

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

сборник учебно-методических материалов

для направления подготовки

03.03.02 – Физика

Благовещенск 2017

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
Университета*

Составитель: Нецименко В.В.

Радиоматериалы и радиокомпоненты: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 03.03.02. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

Рассмотрен на заседании кафедры физики 05.06.2017, протокол № 11.

© Амурский государственный университет, 2017

© Кафедра физики, 2017

© Нецименко В.В., составление

ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты» сформировать знания студентов в области современных радиокомпонентов, а также основных материалов, используемых при их изготовлении.

Основными задачами дисциплины является изучение электрофизических свойств, характеристик и областей применения; материалов, применяемых в радиоэлектронных системах; изучение типов, эксплуатационных характеристик и маркировок отечественных и зарубежных радиокомпонентов; освоение методов выбора радиокомпонентов для различных видов радиоэлектронных систем.

Для формирования умений и навыков в учебной программе дисциплины предусмотрены лекции, лабораторные работы, а также самостоятельная работа студентов, роль которой в настоящее время в системе высшего образования значительно возросла и является формой самообразования.

В процессе обучения происходит закрепление и систематизация знаний, углубление теоретических знаний, развитие умений работать с различными источниками информации и как результат – освоения основных компетенций.

1 КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции

В высшем учебном заведении лекция является важной формой учебного процесса и представляет собой в основном устное систематическое и последовательное изложение материала по какой-либо проблеме, методу, теме вопроса и т. д.

Основные функции, которые осуществляет вузовская лекция – это информативная, ориентирующая и стимулирующая, методологическая, развивающая и воспитывающая, поскольку на лекции студенты получают глубокие и разносторонние знания, развивают свои творческие способности.

Лекции могут быть вводными, обзорными, тематическими (лекции по изучению нового материала), итоговыми.

Вводные лекции подготавливают студента к восприятию данной дисциплины (физики) или ее раздела. На вводной лекции излагаются цели и задачи дисциплины, ее актуальность, практическая значимость, методы научного исследования и т.д. для того, чтобы дать целостное представление о дисциплине и вызывать интерес к предмету.

Тематические лекции посвящены глубоко осмысленному и методически подготовленному систематическому изложению содержания курса (дисциплины).

Итоговая лекция содержит основные идеи и выводы по курсу, выводы о достижении поставленных учебных целей.

На обзорных лекциях рассматриваются наиболее сложные, проблемные вопросы курса или новейшие достижения в данной области, что позволит установить взаимосвязь учебного материала с производством и новейшими научными достижениями.

Подготовка к самостоятельной работе над лекционным материалом должна начинаться на самой лекции. На лекции студент должен совместить два момента: внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную

запись. И как бы внимательно студент не слушал лекцию, большая часть информации вскоре после восприятия будет забыта. Поэтому при изучении дисциплины студентам рекомендуется составлять подробный конспект лекций, так как это обеспечивает полноценную систематизацию и структурирование материала, подлежащего изучению. Конспект лекций должен отражать специфику данного курса, которая состоит в обобщении физической теории, рассматривающей процессы обмена энергией в макроскопических системах, на случай сложных, полифункциональных систем.

Очень важным является умение правильно конспектировать лекционный материал и работать с ним. Ниже приведены *рекомендации по конспектированию лекций и дальнейшей работе с записями*.

1. Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам. Возможно ее сочетание с записями по практическим занятиям, иллюстрирующим применение теоретических законов и соотношений в решении практических задач.

2. Конспект должен легко восприниматься зрительно (чтобы максимально использовать «зрительную» память), поэтому он должен быть аккуратным. Выделяйте заголовки, отделите один вопрос от другого, соблюдайте абзацы, подчеркните термины.

3. При прослушивании лекции обращайтесь внимание на интонацию лектора и вводные слова «таким образом», «итак», «необходимо отметить» и т.п., которыми он акцентирует наиболее важные моменты. Не забывайте пометать это при конспектировании.

4. Не пытайтесь записывать каждое слово лектора, иначе потеряете основную нить изложения и начнете писать автоматически, не вникая в смысл. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Техника прочтения лекций преподавателем такова, что он

повторяет свою мысль два-три раза. Постарайтесь вначале понять ее, а затем записать, используя сокращения.

Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе: формулировки определений и законов, выводы основных уравнений и формул, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов.

Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Научитесь в процессе лекции разбивать текст на смысловые части и заменять их содержание короткими фразами и формулировками. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную.

5. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Используйте общепринятую в данном разделе физики аббревиатуру и систему сокращений. Придумайте собственную систему сокращений, аббревиатур и символов, удобную только вам (но не забудьте сделать словарь, иначе существует угроза не расшифровать текст). Однако при дальнейшей работе с конспектом символы лучше заменить обычными словами для быстрого зрительного восприятия текста.

6. Конспектируя лекцию, надо оставлять поля, на которых позднее, при самостоятельной работе с конспектом, можно сделать дополнительные записи, отметить непонятные места. Полезно после каждой лекции оставлять одну страницу свободной, она потребуется при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи, графики, схемы, и т.п.

7. После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Насколько эффективно студент это сделает, зависит и прочность усвоения знаний, и, соответственно, качество восприятия предстоящей лекции, так как он более целенаправленно будет её слушать. В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать опорные конспекты, учебники и учебные пособия.

1.2 Краткое содержание курса лекций

ТЕМА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОМАТЕРИАЛОВ И РАДИОКОМПОНЕНТ

1.1 Предметом изучения дисциплины

- проводниковые, диэлектрические и магнитные материалы, используемые в радиоэлектронике;
- радиокомпоненты: резисторы, конденсаторы и высокочастотные катушки индуктивности.

