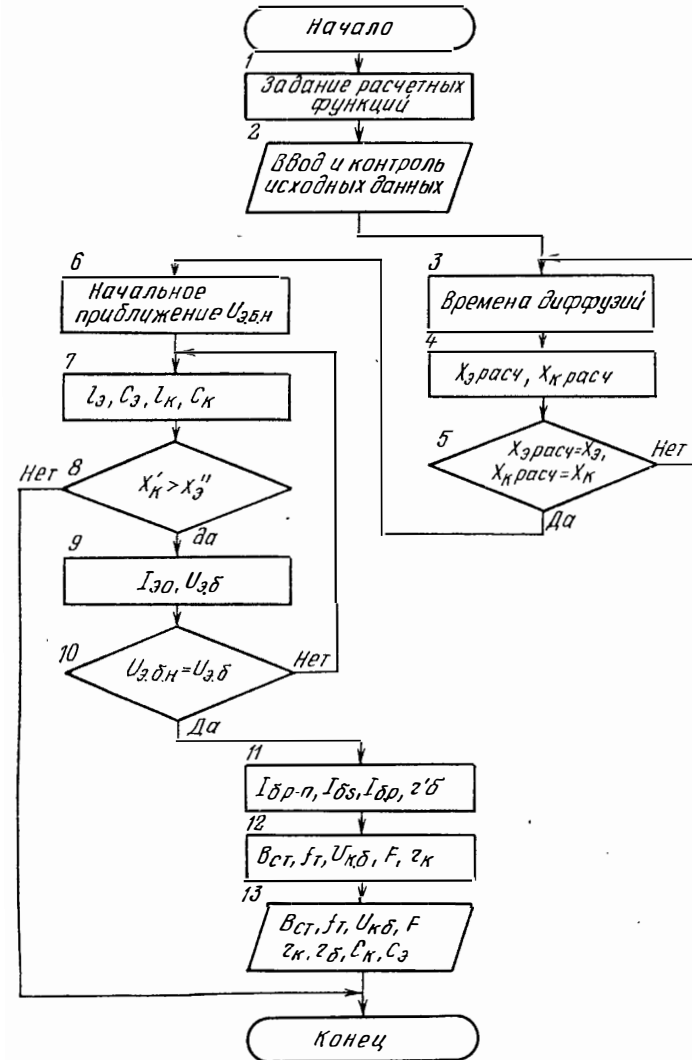


Рис. 7.14. Блок-схема алгоритма автоматизированного расчета биполярного транзистора типа $n-p-n$.

Табл. 7.6. Перечень идентификаторов исходных и выводимых на печать параметров биполярного транзистора при расчете на ЭВМ

Обозначение параметра в расчетных формулах	Обозначение параметра в программе расчета	Размерность	Обозначение параметра в расчетных формулах	Обозначение параметра в программе расчета	Размерность
N_{Sa}	N01	см ⁻³	x_3	XE	см
N_{Sd}	N03	см ⁻³	W_6	WB	см
$N_{dк}$	NDK	см ⁻³	$d_{эп}$	DEP	см
t_1	T1	с	T	T	К
t_2	T2	с	$B_{ст}$	BST2	—
t_3	T3	с	f_T	FT1	Гц
h	A4	см	$U_{к.б}$	UK1	В
d	D4	см	F	FG	—
Δd	DD	см	r_k	RK1	Ом
D_{01}	D01	см ² /с	r_6^1	RB	Ом
D_{03}	D03	см ² /с	C_3	CE	пФ
ΔH_1	DH1	эВ	$C_{к.а}$	CKA	пФ
ΔH_3	DH3	эВ			

рис. 7.14. В табл. 7.6 приведен перечень идентификаторов исходных и выводимых на печать параметров транзистора. Программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН IV представлена в приложении. Программа составлена применительно к ЭВМ типа ЕС-1020 для ввода исходных данных с перфокарт и вывода результатов на АЦПУ. Время расчета одной транзисторной структуры составляет примерно 5 мин. (Программа разработана В. Е. Галузо.)

8. ЗАЩИТА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

8.1. 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 защита (с использованием различных типов корпусов).

Выбор конструктивно-технологического варианта исполнения *бескорпусной защиты* определяется в первую очередь назначением и требованиями, предъявляемыми к защищаемой микросхеме. Например, если предусматривается защита сборочной единицы, в состав которой входит бескорпусная микросхема, то предварительно производится лишь промежуточная технологическая защита микросхемы, обеспечивающая стабильность ее параметров на этапе изготовления. Если же бескорпусная микросхема выпускается в виде самостоятельного изделия, то ее защита осуществляется с учетом всего комплекса климатических и механических воздействий, предусмотренных техническими условиями на данную микросхему.

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.

Для бескорпусной защиты гибридных ИМС используются в основном неорганические и органические полимерные материалы. Наиболее широко применяемые для этих целей материалы и методы их нанесения приведены в табл. 8.1. Более высокой надежностью характеризуются покрытия из неорганических материалов, однако бескорпусная защита на основе органических полимерных материалов дешевле.

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 среды, окружающей микросхему; 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; обеспе-

Табл. 8.1. Материалы для бескорпусной защиты гибридных ИМС и методы их нанесения

Тип микросхемы	Назначение защиты	Защитные материалы	Методы нанесения материалов
Тонкопленочные	Стабилизация параметров ГИС на стадии производства	Легкоплавкие халькогенидные стекла	Вакуумное напыление
	Защита ГИС бытового назначения	Лаки ФП-525, УР-231, эмаль ФП-545	Распыление из пульверизатора, погружение, полив Заливка
Толстопленочные	Защита ГИС общего промышленного и бытового назначения	Эластичные компаунды типа «Виксинт», КТ-102	Погружение с механической вибрацией
		Текстурный компаунд Ф-47	
		Порошковые компаунды ПЭП-177, ПЭК-19	Напыление в электростатическом поле, вихревое напыление

чивать 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, металлостеклянные 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 спаивания 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 вплавляют 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.

Материалы, рекомендуемые для изготовления корпусов микросхем, представлены в табл. 8.2.

Табл. 8.2. Материалы, рекомендуемые для изготовления корпусов

Тип корпуса	Материал	Марка материала	Стандарт или ТУ	Область применения
1	2	3	4	5
Металло-стеклянный	Сплавы с заданным ТКЛР	29НК, 29НК-ВИ	ГОСТ 14080—68	Изготовление основания, крышки, выводов
	Стекло	C48-2	ТХО.027.069 ТХО.735.016 НПО.027.600	Изоляция выводов
	Никель	НП-2	ГОСТ 2170—73	Изготовление крышки
	Сталь	X18H10T	ГОСТ 4986—70	Изготовление основания
Стекланый	Стекло	C48-2	ТХО.027.069 ТХО.735.016 НПО.027.600	Изготовление основания
	Сплавы с заданным ТКЛР	29НК, 29НК-ВИ	ГОСТ 14080—68	Изготовление крышки, выводов и ободка
	Никель	НП2	ГОСТ 2170—73	Изготовление крышки
	Припой	ПСр 2,5 ПОС-61	ГОСТ 8190—56 ГОСТ 1499—70	Присоединение ободка к крышке
Металло-керамический	Сплавы с заданным ТКЛР	29НК, 47НД	ГОСТ 14080—68	Изготовление дна, выводов, крышки и ободка
	Керамика	22ХС, М7, «Поликор»	аЯО.027.002ТУ аЯО.027.027ТУ	Изготовление основания
	Никель	НП2	ГОСТ 2170—73	Изготовление крышки
	Припой	ПСр 72 ПСр 2,5 ПОС-61	ГОСТ 8190—56 ГОСТ 1499—70	Присоединение ободка и дна к основанию Присоединение ободка к крышке
Керамический	Сплавы с заданным ТКЛР	29НК, 47НД	ГОСТ 14080—68	Изготовление выводов
	Керамика	22ХС, М7 «Поликор»	аЯО.027.002 ТУ аЯО.027.027 ТУ	Изготовление основания, крышки, рамки
	Припой	ПСр 2,5 ПОС-61	ГОСТ 8190—56 ГОСТ 1499—70	Присоединение выводов к плате
	Клей	ВК-9	ОСТ 4ГО.029.004	Приклейка рамки к основанию (герметизация корпуса)
Металло-полимерный	Компаунд	ЭК-16 «Б»		Герметизация корпуса
	Латунь	Л-63	ГОСТ 1066—58	Изготовление выводов
	Медь	М1	ГОСТ 1173—70	Изготовление выводов

1	2	3	4	5
	Алюминий	А0, А5, А7	ГОСТ 3726—68	Изготовление дна, крышки
	Клей	ВК-9	ОСТ 4 ГО. 029.004	
Полимерный (пластмассовый)	Пресс-материал	К-124-38	ТУ6-05-1017—71	Изготовление основания, крышки
	Латунь	ЭФП-63	ТУ УО.023.056 ТУ	Изготовление выводов
	Медь	М1	ГОСТ 1173—70	Приклейка крышки к основанию
	Клей	ВК-9	ОСТ 4 ГО. 029.004	

8.2. КОРПУСА. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И РАЗМЕРЫ

Основные типы, габаритные и присоединительные размеры корпусов ИМС регламентирует ГОСТ 17467—79. По форме проекции тела на плоскость основания и расположению выводов корпуса делятся на пять типов и 12 подтипов. Характеристики указанных типов и подтипов приведены в табл. 8.3, их габаритные чертежи — на рис. 8.1—8.12. Кроме того, в пределах каждого подтипа стандартом устанавливаются типоразмеры корпусов, причем каждый типоразмер имеет свой шифр, состоящий из двух цифр (от 01 до 99).

Следует подчеркнуть, что размеры корпусов в стандарте приведены без учета специальных элементов, которые используются для дополнительного крепления микросхем и отвода от них тепла. Конструктивные параметры этих элементов указывают в нормативно-технической документации на микросхемы. Однако толщина возможных покрытий, наносимых на корпуса, учтена в размерах, установленных стандартом.