Задачи изучения дисциплины ставится получение необходимых знаний:

- по физико-техническим свойствам радиотехнических материалов;
- по физическим основам функционирования, основным свойствам, конструктивным особенностям и областям применения современной элементной базы РЭС.

1.2 Общие сведения о радиоматериалах

Все радиотехнические материалы можно разделить по их поведению в электромагнитном поле на основные четыре группы (класса):

Диэлектрики – материалы, имеющие большое удельное электрическое сопротивление: $\rho \approx 10^3 \dots 10^{16}$ Ом·м и большую запрещенную зону $E_g \geq 3$ эВ.

Полупроводники – материалы, диапазон удельных электрических сопротивлений которых очень велик и перекрывает собой значения сопротивлений диэлектриков и проводников: $\rho \approx 10^{-3} \dots 10^8$ Ом·м, ширина запрещенной зоны $E_g \leq 3$ эВ.

Проводники – материалы, имеющие очень маленькое удельное сопротивление: $\rho \approx 10^{-8} \dots 10^{-4}$ Ом·м, запрещенная зона практически отсутствует.

Магнитные материалы – материалы, у которых диапазон сопротивлений большой, но для них главное – концентрирование магнитных силовых линий в материале и высокая магнитная проницаемость – μ .

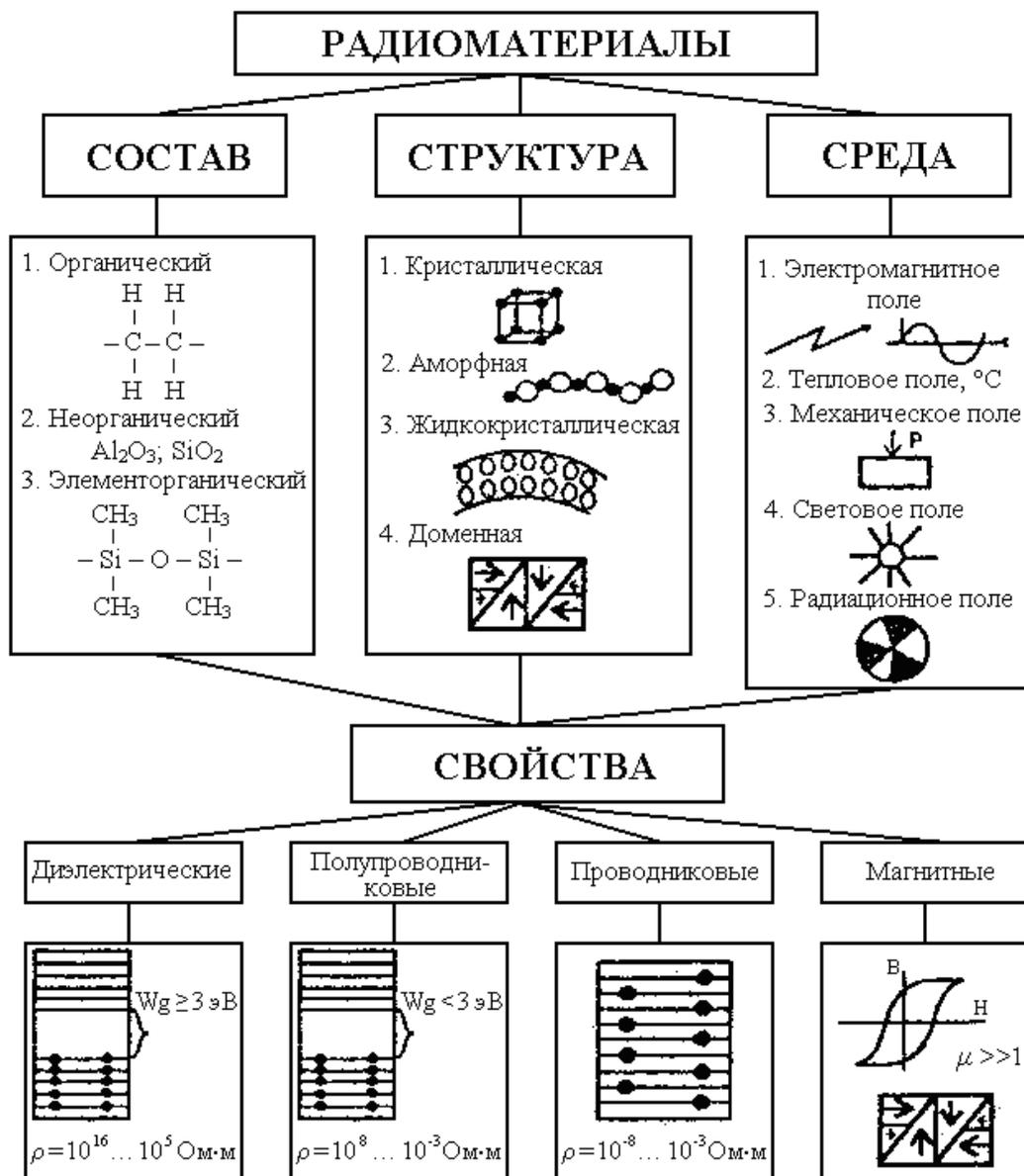


Рис. 1.1. Классификация радиоматериалов

Под составом материала здесь понимается только основной химический состав: органический, неорганический или элементоорганический.

Под структурой – кристаллическая, аморфная, жидкокристаллическая и доменная структуры.