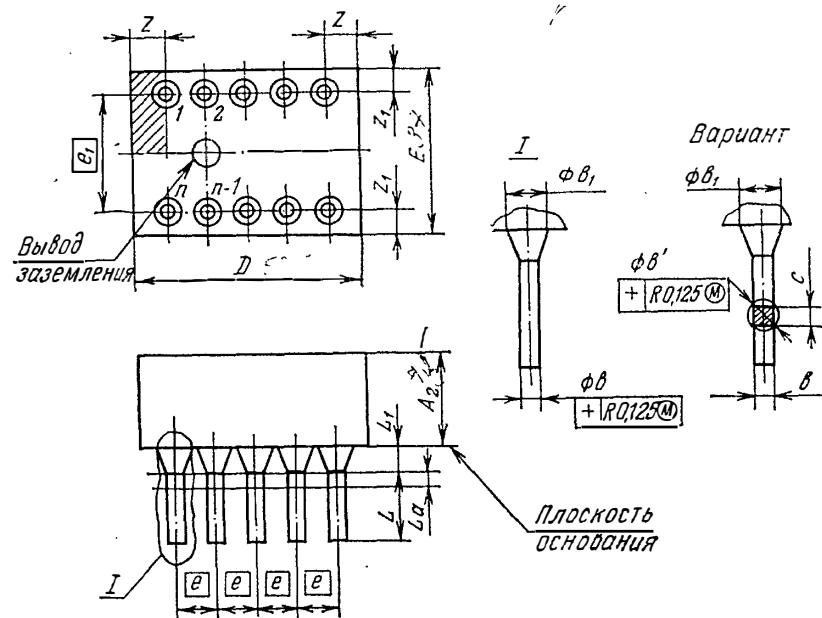


Рис. 8.2. Корпус подтипа 12.

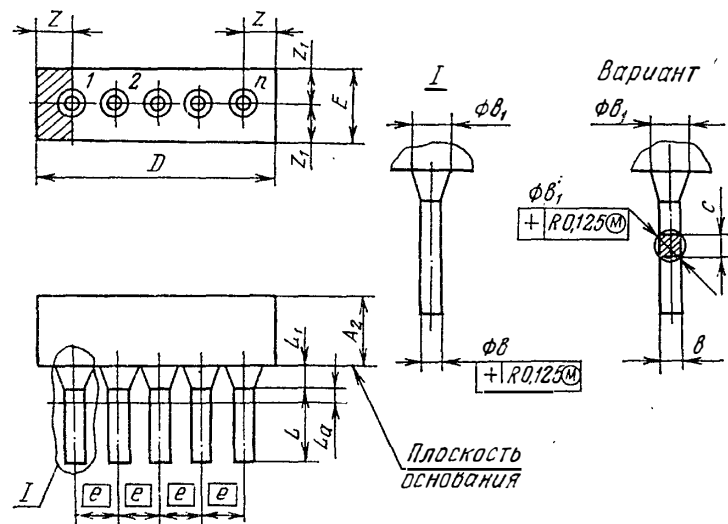


Рис. 8.1. Корпус подтипа 11.

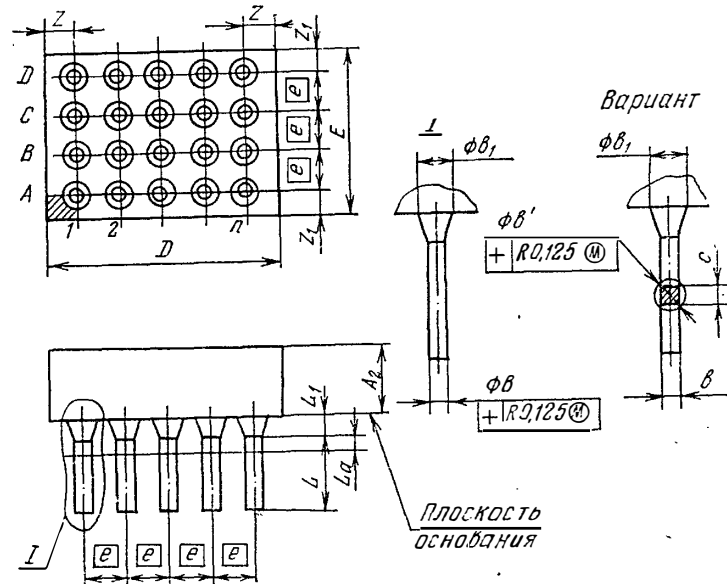


Рис. 8.3. Корпус подтипа 13.

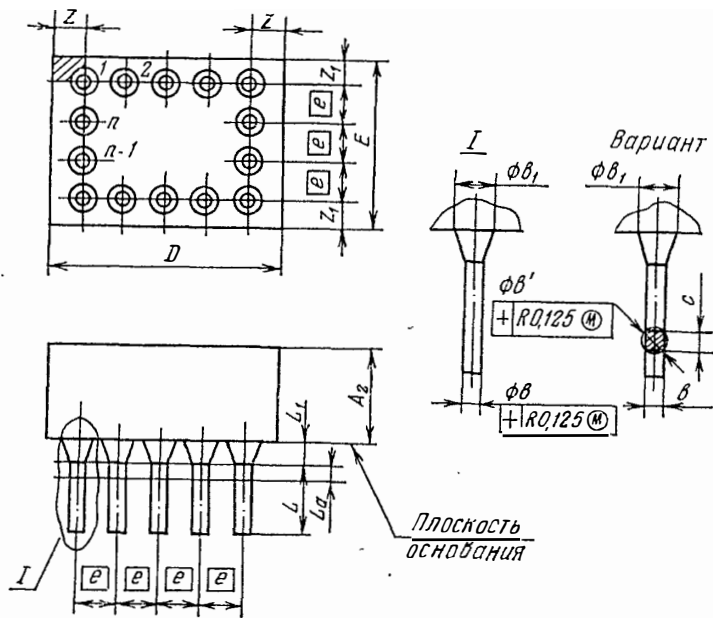


Рис. 8.4. Корпус подтипа 14.

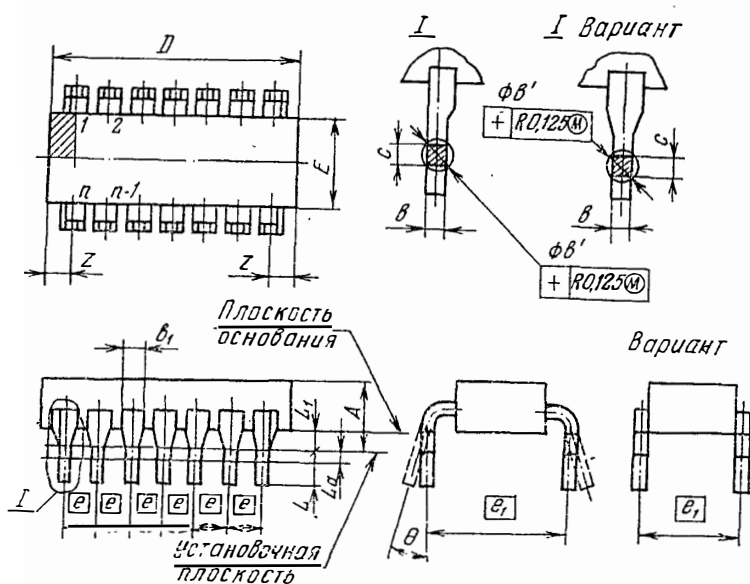


Рис. 8.5. Корпус подтипа 21.

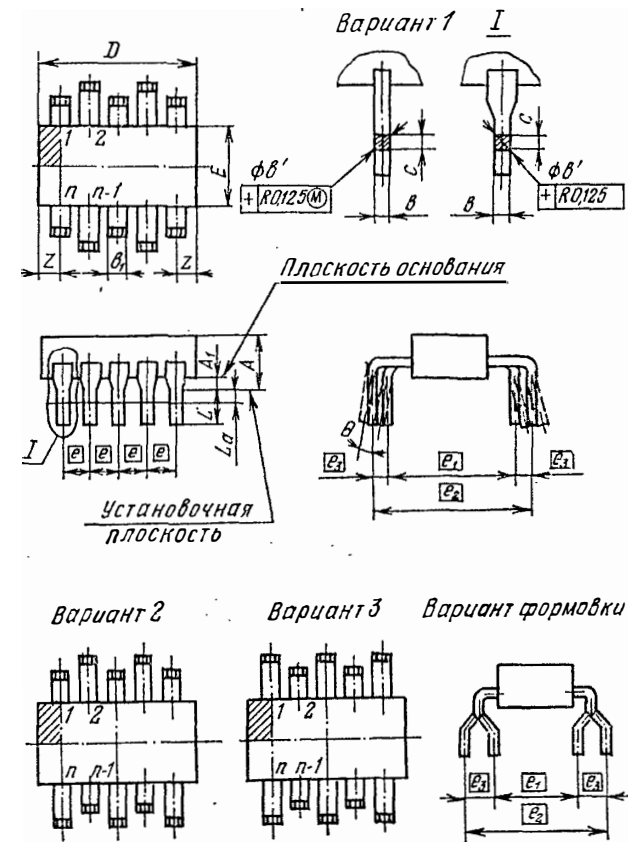


Рис. 8.6. Корпус подтипа 22.

Существенным является то, что стандартом регламентируются размеры, которые обязательно необходимо проставлять на габаритных чертежах микросхем. Указания об этих размерах сведены в табл. 8.4.

При проектировании корпусов микросхем, определяя такие размеры, как D , E , A , A_2 , G_D , G_B , e_1 , e_2 , z , z_1 , следует руководствоваться формулами, которые изложены в табл. 8.5. Принятые при этом условные обозначения размеров приведены в табл. 8.6. В технически обоснованных случаях по согласованию с потребителем допускается увеличение размеров z_{\max} и $z_{1\max}$ из ряда, отвечающего следующим условиям: $z \leq e$; $e < z \leq 2e$; $2e < z \leq 3e$ и т. д. при соответствующем увеличении габаритных размеров D_{\max} и E_{\max} .

ГОСТ 17467—79 устанавливает шаг расположения выводов в корпусе. Для различных типов корпусов шаг соответственно равен:

- для типа 1—2,5 мм;
- для типа 2—2,5 мм (для подтипа 22—1,25 мм и 2,5 мм);
- для типа 3 — под углом $360^\circ/n$;
- для типа 4 — 1,25; 0,625 мм;
- для типа 5 — 1,25 мм.