Под внешней средой – различные виды воздействующих на материал полей (локальных или общих): электромагнитного, теплового, механического, светового, радиационного и др.

Поведение материалов в электромагнитных полях характеризуется параметрами: величиной запрещенной зоны (E_g), удельным электрическим

сопротивлением (ρ), диэлектрической проницаемостью (ϵ), концентрацией носителей заряда (n_i), магнитной проницаемостью (μ) и целым др.

Основные факторы, влияющие на физические свойства материала:

1. Наличие или отсутствие упорядочения в расположении атомов (кристаллические или аморфные тела);
2. Тип кристаллической структуры для кристаллов или наличие ближнего порядка (для аморфных тел);
3. Точечные или линейные дефекты в твердом теле (вакансии, дислокации и т.д.);
4. Макродефекты (поры, границы зерен);
5. Макрокристаллическая структура (монокристалл, поликристалл, текстурированный материал);
6. Фазовый состав:
 - фазовый состав (однофазный или многофазный)
 - тип фаз, входящих в состав материала
 - факторы, определяющие стабильность фаз (электронный или размерный)
7. электронно-зонные характеристики:
 - Тип межатомной связи (ионная, ковалентная, металлическая, Ван-дер-ваальсова, водородная);
 - Характер заполнения верхних электронных зон твердого тела (пустая или частично заполненная зона проводимости, величина ширины запрещенной зоны, наличие и расположения электронных уровней или дефектов в запрещенной зоне);
 - Наличие перекрытия электронных зон в твердом теле.

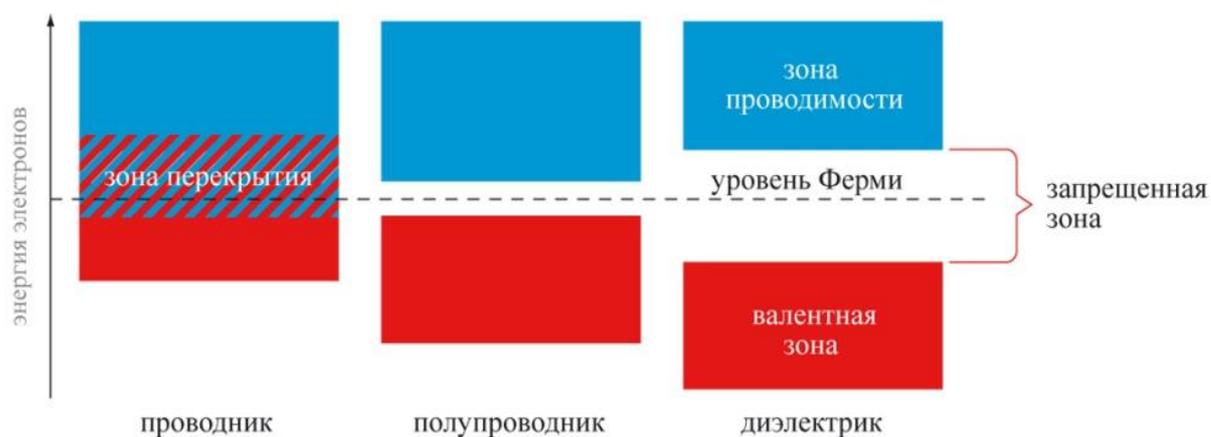


Рис. 1.2. Зонная структура проводников, полупроводников и диэлектриков.

1.3 Основные положения зонной теории твердого тела

В соответствии с принципом Паули на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, причем с противоположным направлением спинового магнитного момента, следовательно:

- число электронных состояний в зоне оказывается конечным и равным числу соответствующих атомных состояний;
- число электронов, заполняющих данную энергетическую зону, также конечно (это играет важную роль в формировании энергетического спектра кристалла);
- также как энергетические уровни в изолированных атомах энергетические зоны для кристаллов могут быть полностью заполненными, частично заполненными и свободными.
- самую верхнюю из заполненных электронами зон называют валентной. Эта зона соответствует энергетическим уровням электронов внешней оболочки в изолированных атомах. Ближайшую к ней свободную, незаполненную электронами зону называют зоной проводимости. Взаимное положение этих двух зон определяет большинство процессов, происходящих в твердом теле.

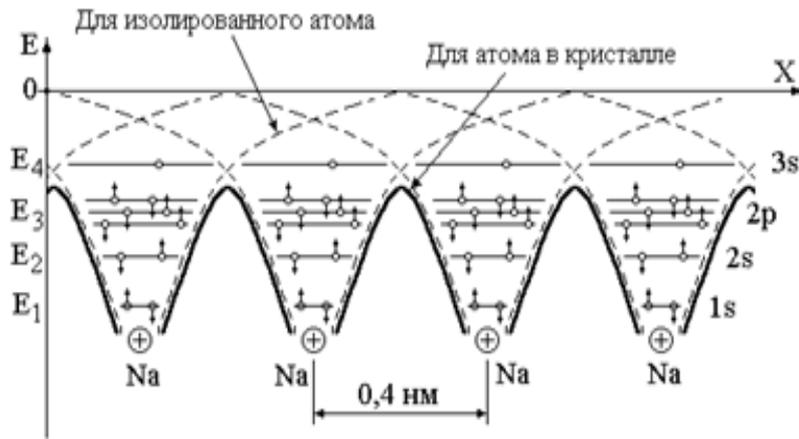


Рис. 1.3.