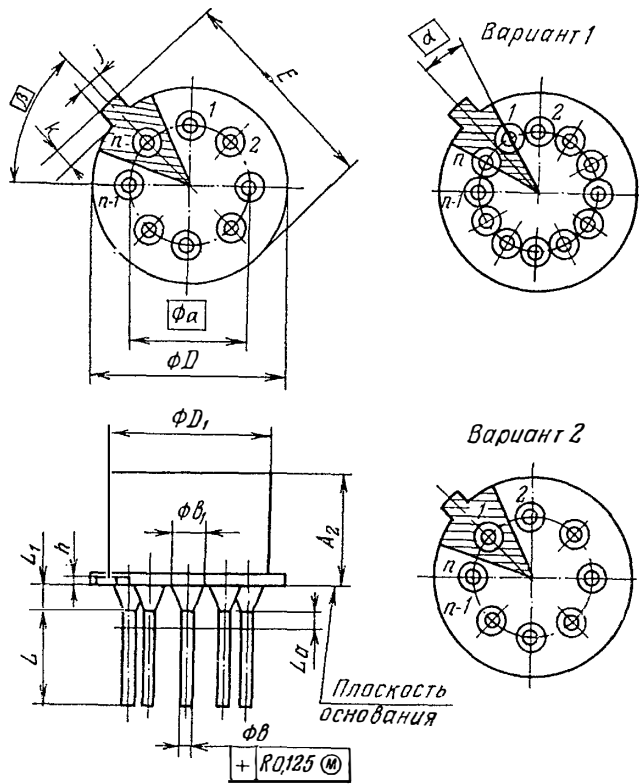


Рис. 8.7. Корпус подтипа 31.

Количество выводов устанавливается при разработке корпуса, причем пропуски рядов и отдельных выводов стандартом не регламентируются. В поперечном сечении выводы должны быть круглой, квадратной или прямоугольной формы. Возможен переход по длине вывода от одной формы поперечного сечения к другой. Каждому выводу присваивается номер его позиции.

Выводы микросхем с повышенной мощностью рассеивания должны иметь: диаметр описанной окружности для выводов с прямоугольным поперечным сечением до 1,3 мм и диаметр круглого поперечного сечения до 1,2 мм при расстоянии между осями соседних в ряду выводов не менее чем 5 мм (для микросхем в корпусах типов 1 и 2); диаметр круглого поперечного сечения до 1 мм (для микросхем в корпусах подтипа 32); ширину рабочей части вывода до 1,25 и 2,5 мм при расстоянии между осями плоскостей симметрии соседних в ряду выводов не менее чем 2,5 и 5 мм соответственно (для микросхем в корпусах типа 4).

Каждому корпусу присваивается условное обозначение. При записи в конструкторской документации такое обозначение должно включать слово «Корпус», условное обозначение типоразмера микросхемы, харак-

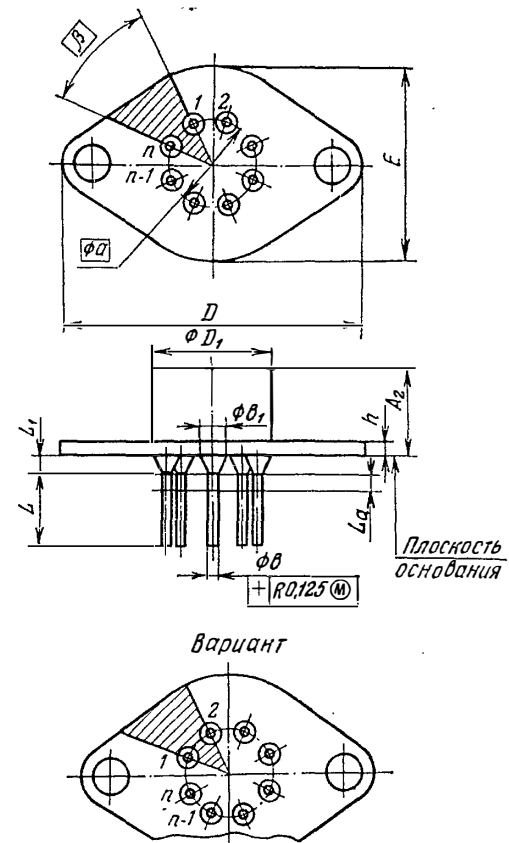


Рис. 8.8. Корпус подтипа 32.

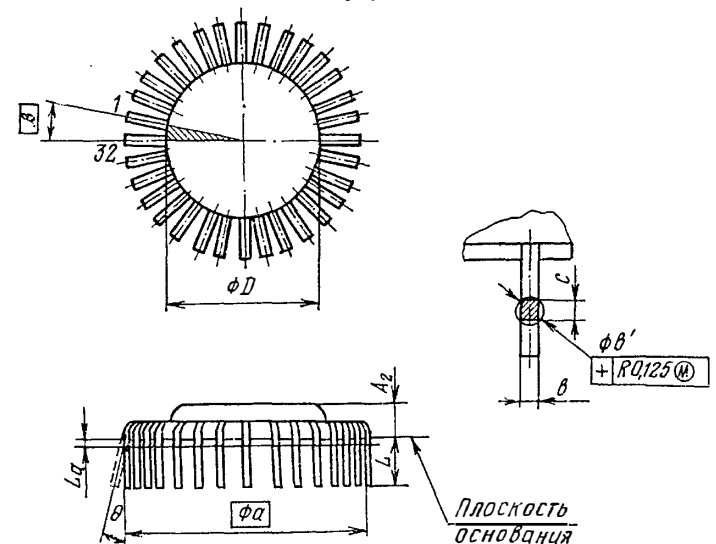


Рис. 8.9. Корпус подтипа 33.

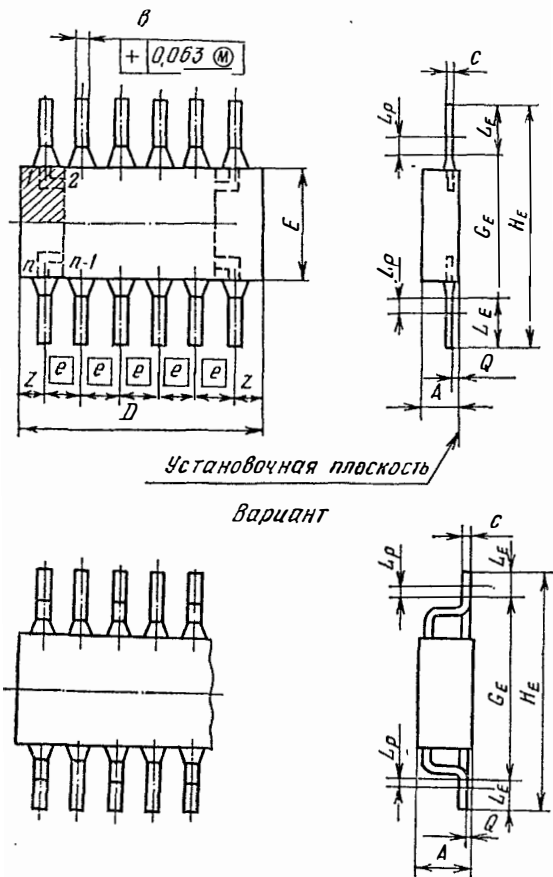


Рис. 8.10. Корпус подтипа 41.

теризующее подтип корпуса (двузначное число) и его порядковый номер в данном подтипе (двузначное число), цифровой индекс, определяющий действительное количество выводов в корпусе, порядковый регистрационный номер корпуса и номер ГОСТа, на основании которого разработан корпус.

Пример условного обозначения корпуса

Корпус 2101.14-5 ГОСТ 17467—79

Число 2101 характеризует типоразмер микросхемы, включающий подтип корпуса (21) и его порядковый номер в данном подтипе (01), число 14 соответствует количеству выводов корпуса, а число 5 — его порядковому регистрационному номеру.

Габаритные и присоединительные размеры микросхем в корпусах должны быть выдержаны в соответствии с документами, перечисленными в табл. 8.7.

Каждая микросхема должна иметь ключ (конструктивный элемент, который служит началом отсчета выводов). Ключом может служить первый вывод, выполненный с переменным сечением по его длине, выступ или другой конструктивный знак на корпусе, либо знак, нанесенный на корпус микросхемы маркировкой. Ключ располагается чаще всего в левом верхнем углу корпуса, если смотреть на него со стороны плоскости

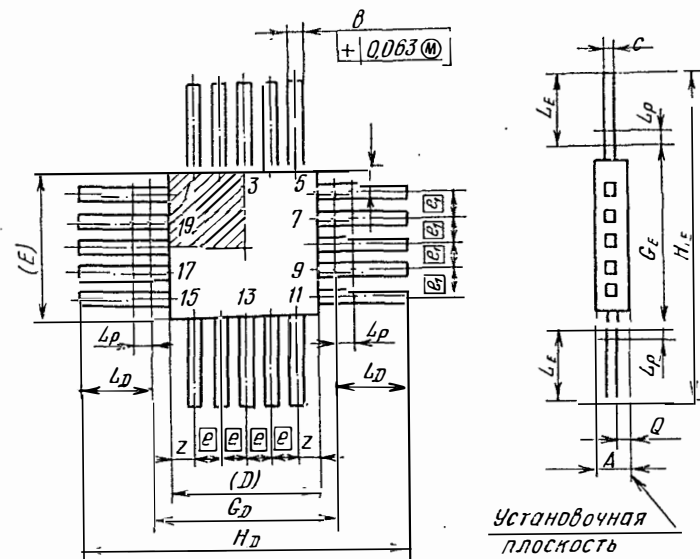


Рис. 8.11. Корпус подтипа 42.

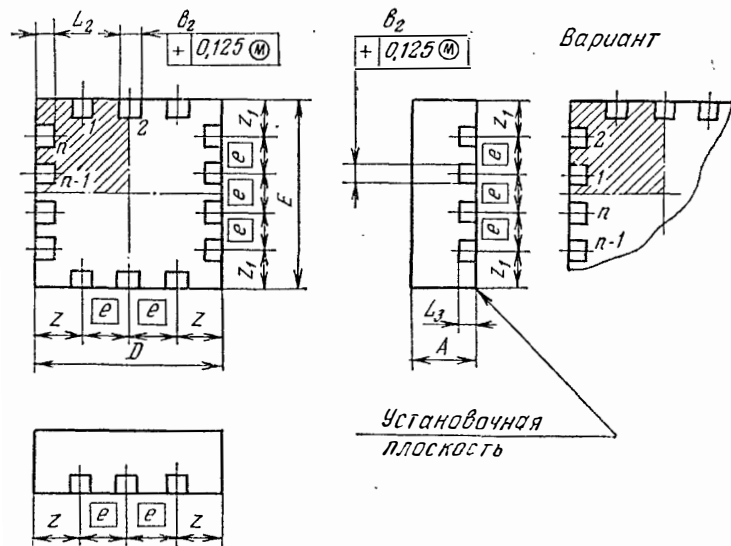


Рис. 8.12. Корпус подтипа 51.