Для нахождения энергетического спектра электронов в кристалле необходимо решить одноэлектронное уравнение Шредингера с периодическим потенциалом решетки $V(r)$. Собственные функции $\psi_k(r)$ и собственные значения энергии $E_k(r)$ этого уравнения зависят от вида периодического потенциала. С учетом валентной аппроксимации и адиабатического приближения уравнение Шредингера для электронов в кристалле имеет вид:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \Delta_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 |r_i - r_j|} - \frac{1}{2} \sum_i \sum_k \frac{z_k e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 |r_i - R_{0k}|} \right] \Psi_e = E_e \Psi_e \quad (1.1)$$

Для его решения применяют одноэлектронное приближение и функцию Блоха, для которой решениями одноэлектронного уравнения Шредингера с периодическим потенциалом, это плоские волны, модулированные некоторой функцией с периодичностью решетки.

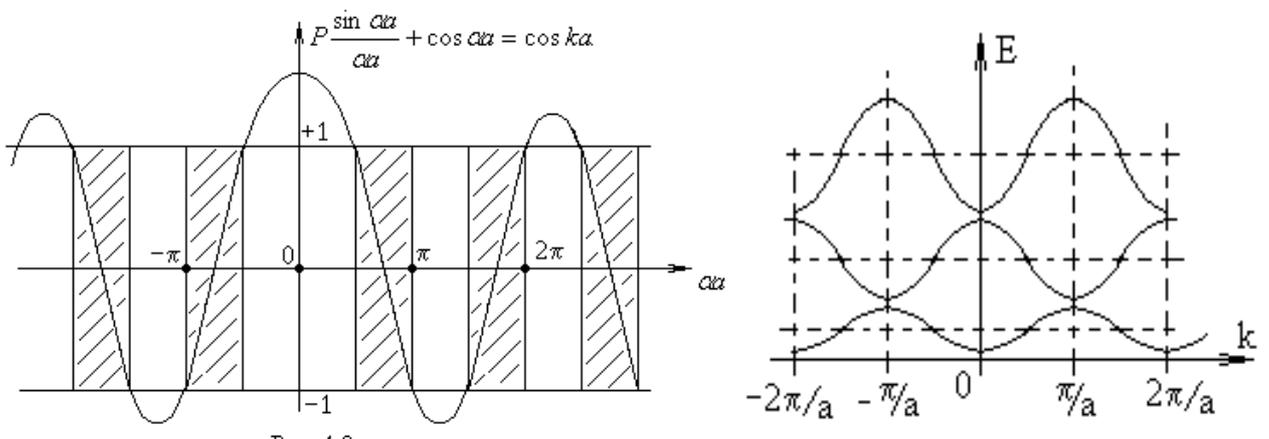


Рис. 1.4.

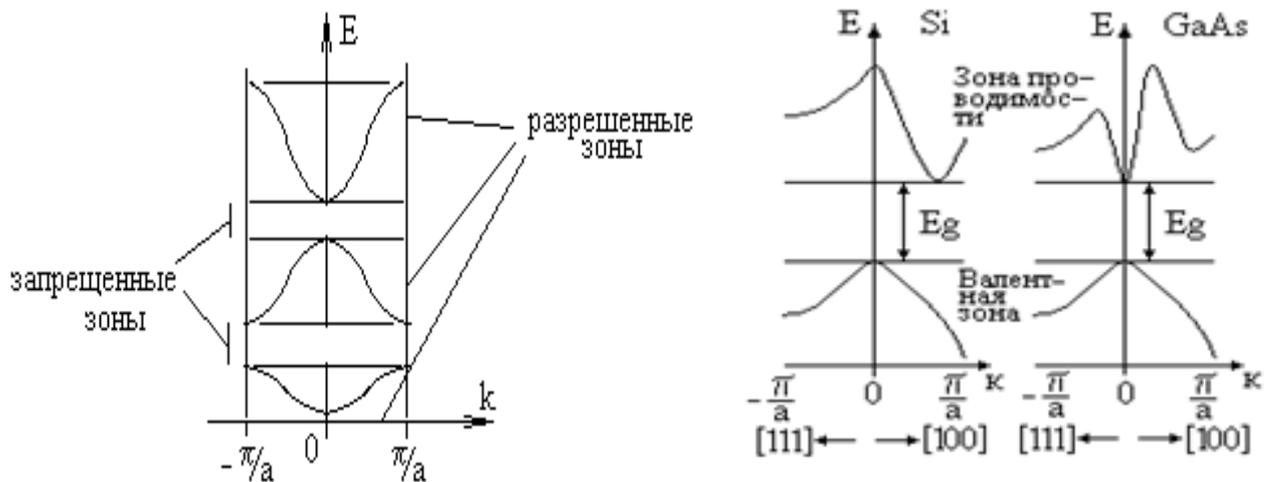


Рис. 1.5.

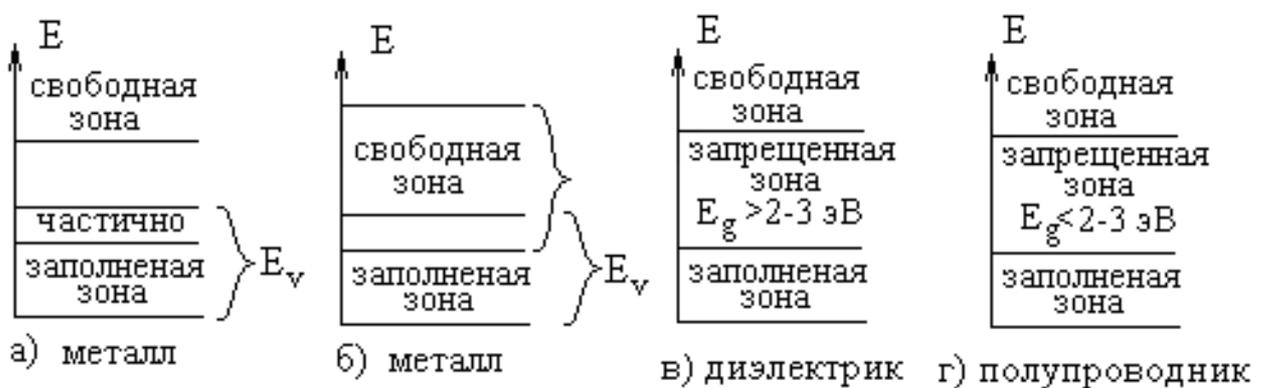


Рис. 1.6.