основания, или в левом нижнем углу — для корпуса с многорядным расположением выводов. Область расположения ключа для каждого из рассмотренных подтипов корпусов показана штриховкой (см. рис. 8.1—8.12). На этих же рисунках указан и порядок нумерации выводов корпуса.

Табл. 8.3. Основные типы и подтипы корпусов интегральных микросхем

Тип	Под-тип	Формы проекции тела корпуса на плоскость основания	Расположение проекции выводов (выводных площадок) на плоскость основания	Расположение выводов (выводных площадок) относительно плоскости основания	Номер рисунка	
1	11	Прямоугольная*	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное, в один ряд	8.1	
	12				Перпендикулярное, в два ряда	8.2
	13				Перпендикулярное, в три и более ряда	8.3
	14				Перпендикулярное, по контуру прямоугольника	8.4
2	21	Прямоугольная*	За пределами проекции тела корпуса	Перпендикулярное, в два ряда	8.5	
	22				Перпендикулярное, в четыре ряда в шахматном порядке	8.6
3	31	Круглая	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное, по одной окружности	8.7	
	32				Овальная	8.8
	33				Круглая	8.9
4	41	Прямоугольная*	За пределами проекции тела корпуса	Параллельное, по двум противоположным сторонам	8.10	
	42				Параллельное, по четырем сторонам	8.11
5	51	Прямоугольная*	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное, для боковых выводных площадок; в плоскости основания для нижних выводных площадок		

* В случае равенства длины и ширины тела корпуса допускается круглая форма проекции тела корпуса на плоскость основания.

Табл. 8.4. Перечень размеров, проставляемых на габаритных чертежах микросхем

Буквенное обозначение размеров	Тип корпуса*					Значение размера		
	1	2	3	4	5	мин.	номин.	макс.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	—	+	—	+	—	(мин.)**	—	макс.
A ₁	—	+	—	—	—	мин.	—	макс.
A ₂	+	+	—	+	+	(мин.)	—	макс.
∅ a	—	—	+	—	+	—	НОМИН.	—
b	+	+	—	+	—	мин.	—	макс.
b ₁	—	+	—	—	—	—	—	макс.

Окончание табл. 8.4

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
∅ b		+	—	+	—	—	МИН.	—	МАКС.
∅ b ₁		+	—	+	—	—	—	—	МАКС.
∅ b'		+	+	—	—	—	МИН.	—	МАКС.
b ₂		—	—	—	—	+	МИН.	—	МАКС.
c		+	+	+	+	—	МИН.	—	МАКС.
D		+	+	+	(+)	+	(МИН.)	—	МАКС.
∅ D		—	—	+	—	—	—	—	МАКС.
∅ D ₁		—	—	+	—	—	(МИН.)	—	(МАКС.)
E		+	(+)	+	+	+	(МИН.)	—	МАКС.
F		—	—	+	—	—	МИН.	—	МАКС.
e		+	+	—	+	+	—	НОМИН.	—
e ₁ , e ₂ , e ₃		+	+	—	—	—	—	НОМИН.	—
G _D		—	—	—	+	—	—	—	МАКС.
G _E		—	—	—	+	—	—	—	МАКС.
H _D		—	—	—	+	—	МИН.	—	МАКС.
H _E		—	—	—	+	—	МИН.	—	МАКС.
h		—	—	+	—	—	МИН.	—	МАКС.
j		—	—	+	—	—	МИН.	—	МАКС.
k		—	—	+	—	—	МИН.	—	МАКС.
L		+	+	+	—	—	МИН.	—	МАКС.
L _D , L _E		—	—	—	+	—	МИН.	—	МАКС.
L ₁		+	—	+	—	—	—	—	МАКС.
L ₂ , L ₃		—	—	—	—	+	МИН.	—	МАКС.
L _a		+	+	+	—	—	—	—	МАКС.
L _p		—	—	—	+	—	—	—	МАКС.
Q		—	—	—	+	—	МИН.	—	МАКС.
z, z ₁		+	+	—	+	+	—	—	МАКС.
a		—	—	+	—	—	—	НОМИН.	—
β		—	—	+	—	—	—	НОМИН.	—
θ		—	+	—	—	—	МИН.	—	МАКС.

* Знак «+» в графе «Тип корпуса» означает, что рассматриваемый размер должен быть проставлен на чертеже корпуса микросхем данного типа.

** Размеры и предельные значения, указанные в скобках, могут быть опущены.

Табл. 8.5. Формулы для определения габаритных размеров микросхем

Подтип	Обозначение	Формула для определения размеров
1	2	3
11	z _{max} ; z _{1max}	e - 0,25
	D _{max}	(n - 1)e + 2z _{max}
	E _{1max}	2z _{1max}
12	A _{2max}	em _{A₂} , где m [*] _{A₂} = 6,8
	z _{max} ; z _{1max}	e - 0,25
	D _{max}	(n/2 - 1)e + 2z _{max}
	e _{1nom}	em _{e₁} , где m [*] _{e₁} = 1; 2; 3; 4; 6; 7; 9; 11
	E _{max}	e ₁ + 2z _{1max}
A _{2max}	em _{A₂} , где m _{A₂} = 2; 3; 4; 6; 8	

1	2	3
13, 14	$z_{\max}; z_{1\max}$	$e - 0,25$
	D_{\max}	$(n_D - 1)e + 2z_{\max}$
	E_{\max}	$(n_E - 1)e + 2z_{1\max}$
	$A_{2\max}$	em_{A_2} , где $m_{A_2} = 2; 3$
	z_{\max}	$e - 0,25$
21	D_{\max}	$(n/2 - 1)e + 2z_{\max}$
	$e_{1\text{ном}}$	em_{e_1} , где $m_{e_1} = 3; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 11$
	E_{\max}	$e_{1\text{ном}}$
	A_{\max}	em_A , где $m^*_A = 2; 3$
	z_{\max}	$2,25$
22	D_{\max}	$(n/2 - 1)e + 2z_{\max}$
	$e_{1\text{ном}}$	em_{e_1} , где $m_{e_1} = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9$
	$e_{2\text{ном}}$	$e_{1\text{ном}} + 2e_3$
	E_{\max}	em_E , где $m^*_E = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 11$
	A_{\max}	em_A , где $m_A = 2; 2,5; 3$
41	z_{\max}	$e - 0,25$
	D_{\max}	$(n/2 - 1)e + 2z_{\max}$
	$E_{\max}; G_{E\max}$	em_G , где $m^*_G = 4; 6; 7; 9; 11; 12; 16$
	A_{\max}	em_A , где $m_A = 2; 4; 6$
	$H_{E\max}$	$G_{E\max} + 2(A_{\max} + 6,25)$
42	$H_{E\min}$	$G_{E\max} + 6,0$
	z_{\max}	$e - 0,25$
	$D_{\max}; G_{D\max}$	$(n_D - 1)e + 2z_{\max}$
	$E_{\max}; G_{E\max}$	$(n_E - 1)e + 2z_{1\max}$
	A_{\max}	em_A , где $m_A = 2; 4; 6$
	$H_{D\max}$	$G_{D\max} + 2(A_{\max} + 6,25)$
	$H_{D\min}$	$G_{D\min} + 6,0$
	$H_{E\max}$	$G_{E\max} + (A_{\max} + 6,25)$
	$H_{E\min}$	$G_{E\max} + 6,0$

* $m_A, m_{A_2}, m_{e_1}, m_E, m_{G_1}$ — коэффициенты кратности.

Табл. 8.6. Буквенное обозначение размеров микросхем

Буквенное обозначение размера	Содержание обозначения
1	2
A	Расстояние от установочной плоскости до верхней точки микросхемы
A ₁	Расстояние между установочной плоскостью и плоскостью основания микросхемы
A ₂	Расстояние от плоскости основания до верхней точки микросхемы

1	2
$\varnothing a$	Диаметр окружности расположения осей выводов
b	Ширина вывода по длине L
b_1	Ширина части вывода, расположенной выше установочной плоскости
b_2	Ширина выводной площадки
$\varnothing b$	Диаметр вывода по длине L
$\varnothing b_1$	Диаметр вывода по длине L ₁
$\varnothing b'$	Диаметр окружности, описанной вокруг прямоугольного поперечного сечения вывода по длине L
c	Толщина вывода
D	Длина микросхемы (без учета выводов)
$\varnothing D$	Диаметр микросхемы
$\varnothing D_1$	Диаметр крышки
$E; F_1$	Ширина микросхемы (без учета выводов)
e	Шаг позиции выводов
e_1, e_2, e_3	Расстояние между рядами выводов
G_D	Длина зоны, которая включает действительную длину микросхемы без учета выводов вместе с отклонениями в ее конфигурации и часть выводов, не пригодную для монтажа, расположенных в направлении длины микросхемы
G_E	Ширина зоны, которая включает действительную ширину микросхемы без учета выводов вместе с отклонениями в ее конфигурации и часть выводов, не пригодную для монтажа, расположенных в направлении ширины микросхемы
H_D	Общая длина микросхемы
H_E	Общая ширина микросхемы
h	Высота или глубина выступа
j	Ширина выступа
k	Длина выступа
L, L_D, L_E	Длина вывода, пригодная для монтажа
L_1	Длина вывода, не пригодная для монтажа
L_2, L_3	Длина выводной площадки
L_a	Длина вывода, в пределах которой производится контроль смещения осей выводов от номинального расположения
L_p	Длина вывода, в пределах которой производится контроль смещения плоскостей симметрии выводов от номинального расположения
n	Общее число возможных позиций выводов (действительное количество имеющихся выводов может быть меньше)
n_D	Общее число возможных позиций выводов в направлении размера D
n_E	Общее число возможных позиций выводов в направлении размера E
Q	Расстояние, определяющее место выхода вывода из корпуса
z, z_1	Свес корпуса. Расстояние от номинального расположения оси (плоскости симметрии) позиции крайнего вывода до края тела корпуса
α	Угол между ключом и осью позиции 1-го вывода
β	Угол между номинальным положением осей позиций выводов, расположенных на окружности
θ	Угол отгиба выводов