Под действием внешнего электрического поля электроны, занимающие уровни вблизи границы заполнения, ускоряются и переходят на более высокие свободные уровни той же зоны. В кристалле появляется ток. Таким образом, кристаллы с частично заполненной валентной зоной хорошо проводят электрический ток, т. е. являются металлами.

1.4 Общие сведения о радиокомпонентах

В общем случае под радиокомпонентами понимаются электроэлементы радиоэлектронной аппаратуры: электрорадиоэлементы, функциональные устройства, устройства функциональной электроники, электронные и полу-проводниковые приборы, интегральные микросхемы и др. элементы.

Под электрорадиоэлементами (ЭРЭ) понимаются простейшие пассивные электроэлементы электронной аппаратуры, блока, функционального узла или

устройства, имеющие законченную конструктивную форму и предназначенные для их построения и выполнения в них простейших электрических функций.

Принцип функционирования ЭРЭ основан на использовании физических свойств основных материалов во взаимодействии с окружающей средой. К ЭРЭ относятся резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности.

Свойства ЭРЭ, как и других радиокомпонентов (РК), оцениваются основными (положительными) и паразитными (отрицательными) параметрами. Величина параметров РК зависит от геометрических параметров элементов конструкции, электрофизических свойств основных материалов, условий эксплуатации и др. факторов. Так как параметры конструкций, свойства материалов и внешние воздействия носят случайный характер, то и электромагнитные параметры РК являются случайными величинами.

Под параметрами понимается количественное выражение физических свойств радиоматериалов или радиокомпонентов.

В общем случае свойства радиокомпонентов оцениваются следующими параметрами и характеристиками:

- номинальным значением основного параметра;
- допустимым отклонением основного параметра от номинального значения – допуском;
- электрической прочностью;
- параметрами, характеризующими активные потери;
- параметрами, характеризующими стабильность и надёжность;
- технико-экономическими показателями (ТЭП) – массой, габаритным объемом, стоимостью и т.д.
- эксплуатационными параметрами и характеристиками.

ТЕМА 2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Это материалы, служащие проводниками электрического тока. Их удельное электрическое сопротивление мало, и составляет от 10^{-8} до 10^{-4} Ом·м. Проводники могут быть твердыми веществами: кристаллические металлы и сплавы, углерод – это проводники 1 рода; жидкими – электролиты – это

проводники 2 рода; газообразными – газоразрядная плазма – проводники 3 рода.

Рассмотрим проводники 1 рода, которые практически не имеют запрещенной зоны, так как зоны валентная и проводимости у них перекрываются.

Металлы обладают металлическим типом химической связи, при которой валентные электроны атомов обобществлены и образуют так называемый «свободный» электронный газ. Атомы, расположенные в узлах (междуузлиях) кристаллической решетки, являются положительно заряженными ионами, так как они отдали свои электроны «в общее пользование». В такой системе имеет место большое количество свободных носителей заряда – электронов.

Основные электрические параметры проводников, отражающие их свойства, приводятся в справочных таблицах (см. табл. в конце раздела).

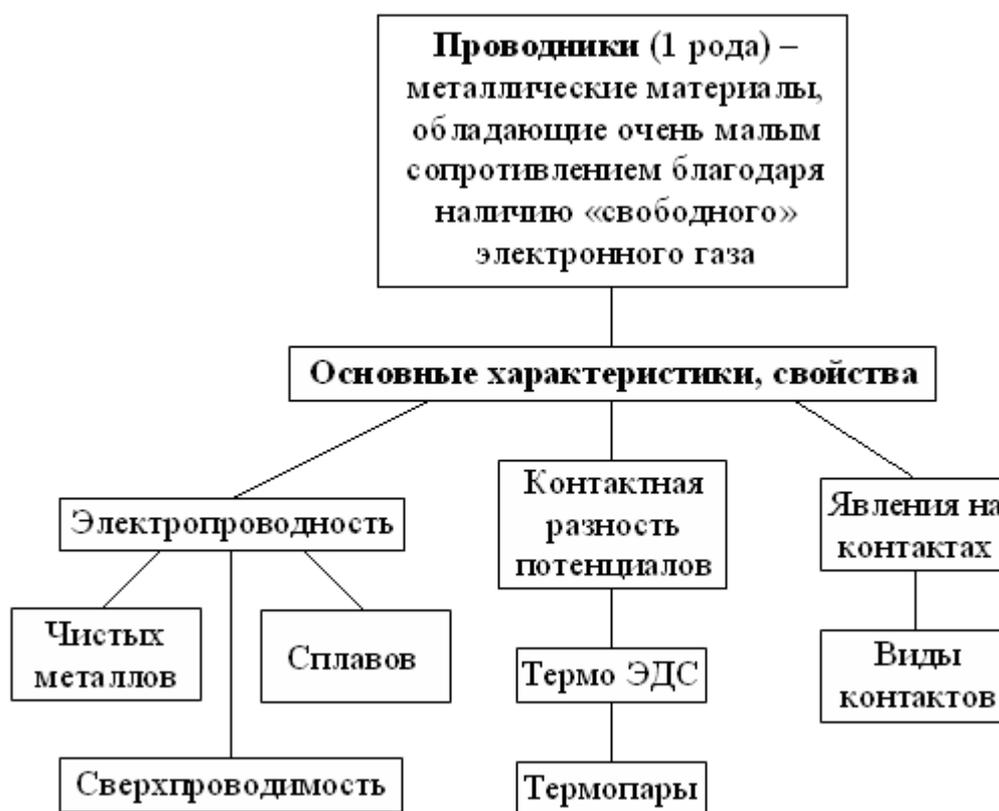


Рис. 2. 1. Структурная схема проводников

2. 1. Электропроводность проводниковых материалов

В металлических проводниках имеется большое количество свободных носителей заряда – электронов, поэтому их электропроводность велика. Формула электропроводности проводников:

$$\gamma = q \cdot N \cdot u, \quad (2.1)$$

где N - концентрация свободных носителей заряда, м^{-3} ; u - подвижность носителей заряда, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; q - величина заряда носителя, Кл.

При большом количестве электронов (это $\sim 10^{28}$ в одном кубическом метре) их число практически не зависит от содержания примесей или от температуры, но на подвижность примеси оказывают большое влияние, создавая своим присутствием дополнительные препятствия направленному движению электронов в электрическом поле. Повышение температуры также уменьшает электропроводность, так как уменьшается подвижность электронов в результате тепловых колебаний кристаллической решетки и увеличения хаотического движения электронов.

Температурный коэффициент ТКР (ТК ρ) проводников (чистых металлов) положителен и составляет величину $(3 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-3})$ 1/град. На рис. 2.2. приведены зависимости удельного электрического сопротивления (ρ) и температурного коэффициента сопротивления – ТК ρ от процентного содержания никеля (Ni) и меди (Cu) в сплаве Cu-Ni.

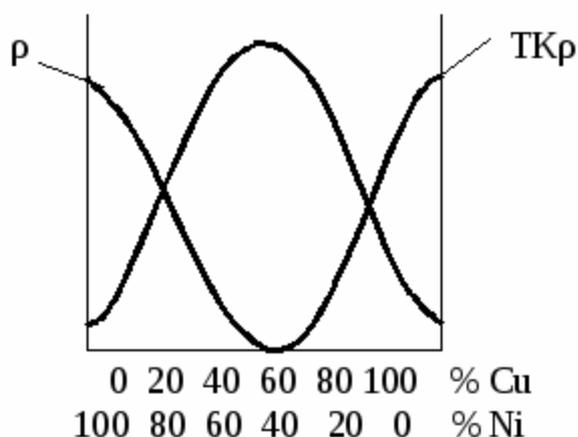


Рис. 2.2. Зависимость ТК ρ и ρ для сплава Ni – Cu

Из рис. 2.2. видно, что увеличение в сплаве каждого из компонентов, значительно увеличивает сопротивление сплава по сравнению с исходными

металлами: Cu - 0,0175 Ом·мм²/м. а сплав, содержащий 60% Cu и 40% Ni, - 0,58 Ом·мм²/м имеет сопротивление почти в 30 раз большее. При этом $T_{кр}$ этого сплава отрицателен или очень мал: $-(5...20) \cdot 10^{-6}$ 1/град;

С увеличением температуры удельное сопротивление обычно растет. При инженерных расчетах пользуются формулой:

$$\rho_t = \rho_0 \cdot [1 + \alpha_\rho \cdot (t - t_0)], \quad (2.2)$$

где ρ_t - удельное сопротивление при температуре t ; ρ_0 - удельное сопротивление при комнатной температуре (обычно $t = 20$ °С); α_ρ - средний температурный коэффициент удельного сопротивления.

Механическая обработка металлов вызывает искажение кристаллической решетки и приводит к увеличению удельного сопротивления.

2. 2 Сверхпроводимость проводниковых материалов

Многие металлы и сплавы ниже определенной температуры (для каждого материала температура своя) переходят в сверхпроводящее состояние, т.е. их сопротивление постоянному току становится практически равным нулю. Если металл переходит в это состояние скачком – это сверхпроводник 1-го рода, если плавно – сверхпроводник 2-го рода (как правило это сплав).

Температура перехода в сверхпроводящее состояние называется критической ($T_{кр}$), выше этой температуры сверхпроводник переходит в обычное проводящее состояние (рис. 2.3.).

На рисунке показано поведение сверхпроводника первого рода – Ir.св. и сверхпроводника второго рода Pr.св. в широком диапазоне температур. При температуре плавления $T_{пл}$ сопротивление резко растет, пока кристалл не перейдет в жидкое состояние; при дальнейшем повышении температуры сопротивление снова плавно возрастает.

Очень кратко сверхпроводимость можно объяснить тем, что в металле при определенных условиях образуются пары электронов (куперовские пары), имеющие противоположные импульсы и спины. Такая пара взаимодействует с кристаллической решеткой – один электрон, отдавая ей свой импульс, переводит ее в возбужденное состояние; второй электрон этой пары забирает

переданный решетке импульс и тем самым переводит ее в нормальное (первоначальное) состояние.

В результате состояние решетки не изменяется, а между электронами, обменявшимися фотонами, возникает сила взаимного притяжения. Таких электронных пар в металле великое множество, но все они движутся согласованно, электронные волны их имеют одинаковые длины и фазы.