Табл. 8.7. Перечень таблиц и рисунков, в которых указаны габаритные и присоединительные размеры микросхем в корпусах

Подтип корпуса	Номера таблиц	Номер рисунка	Подтип корпуса	Номера таблиц	Номер рисунка
11	8.8, 8.9	8.1	31	8.16, 8.17	8.7
12	8.8, 8.10	8.2	32	8.18, 8.19	8.8
13	8.8, 8.11	8.3	33	8.20, 8.21	8.9
14	8.8, 8.12	8.4	41	8.22, 8.23	8.10
21	8.13, 8.14	8.5	42	8.22, 8.24	8.11
22	8.13, 8.15	8.6	51	8.25, 8.26	8.12

Табл. 8.8. Основные размеры микросхем в корпусах типа 1

Обозначение размера	Размеры, мм		
	мин.	номин.	макс.
b	0,3	—	0,5
$\varnothing b$	0,3	—	0,5
$\varnothing b_1$	0,4	—	0,6
$\varnothing b_1$	—	—	1,5
c	0,2	—	0,4
e	—	2,5	—
L_a	—	—	0,7
L_1	—	—	0,5
L	3	—	8
$z; z_1$	—	—	2,25

Табл. 8.9. Размеры микросхем в корпусе подтипа 11

Шифр типоразмера	n	Размеры, мм		
		D_{\max}	E_{\max}	$A_{2\max}$
1101	7	19,5	4,5	20
1102	9	24,5	—	—

Табл. 8.10. Размеры микросхем в корпусе подтипа 12

Шифр типоразмера	n	Размеры, мм			
		D_{\max}	$E_{1\text{полп}}$	E_{\max}	$A_{2\max}$
1	2	3	4	5	6
1201	10	14,5	2,5	7	—
1202	14	17,5	7,5	12	—
1203	14	19,5	10	14,5	—
1204	20	27	10	14,5	—
1205	16	22	15	19,5	—
1206	14	19,5	17,5	22	7,5

Окончание табл. 8.10

1	2	3	4	5	6
1207	14	—	25	29,5	—
1208	20	—	12,5	17	—
1209	20	27,0	—	29,5	—
1210	28	37	22,5	—	—
1211	28	37	25	29,5	—
1212	40	52	32,5	37	—
1213	46	59,5	35	39,5	10
1214	12	17	—	—	—
1215	14	19,5	—	—	—
1216	16	22	2,5	7	—
1217	20	27	—	—	20
1218	24	32	—	—	—
1219	22	29,5	5	9,5	—

Табл. 8.11. Размеры микросхем в корпусе подтипа 13

Шифр типоразмера	n_D	n_E	Размеры, мм		
			D_{\max}	E_{\max}	$A_{2\max}$
1301	4	4	12	12	—
1302	12	4	32	—	—
1303	11	7	29,5	—	7,5
1304	8	7	22	19,5	—
1305	9	5	24,5	—	—

Табл. 8.12. Размеры микросхем в корпусе подтипа 14

Шифр типоразмера	n_D	n_E	Размеры, мм		
			D_{\max}	E_{\max}	$A_{2\max}$
1401	5	5	14,5	14,5	—
1402	7	5	19,5	—	—
1403	8	7	22	19,5	—
1404	10	6	27	17	7,5
1405	11	7	29,5	19,5	—
1406	12	8	32	22	—
1407	22	14	57	37	—

Табл. 8.13. Основные размеры микросхем в корпусах типа 2

Обозначение размера	Размеры, мм		
	мин.	номин.	макс.
A_1	0,51	—	1,80
b	0,38	—	0,59
b_1	—	—	1,50
$\varnothing b'$	0,40	—	0,60
c	0,20	—	0,36
L	2,54	—	5
L_a	—	—	0,70
θ	0°	—	15
z	—	—	2,25

Табл. 8.14. Размеры микросхем в корпусе подтипа 21

Шифр типоразмера	n	Размеры, мм				
		D _{max}	E _{max}	e _{1ном}	e _{ном}	A _{max}
2101	8	12				
2102	14	19,5				
2103	16	22	7,5	7,5		
2104	18	24,5				
2105	14	19,5				
2106	16	22				
2107	18	24,5	10	10		
2108	22	29,5				
2109	24	32				
2110	14	19,5				
2111	16	22				
2112	18	34,5	12,5	12,5		
2113	24	32				
2114	32	42				
2115	14	19,5				
2116	16	22				
2117	18	24,5				
2118	20	27				
2119	22	29,5				
2120	24	32	15	15	2,5	
2121	28	37				
2122	32	42				
2123	40	52				
2124	42	54,5				
2125	44	57				
2126	48	62				
2127	14	19,5				
2128	16	22				
2129	18	24,5				
2130	24	32	17,5	17,5		
2131	28	37				
2132	32	42				
2133	40	52				
2134	48	62				7,5
2135	66	84,5	20	20		
2136	64	82	22,5	22,5		
2137	32	42	25	25		
2138	30	39,5				
2139	32	42	27,5	27,5		

Табл. 8.15. Размеры микросхем в корпусе подтипа 22

Шифр типоразмера	n	Размеры, мм						
		D _{max}	E _{max}	e _{ном}	e _{1ном}	e _{2ном}	e _{3ном}	A _{max}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2201	14	19,5						
2202	16	22	7,5	2,50	5	10		5
2203	40	28,25						

Окончание табл. 8.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2204	42	29,50	22,5		20	25		6,25
2205	48	30,75					2,5	
2206	42	29,5		1,25	15	20		
2207	48	33,25	17,5					5
2208	62	42	25		22,5	27,5		
2209	64	45,75						

Табл. 8.16. Основные размеры микросхем в корпусе подтипа 31

Обозначение размера	Размеры, мм		
	мин.	номн.	макс.
Øa	—	5	—
Øe	0,41	—	0,51
Øe ₁	—	—	0,76
ØD	9	—	9,4
ØD ₁	8	—	8,5
h	0,3	—	0,8
j	0,71	—	0,86
k	0,74	—	1,14
L	12,5	—	14,5
L ₁	—	—	0,5
L _a	—	—	0,7
α	—	β/2	—

Табл. 8.17. Размеры микросхем в корпусах типоразмеров 3101—3106

Шифр типоразмера	n	A _{2max} , мм	β _{ном}
3101	8		45°
3102	10	4,7	36°
3103	12		30°
3104	8		45°
3105	10	6,6	36°
3106	12		30°

Табл. 8.18. Основные размеры микросхем в корпусе подтипа 32

Обозначение размера	Размеры, мм		
	мин.	номн.	макс.
Øa	—	12,5	—
Øe	0,7	—	1
Øe ₁	—	—	2,5
h	1,3	—	3,2
L	3,2	—	9,2
L ₁	—	—	2
L ₂	—	—	1,5

Табл. 8.19. Размеры микросхем в корпусах типоразмеров 3201—3204

Шифр типоразмера	n	Размеры, мм				β _{пот}
		D _{max}	E _{max}	∅D _{1max}	A _{2max}	
3201	8			16,5	15	45°
3202	10	40	27			36°
3203	8			22,86	7,5	45°
3204	10				—	36°

Табл. 8.20. Основные размеры микросхем в корпусе подтипа 33

Обозначение размера	Размеры, мм		
	мин.	номин.	макс.
∅a	—	25	—
∅b	0,45	—	0,85
∅b'	0,48	—	0,93
c	0,16	—	0,38
L	2,54	—	5
L _a	—	—	0,70
0	0°	—	15°

Табл. 8.21. Размеры микросхем в корпусе типоразмера 3301

Шифр типоразмера	n	Размеры, мм		β _{min}
		∅D _{1max}	A _{2max}	
3301	32	16,5	5	11°15'

Табл. 8.22. Основные размеры микросхем в корпусах типа 4

Обозначение размера	Размеры, мм		
	мин.	номин.	макс.
∅	0,25	—	0,54
c	0,07	—	0,2
L _E ; Z _D	Q+3	—	—
L _p	—	—	0,7
Q	—	—	A—c
Z; Z ₁	—	—	1

Табл. 8.23. Размеры микросхем в корпусе подтипа 41

Шифр типоразмера	n	Размеры, мм					
		D _{max}	ε _{пот}	E _{max} ; G _{E_{max}}	H _{E_{min}}	H _{E_{max}}	A _{max}
4101	6	4,50		5	11	22,50	
4102	14	9,50					
4103	8	5,75					
4104	10	7		7,50	13,50	25	
4105	14	9,5	1,25				2,5
4106	16	10,75					
4107	14	9,5					
4108	16	10,75					
4109	20	13,25		11,25	17,25	28,75	
4110	24	15,75					
4111	32	20,75					
4112	16	10,75					
4113	20	13,25		11,25	17,25	33,75	
4114	24	15,75					
4115	14	9,5					
4116	18	12					
4117	22	14,5					
4118	24	15,75		13,75	19,75	36,25	
4119	28	18,25					
4120	32	20,75					
4121	34	22					
4122	40	25,75					
4123	48	30,75					
4124	16	10,75					
4125	28	18,25					
4126	32	20,75					
4127	36	23,25		15	21	38,5	5
4128	40	25,75					
4129	42	27					
4130	48	30,75					
4131	24	15,75					
4132	32	20,75					
4133	44	28,25		20	26	42,5	
4134	48	30,75					
4135	64	40,75					
4136	30	19,5					
4137	34	22		26,25	32,25	53,75	
4138	42	27					
4139	64	40,75					
4140	18	12		20	26	47,5	7,5
4141	42	27		28,75	34,75	56,25	
4142	48	30,75					
4143	50	32					
4144	22	14,5	1,25				7,5
4145	38	24,5		41,25	47,25	68,75	
4146	70	44,5					
4147	16	5,175		8,75	14,75	21,25	
4148	32	10,175					2,5
4149	16	5,175		11,25	17,25	23,75	
4150	20	6,425	0,625				