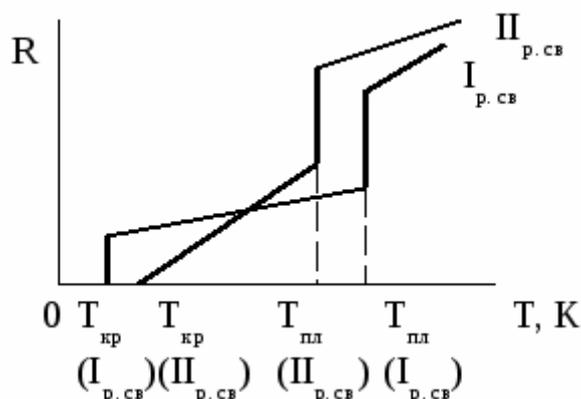


Рис. 2.3. Зависимость сверхпроводников I_p и II_p от температуры

Отсутствие сопротивления в сверхпроводнике объясняется тем, что движение всех электронных пар в металле можно описать как распространение одной (суммарной) электронной волны, которая не рассеивается кристаллической решеткой потому, что сама решетка участвует в образовании этой волны, т.е. собственные колебания решетки согласованы с электронной волной, имеют те же длины волн и фазы.

Ток, возбуждаемый за счет внешнего источника (который затем выключается) в сверхпроводящей цепи, может сохраняться очень длительное время, если в ней поддерживать определенные условия.

Кроме нулевого сопротивления сверхпроводники обладают свойствами идеальных диамагнетиков, магнитные силовые линии в них не проникают, выталкиваются.

На разрыв электронных пар и переход в нормальное (несверхпроводящее) состояние требуется затрата определенной энергии, например: температуры, превышающей критическую $T_{кр}$; магнитного поля, превышающего $H_{кр}$ (для

каждого металла $H_{кр}$ – свое); электрического тока, величина которого вызывает на поверхности сверхпроводника критическое магнитное поле – $H_{кр}$.

Если энергия этих воздействий больше сил связи между электронными парами – они разрушаются, а металл теряет свое сверхпроводящее состояние, становясь обычным проводником.

Надо заметить, что не все чистые металлы и сплавы переходят в сверхпроводящее состояние. Например, такие хорошие проводники при нормальных условиях как медь и серебро, не переходят в сверхпроводящее состояние даже при температурах близких к абсолютному нулю.

В таблице 2.1 приведены некоторые проводниковые материалы, способные становиться сверхпроводниками при низких температурах, их критические тепловые и критические магнитные поля.

Таблица 2.1

Материал	Критическая температура $T_{кр}$, К	Критическое магнитное поле $H_{кр}$, кА/м
Цинк (Zn)	0,88	4,24
Алюминий (Al)	1,2	8
Кадмий (Cd)	0,56	2,5
Ртуть (Hg)	4,15	32,8
Свинец (Pb)	7,2	64,5
Ниобат олова (Nb_3Sn)	18,1	$19,5 \cdot 10^3$

Применение сверхпроводников в мощных магнитах, трансформаторах, генераторах, линиях передач сводит к нулю потери в проводниках и позволяет значительно повышать плотность тока и напряженность магнитного поля.

Сейчас ведутся работы по созданию высокотемпературных сверхпроводников. Предполагается, что ими будут керамические материалы.

2. 3. Контактная разность потенциалов. Термоэлектродвижущая сила

Если два различных металла или сплава приводятся в плотное соприкосновение, между ними может возникать контактная разность потенциалов (КРП). Причина ее появления состоит в неодинаковой величине работы выхода электронов из металлов, а также в различной плотности свободных электронов у разных металлов.

Если взять два разных проводника – А и В (рис. 2.4) с работами выхода электронов $W_{\text{выхА}}$ и $W_{\text{выхВ}}$; плотностью электронов n_A и n_B , то при соотношении, например, $W_{\text{выхА}} < W_{\text{выхВ}}$ и $n_A > n_B$, электроны из А перейдут в приграничном слое контакта в В (градиент концентрации электронов!), нарушится электронейтральность и на границе соприкосновения появится контактная разность потенциалов, направление которой показано стрелкой.

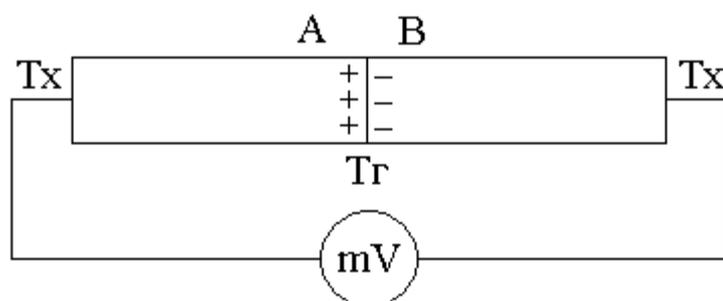


Рис. 2.4. Контактная разность потенциалов ($W_A < W_B$, $n_A > n_B$)

Контактная разность потенциалов определяется по формуле:

$$U_{AB} = U_A - U_B + \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (2.3)$$

где U_A и U_B – потенциалы соприкасающихся металлов; n_{0A} и n_{0B} – плотности электронов в А и В, м^{-3} ; K – постоянная Больцмана, $K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град; q – заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ А·с; T – абсолютная температура, К.