Табл. 8.24. Размеры микросхем в корпусе подтипа 42

Шифр типоразмера	n_D	n_E	Размеры, мм							A_{\max}
			$D_{\max}; G_{D_{\max}}$	$e_{\text{пот}}$	$E_{\max}; G_{E_{\max}}$	$H_{D_{\min}}$	$H_{E_{\min}}$	$H_{D_{\max}}$	$H_{E_{\max}}$	
4201	9	4	12,50	1,25	6,25	18,5	14,75	35	32	5
4202	11	11	14,5		14,5	24,5	24,50	37	37	
4203	16	16	21,25	21,25	36	36	48	48		

Табл. 8.25. Основные размеры микросхем в корпусах типа 5

Обозначение размера	Размеры, мм		
	мин.	номин.	макс.
θ_2	0,3	—	0,9
$L_2; L_3$	0,4	—	1,6
e	—	1,25	—
z	—	—	1,25
z_1	—	—	1,25

Табл. 8.26. Размеры микросхем в корпусе подтипа 51

Шифр типоразмера	n_D	n_E	Размеры, мм	
			D_{\max}, E_{\max}	$A_{2\max}$
5101	7	5	10	5
5102	9	9	12,5	
5103	11	11	15	
5104	13	11	17,5	
5105	15	13	20	

8.3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ И ГЕРМЕТИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Описанные методы защиты и применяемые для этих целей корпуса используются при герметизации как гибридных, так и полупроводниковых ИМС. Для герметизации гибридных микросхем преимущественное применение находят металлостеклянные, металлокерамические, металлополимерные и полимерные корпуса типов 1 и 4 (по ГОСТ 17467—79). Для герметизации полупроводниковых ИМС используются в основном полимерные (пластмассовые) и керамические корпуса типа 2, металлостеклянные типа 3 и металлокерамические, металлостеклянные (стеклянные), а также металлополимерные (полимерные) типа 4.

Наиболее герметичными являются металлостеклянные и металлокерамические корпуса, которые обеспечивают также минимальное тепловое сопротивление между микросхемой и окружающей средой. Однако их применение в ряде случаев сдерживается высокой стоимостью. Наиболее дешевыми являются металлополимерные и полимерные (пластмассовые)

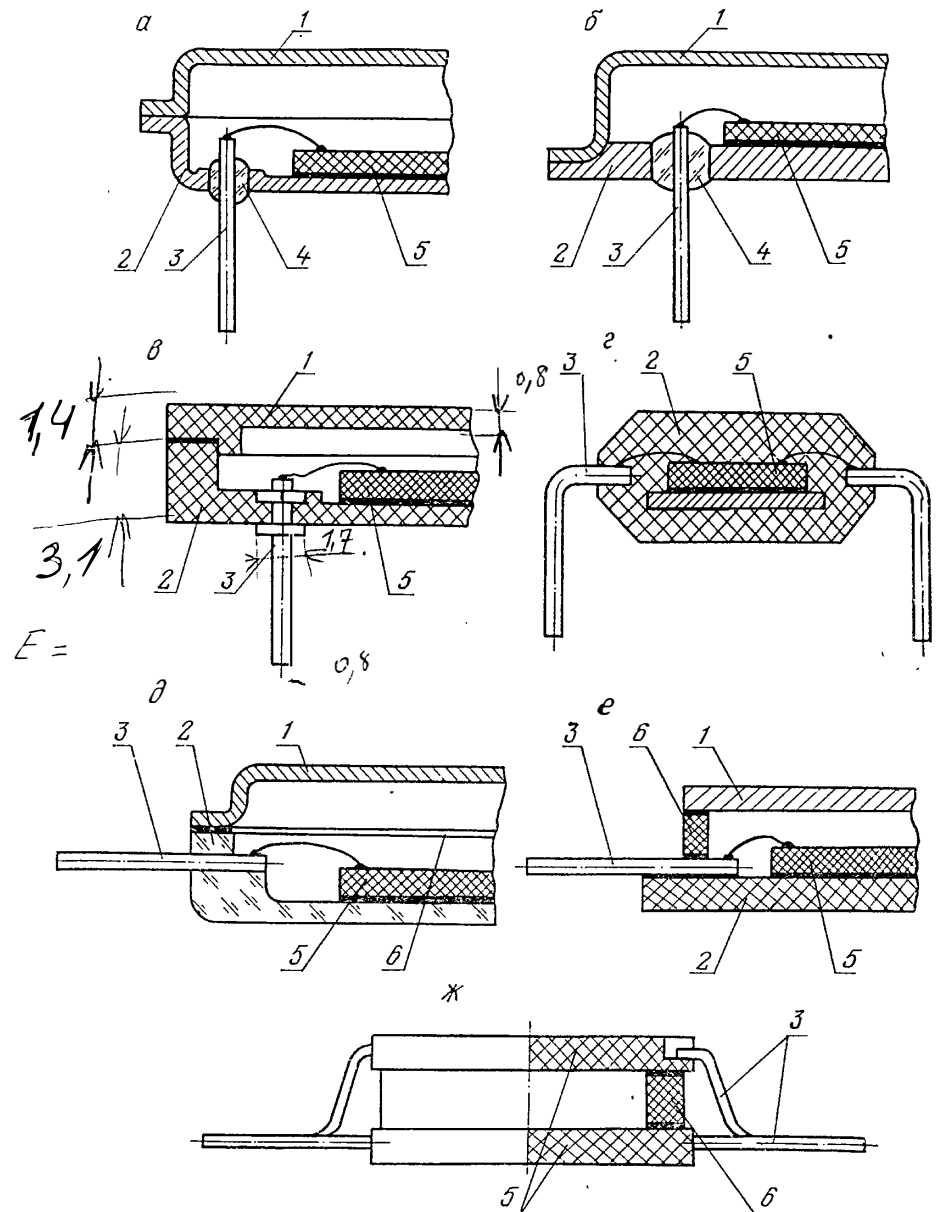


Рис. 8.13. Конструктивное исполнение корпусов:

а, б — металлостеклянного типа 1; *в* — металлополимерного типа 1; *г* — полимерного (пластмассового) типа 2; *д* — стеклянного типа 4; *е* — металлокерамического типа 4; *ж* — керамического типа 4; 1 — крышка; 2 — основание корпуса; 3 — вывод; 4 — бус; 5 — плата; 6 — рамка.

корпуса, которые защищают ИМС от механических воздействий, однако являются наименее герметичными.

В зависимости от требований, предъявляемых к микросхеме, технологии изготовления и заданного метода монтажа микросхемы на печатной плате выбирается вариант конструктивного исполнения корпуса. Некоторые варианты конструктивного исполнения корпусов, предназначенных для герметизации ИМС, представлены на рис. 8.13.

По конструктивному исполнению корпуса для герметизации как гибридных, так и полупроводниковых ИМС существенно не различаются.

Отличаются лишь методы установки и крепления плат или кристаллов в корпусах.

Плату гибридных интегральных микросхем рекомендуется устанавливать в корпус симметрично относительно выводов (в технически обоснованных случаях допускается и несимметричность установки платы). Крепление платы к основанию осуществляется с помощью пайки или приклейки. Толщина клеевого слоя составляет 50—100 мкм. Установка навесных компонентов на плату, основание корпуса или на дополнительную плату (рис. 8.14) производится в соответствии с требованиями, изложенными в ОСТ 4ГО.010.043. Рекомендуемые варианты установки и крепления навесных компонентов, а также присоединения их выводов показаны на рис. 8.15. Для крепления навесных компонентов широко используются клеи марок Д-9 или ВК-9. Иногда для дополнительной защиты плату с навесными компонентами заливают компаундом. При этом заливку осуществляют с сохранением под крышкой свободного объема или с его заполнением. Рекомендуемая толщина слоя заливки, обеспечивающая влагозащиту микросхемы, должна быть не менее 1,5 мм.

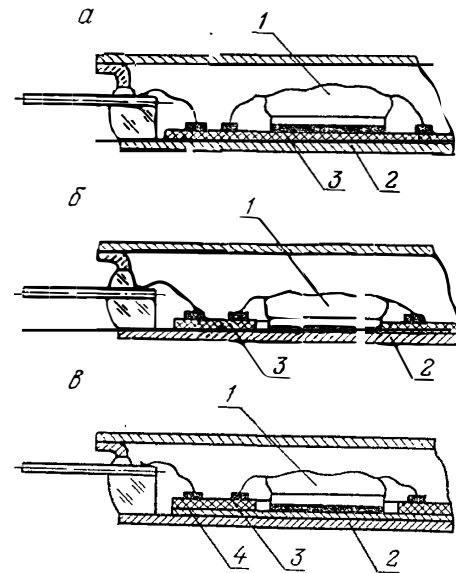


Рис. 8.14. Установка навесных компонентов:

а — на плату; б — на основание корпуса; в — на дополнительную плату; 1 — навесной компонент; 2 — основание корпуса; 3 — плата; 4 — дополнительная плата.

компаундом. При этом заливку осуществляют с сохранением под крышкой свободного объема или с его заполнением. Рекомендуемая толщина слоя заливки, обеспечивающая влагозащиту микросхемы, должна быть не менее 1,5 мм.

Кристалл полупроводниковой интегральной микросхемы рекомендуется устанавливать в геометрическом центре корпуса. Крепление кристалла к основанию осуществляется чаще всего пайкой твердым припоем. Иногда кристалл к основанию крепится с помощью легкоплавких стекол. Вариант крепления кристалла выбирают в зависимости от типа корпуса и необходимости электрического контакта кристалла с корпусом. При креплении кристалла в металлостеклянном корпусе, как правило, используют твердый припой, который представляет собой эвтектический сплав на основе золота и германия или золота и кремния с температурой плавления 356 и 370 °С соответственно. Изоляции кристалла от основания корпуса в данном случае не требуется, так как подложка полупроводниковой микросхемы всегда имеет самый низкий потенциал. Вариант крепления кристалла к основанию корпуса показан на рис. 8.16.

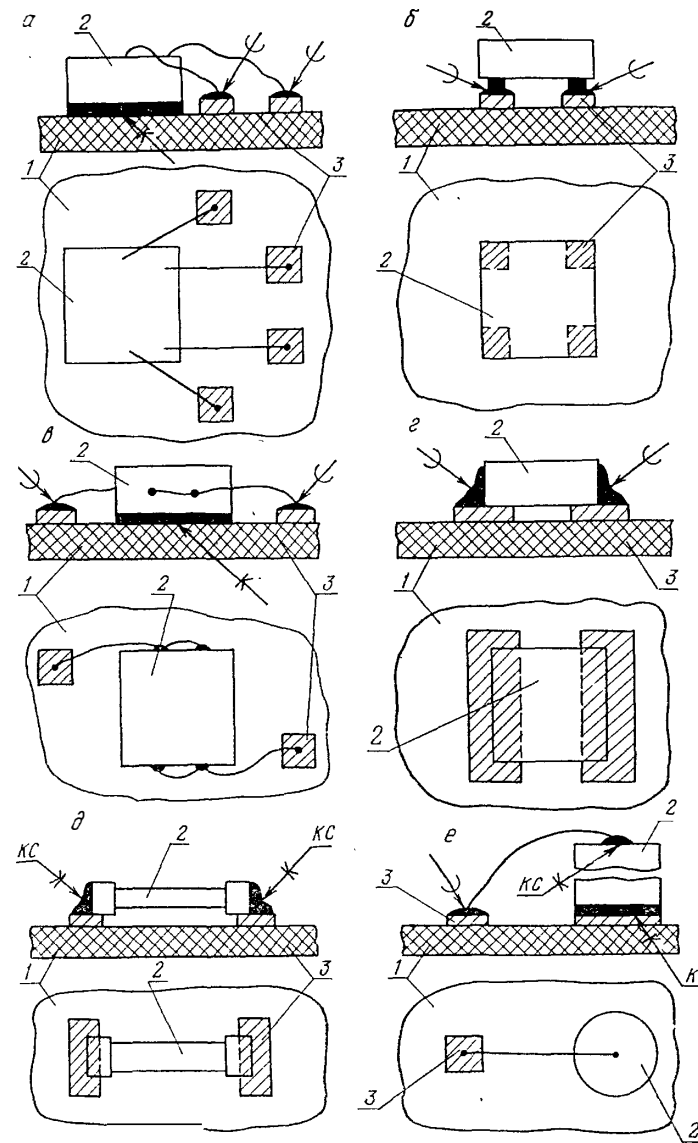


Рис. 8.15. Варианты установки и крепления навесных компонентов, а также присоединения их выводов в гибридных ИМС:

а — вариант I; б — вариант II; в — вариант III; г — вариант IV; д — вариант V; е — вариант VI; 1 — плата; 2 — навесной компонент; 3 — контактная площадка; ↘ — паяное (допускается сварное) соединение; ↙ — клеевое соединение; ↗ — клеевое соединение с использованием контактола.

Для герметизации гибридных и полупроводниковых ИМС в корпусах используют следующие способы: аргоно-дуговую сварку, контактную сварку, роликовую сварку, электронно-лучевую или лазерную сварку, пайку мягкими или твердыми припоями и склеивание.

При конструировании герметичных металlostеклянных корпусов необходимо учитывать также следующие технологические ограничения: допустимая относительная разность ТКЛР образующих спай материалов не должна превышать 20 % (для сжатых по стеклу спаев) или 10 % (для

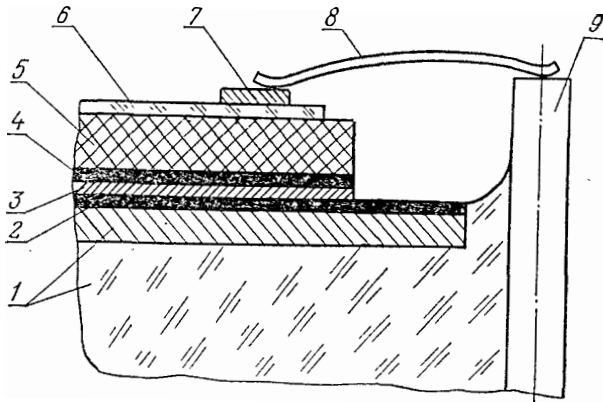


Рис. 8.16. Крепление кристалла полупроводниковой ИМС к основанию корпуса: 1 — основание корпуса; 2 — сплав AuGe; 3 — слой золота; 4 — сплав AuSi; 5 — кристалл; 6 — окисная пленка; 7 — контактная площадка; 8 — проволочный вывод; 9 — вывод корпуса.

растянутых по стеклу спаев); минимальная длина металlostеклянного спая должна быть не менее 1 мм (для проходного спая) или 0,6 мм (для плоских спаев).

Конструкторская документация на корпуса микросхем выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109—73, ГОСТ 17467—79 и ОСТ 110.000.028—73. Корпуса микросхем относятся к сборочным единицам. Децимальные номера конструкторских документов на них выбирают по классу 4. Например, сборочному чертежу корпуса присваивается децимальный номер АБВГ 4.877.001 СБ, сборочному чертежу основания — АБВГ 4.880.001 СБ. Чертежам деталей присваиваются децимальные номера по классу 7. Так, чертеж металлической крышки имеет номер АБВГ 7.313.001, пластмассовой или керамической крышки — АБВГ 7.375.001, вывода — АБВГ 7.303.001 и т. д. Условное обозначение корпуса в конструкторской документации записывают согласно ГОСТ 17467—79.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

```
// OPTION LINK,LIST,LOG
INCLUDE ILFACOM
// EXEC FFORTRAN
REAL NO1,NO3,NI,LN,LP,NDK,NA,NA1,NNO1,
*ND,LO,NNOT,OPT,JNT,JPT1,JNT1,NNO,
*LP1X,LN1X
C ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ФУНКЦИЙ
NA(X,T2)=2*NO1*SQRT(D1*T1)*EXP(-X*
*X/(4*D2*T2))/(3.14*SQRT(D2*T2))-NDK
ND(X,T3)=NO3*ERFC(X/(2*SQRT(D3*T3)))
AMN(X)=350*(18.7-ALOG10(ND(X,T3)))
AMP(X)=135*(18.5-ALOG10(NA(X,T2)))
TAX(X)=(NA(X,T2)+NDK)*(2*X/(4*D2*
*T2))
TDX(X)=NO3/SQRT(3.14*D3*T3)*EXP(-X*
*X/(4*D3*T3))
F2(X)=ND(X,T3)-NA(X,T2)
F(T3)=ND(X,T3)-NA(X,T2)
F1(T2)=ND(X,T3)-NA(X,T2)
DN1(X)=F1*(1265./(1+((NA(X,T2)+ND(X,T3)+
*NDK)/0.85E17)*0.72)+65)
DIMENSION Z(1000),R26(1000),R126(1000),
*Z1(1000),Z2(1000),Z3(1000),Z4(1000),R226
*(1000),XE(5),WB(5)
C ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
READ(1,1)NO1,NO3,T1,TINK,UK,A4,D4,
*AK,DK,
*DD,NDK,DO1,DO3,DH1,DH3,TH,WB,XE,DEP
1 FORMAT(E8.2)
C КОНТРОЛЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
WRITE(3,149)NO1,NO3,T1,TINK,UK,A4,
*D4,AK,DK,DD,NDK,DO1,DO3,DH1,DH3,TH,DEP
149 FORMAT(30X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ '//30X,
*'NO1=',E9.2/30X,'NO3=',E9.2/30X,
*'T1=',E9.2/30X,'TINK=',E9.2/30X,'UK=',
*E9.2/30X,'A=',
*E9.2/30X,'D4=',E9.2/30X,'AK=',E9.2/
*30X,'DK=',E9.2/30X,'DD=',
*E9.2/30X,'NDK=',E9.2/30X,'DO1=',
*E9.2/30X,'DO3=',E9.2/30X,'DH1=',
*E9.2/30X,'DH3=',E9.2/
*30X,'T=',E9.2/30X,'DEP=',E9.2)
WRITE(3,191)WB
```

```

191 FORMAT(30X,'WB=',E9.2)
WRITE(3,192)XE
192 FORMAT(30X,'XE=',E9.2)
H=0.5E-06
H1=1.E-7
H2=0.4E-6
EFS=1.
EFS2=5.E-7
R=1.99
EPS3=0.5E-5
H3=0.5E-5
Q=1.6E-19
E=12,
EQ=8,85E-14
WRITE(3,195)
N1=2.E10
195 FORMAT(50X,'РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА '//
*2X,59(2H---)/,1X,1HI,3X,'XE',3X,1HI,3X,
*'WB,',2X,1HI,3X,'T1,',2X,1HI,3X,
*T2,',2X,1HI,3X,'T3,',2X,1HI,3X,
*'RB,',2X,1HI,3X,'BST',2X,1HI,3X,'CK'
*,3X,1HI,3X,'RK,',2X,1HI,3X,'CE,',
*2X,1HI,3X,'F,',3X,1HI,3X,'FM',3X,
*1HI,2X,'UKO,',2X,1HI/
*1X,2(1HI,3X,'GM',3X),3(1HI,
*3X,'CEK',2X),1HI,2X,'OM',4X,1HI,
*8X,1HI,3X,'IIQ',3X,1HI,3X,'OM',3X,1HI,
*3X,'IIQ',3X,1HI,3X,'IIQ',3X,1HI,8X,1HI,
*3X,'B',4X/2X,59(2H---))
D1=DO1*EXP(-DH3/(R*TH))
D2=D1
D3=DO3*EXP(-DH3/(R*TH))
S=A4*D4
P=2*(A4+D4)
502 O=0
173 O=O+1
I=0
171 I+1
UEB=0.5
XK=XE(J)+WB(I)
82 A1=20,
B1=7.2E3
X=XK

```

```

7 C1=(A1+B1)/2
IF(NA(X,A1)*NA(X,C1))3,3,4
3 B1=C1
GO TO 5
4 A1=C1
5 IF(ABS(A1-B1)-EPS)6,6,7
6 T2=C1
81 A2=2.
B2=5.4E3
X=XE(J)
14 C2=(A2+B2)/2
IF(F(A2)*F(C2))10,10,11
10 B2=C2
GO TO 12
11 A2=C2
12 IF(ABS(A2-B2)-EPS)13,13,14
13 T3=C2
A3=60.
B3=1.E4
X=XK
61 C3=(A3+B3)/2
1F(F1(A3)*F1(C3))57,57,58
57 B3=C3
GO TO 59
58 A3=C3
59 IF(ABS(A3-B3)-EPS)60,60,61
60 T2=C3
A6=XE(J)-0.5*WB(I)
B4=XE(J)+0.5*WB(I)
159 C4=(A6+B4)/2
IF(F2(A6)*F2(C4))155,155,156
55 B4=C4
GO TO 157
156 A6=C4
157 IF(ABS(A6-B4)-EPS2)158,158,159
158 XE1=C4
A5=XK-0.5*WB(I)
B5=XK+WB(I)
64 C5=(A5+B5)/2
IF(F2(A5)*F2(C5))160,160,161
160 B5=C5
GO TO 162

```

```

161 A5=C5
162 IF(ABS(A5-B5)-EPS2)163,163,164
163 XK1=C5
    IF(ABS(XE(J)-XE1)-EPS2)165,165,81
165 IF(ABS(XK-XK1)-EPS2)166,166,81
166 X3=XE(J)
С РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
    FT=0.26E-01
151 X=XE(J)
    ZT=NA(X,T2)/NDK
    ALA=WB(1)/ALOG(ZT)
39 DX=TDX(X3)+TAX(X3)
773 SI=(ND(X3,T3)+NDK)*(NA(X3,T2)+NDK)
    */NI*NI
    FX=FT*ALOG(SI)
    IF(X3-XK)111,112,112
111 IF(FX-UEB)137,137,259
259 LO=(12*EO*E*(FX-UEB)/(Q*DX))**(1./3.)
    LP=0.5*LO
    LN=LP
    PLO=(12*E*EO*FX/(Q*DX))**(1./3.)
    PLP=0.5*PLO
    FX2=FX
    GO TO 113
112 ALO=ALA+SQRT(ALA**2+2*E*EO*(FX+UK)/
    *(Q*NDK))
    ZT=ALO/(ALA*(1-EXP(-ALO/ALA)))
    ALP2=ALA*ALOG(ZT)
    ALN2=ALO-ALP2
    PAIO=ALA+SQRT(ALA**2+2*E*EO*FX/(Q*
    *NDK))
    PZT=PAIO/ALA
    ALP3=ALA*ALOG(PZT)
    FX1=FX
    X3=XK+H
113 IF(X3-XK)132,132,240
132 X3=XK
    GO TO 39
240 R25=1.6E-19*NI*NI
С ПРОВЕРКА СУЩЕСТВОВАНИЯ ТРАНЗ. СТРУКТУРЫ
    K=(XK-LP-XE(J)-ALP2)/H1
    IF(K-1)137,513,513
513 X5=XE(J)+LP

```

```

DO 54 N=1,K
R26(N)=(NA(X5,T2)-ND(X5,T3))/DN1(X5)
R126(N)=NA(X5,T2)-ND(X,T3)
X5=X5+H1
54 CONTINUE
CALL QSF(H1,R26,Z,K)
197 TJNO=R25/Z(K)
    TINO=TJNO*S
    ZT=TINK/TINO
    UEB1=FT*ALOG(ZT)
    IF(ABS(UEB1-UEB)-0.001)207,207,202
202 UEB=UEB1
    GO TO 166
207 XK1=XK-ALP2
    CALL QSF(H1,R126,Z,K)
    TP=2.E-9
    TN=1.E-7
    XEII=XE(J)+LP
    XE1=XE(J)-LN
    XKII=XK+ALN2
    RK1=SQRT(2*Q*Z(K)/(E*EO*(XKI-XEII)))*
    *DN1(XEII)
    **TN/(XKI-XEII)*SQRT(UK)/TINK
    K=XE(J)/1.E-6
    X=0.
    DO 516 N=1,K
    DX=TDX(X)+TAX(X)
522 TSI=NA(X,T2)**2/(NI*NI)
    TFX=FT*ALOG(TSI)
    TLO=(12*E*EO*(TFX-UEB)/(Q*TDX(X)))
    ***(1./3)
    R126(N)=E*EO*P/TLO
    X=X+1.E-6
516 CONTINUE
    CALL QSF(1.E-6,R126,Z2,K)
    CET=Z2(K)
    CE=E*EO*S/LO
    CE=CE+CET
    WT=DN1(XEII)/(ALA*(XKI-XEII))
    RK=2*(DEP-XKII)/(Q*1000.*NDK*S)
    SK=AK*DK
    CKA=E*EU*SK/ALO

```


С РАСЧЕТ ТОКОВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

```

115 K=(XK+ALN2-XE(J)-LP)/H2
X4=0.
X=0.
K=XEI/1.E-5
DO 510 N=1,K
776 R126(N)=2.8*(ND(X,T3)-NA(X,T2))*SQRT
*(DN1(X)*TP/2.8)/(NI*NI*LN1(X))
X=X+1.E-5
510 CONTINUE
CALL QSF(1.E-5,R126,Z,K)
TIPT=Q*P/Z(K)
ALNP=SQRT(TN*FT*(1265./(1.+(NA(X4,T2)
*/0.85E1/))*0.72)+65.))
X4=XE(J)-LN
DPX=DN1(X4)/2.8
LP1X=SQRT(DPX*TP)
TJPO=Q*NI*NI*ALA/(TP*4*(ND(XEI,T3)
*-NA(XEI,T2)))
TIPO=TJPO*S
SE=S+P*XE(J)
TP=1.E-6
TN=2.E-5
TBPNO=(Q*SE*NI*LO*FT)/(SQRT(TN*TP)
*(FX2-UEB))
SN=1.E-15
SP=SN
ANT=3.E10
VN=1.E7
VP=VN
TBSO=Q*NI*0.5*ANT*SQRT(SN*VN*SP*VP)*
*ALNP*P
AM=2.
TIPB=TIPO*EXP(UEB/
*FT)+(TBSO+TBPNO)*EXP(UEB/(AM*FT))
С РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ТОКА
BST2=TINK=TIPB
K=(XK-ALP2)/H
X=0.
DO 241 N=1,K
R26(N)=Q*DN1(X)/FT*NA(X,T2)
X=X+H

```

```

241 CONTINUE
CALL QSF(H,R26,Z3,K)
K1=(XK1-XBII)/H1
X=XBII
DO 242 N=1,K1
R26(N)=Q*DN1(X)/FT*NA(X,T2)
X=X+H1
242 CONTINUE
CALL QSF(H1,R26,Z4,K1)
RB=DD/(2*D4*Z3(K)+A4/(12*D4*Z4(K1))
CKP=SK*E*EO/ALOP
UK1=60*(TDX(XK)+TAX(XK))/3.E20
***(-2./5)
FT1=1/(6.28*(FT/TINK*CE+1./WT+(RK+
*RB)*CKA))
FG=1.+SQRT(2*RB*TINK/(FT*BST2))+
*1./SORT(BST2)
WRITE(3,501)XE(J),WB(I),T1, T2,T3,
*RB,BST2,CKA,RK1,
*CE,FT1,FG,UK1
501 FORMAT(13(1H I,E8.2))
TN=1.E-7
137 IF(WB(I)-WB(5))172,172,171
172 IF(XE(J)-XE(5))91,91,173
91 STOP
END

```

ЛИТЕРАТУРА

- Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкции и технология микросхем (ГИС и БГИС).— М.: Сов. радио, 1980.
- Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника.— М.: Высшая школа, 1978.
- Конструирование и технология изготовления гибридных интегральных схем. /Л. А. Коледов, В. А. Волков, Э. М. Ильина и др.; Под ред. Л. А. Коледова.— М.: МИЭТ, 1977.
- Матсон Э. А., Крыжановский Д. В., Петкевич В. И. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА.— Минск: Вышэйшая школа, 1979.
- Микроэлектроника и полупроводниковые приборы: Сб. ст./Под ред. А. А. Васенкова и Я. А. Федотова.— М.: Сов. радио, 1976—1980, вып. 1—5.
- Ненашев А. П., Коледов Л. А. Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1981.
- Николаев И. М., Филинук Н. А. Микроэлектронные устройства и основы их проектирования.— М.: Энергия, 1979.
- Степаненко И. П. Основы микроэлектроники.— М.: Сов. радио, 1980.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Термины и определения, классификация и условные обозначения интегральных микросхем	5
1.1. Термины и определения	5
1.2. Классификация интегральных микросхем и система условных обозначений	13
2. Этапы разработки и документация на интегральные микросхемы	17
2.1. ЕСКД. Общие положения	17
2.2. Этапы разработки конструкторской документации	19
2.3. Комплект конструкторской документации на интегральную микросхему	20
3. Тонкопленочные гибридные интегральные микросхемы	37
3.1. Материалы	37
3.2. Конструкции и расчет тонкопленочных элементов	42
3.3. Навесные компоненты	65
3.4. Разработка топологии	85
3.5. Оценка качества конструкции	88
4. Толстопленочные интегральные микросхемы	97
4.1. Общие сведения	97
4.2. Подложки толстопленочных интегральных микросхем	97
4.3. Толстопленочные проводники	97
4.4. Толстопленочные резисторы	99
4.5. Диэлектрические элементы	104
4.6. Разработка топологии	105
5. Материалы полупроводниковых интегральных микросхем	108
5.1. Общие сведения	108
5.2. Основные характеристики кремния и арсенида галлия	108
5.3. Параметры кремния и арсенида галлия, выпускаемых промышленностью	115
6. Электронно-дырочные переходы в полупроводниках. Контакты металл — полупроводник	123
6.1. Распределение примесей в полупроводниках при создании электронно-дырочных переходов	123
6.2. Электрофизические параметры электронно-дырочных переходов	130
6.3. Контакт металл — полупроводник	152
7. Элементы полупроводниковых интегральных микросхем	155
7.1. Резисторы	156
7.2. Конденсаторы	165
7.3. Интегральные полевые транзисторы с $p-n$ -переходом	176
7.4. Интегральные полевые транзисторы типа МДП	181
7.5. Интегральные биполярные транзисторы	184
8. Защита и герметизация интегральных микросхем	191
8.1. Требования к защите интегральных микросхем	191
8.2. Корпуса. Основные типы и размеры	194
8.3. Конструктивно-технологические варианты исполнения и герметизации интегральных микросхем	212
Приложение	217