Если температура спая (T_G) будет больше температуры (T_X) концов проводников, между которыми включить измерительный прибор, то в замкнутой цепи возникнет термоэлектродвижущая сила, которую можно определить по формуле

$$U = \frac{k}{q} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \cdot (T_G - T_X). \quad (2.4)$$

Контактная разность потенциалов и термо-ЭДС должны учитываться при изготовлении точных измерительных приборов; чтобы не вносить погрешности в измерения, надо подбирать такие контактирующие металлы, между которыми возникает как можно меньшие КРП и термо-ЭДС, например, между медью и манганином возникает термо-ЭДС порядка (2...3) мкВ/град, а между медью и константаном (40...50) мкВ/град. Это явление используется для изготовления термопар – измерителей температуры.

Примером пар проводников для изготовления термопар могут служить: медь-константан, хромель-копель, которые используются для измерения температур до 300...500 °С, хромель-алюмель - до 900...1000°С и др.

2. 4 Контакты

Рассмотрим явления, которые имеют место при контактировании двух проводников (контактов) и сопровождаются пропусканием тока через контакт.

При механическом соприкосновении двух твердых тел не происходит такое их сближение, при котором они образуют единое целое для прохождения тока. Основные причины этому:

- поверхности тел имеют шероховатости, превышающие размеры атомов;
- многие металлы при воздействии окружающей среды окисляются, образуя на поверхности окисные пленки, являющиеся в большинстве случаев диэлектрическими (CuO, Ag₂O, Al₂O₃ и т.п.);
- на поверхности твердых тел адсорбируются молекулы кислорода, воды, газов, пыли, содержащиеся в окружающей среде.

Таким образом, контакт между проводниками первого рода осуществляется в результате сложных процессов, которые можно представить с помощью модели (по Хольму), рис. 2.5.

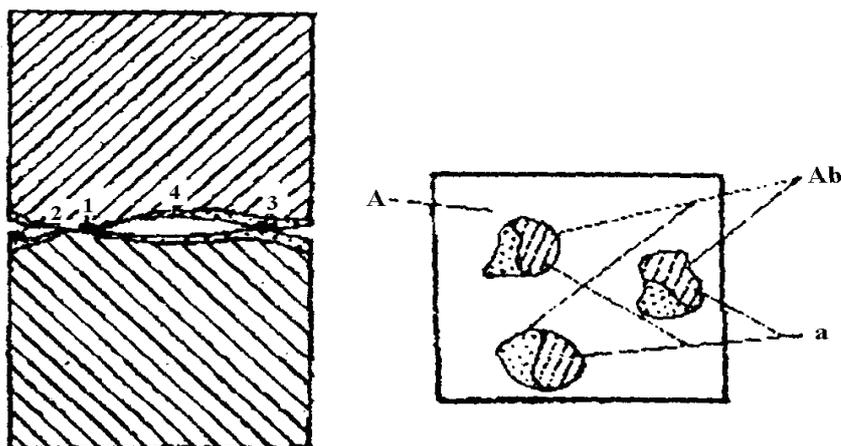


Рис. 2.5. Модель контактирования двух проводников

Для твердых материалов касание их поверхностей происходит не по всей площадке (A), а в нескольких малых площадках, часть которых представляет чистый металл (1), а часть окисленный (3). В ряде мест контакт отсутствует (2,4) в результате наличия воздушных зазоров. Если вся поверхность контакта материалов (A), контактные площадки (Ab), а площадь чисто металлических контактов «а», то соотношения между ними:

$$a < Ab \ll A. \quad (2.5)$$

Прохождение тока через такой контакт сопровождается явлениями, которые необходимо учитывать при выборе проводников контактной пары, при расчете площади контактов и выборе изоляционных материалов, примыкающих к ним.

Рассмотрим некоторые из этих явлений:

- так как площадь электрического контакта (а) меньше, чем расчетная (A), то в месте контакта происходит выделение значительной тепловой энергии – контакт нагревается за счет локальных перегревов;
- при замыкании и размыкании происходит механический износ поверхностей контактной пары (выкрашивание из-за трения и усталости материала);
- при размыкании контактов под действием значительных токов (в силовоточной аппаратуре), когда возникает дуга, может происходить

перенос одного металла на поверхность другого (дуговая эрозия), их сплавление;

- в области контактных (чистый металл) площадок линии электрического тока значительно искривляются (эффект стягивания), рис. 2.6.

Внутри области стягивания имеет место большой градиент потенциала, а за ее пределами – очень малый. Градиент потенциала приводит к дрейфу носителей заряда по границе раздела контактов. При протекании тока через контакт 1 (рис. 2.5), в месте электрического соединения происходит выделение тепловой энергии и перегрев контакта (ΔT_k) по сравнению с остальным телом металла и окружающей средой:

$$\Delta T \hat{e} = \frac{I^2 \cdot R^2}{8 \cdot \rho \cdot \lambda_t}, \quad (2.6)$$

где ρ – удельное сопротивление контактного материала; λ_t – его теплопроводность; R – сопротивление контакта; I – протекающий ток через контакт.

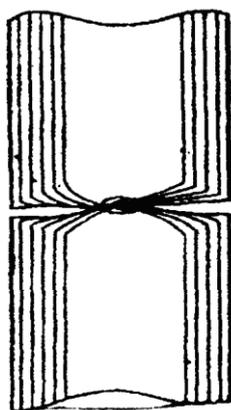


Рис. 2.6. Эффект стягивания

Наличие градиента температур может привести к диффузии носителей заряда от нагретого контакта к более холодной периферии материала и (или) диффузии атомов металла.

Контактное сопротивление (R) принимается как сопротивление стягивания (следствие стягивания линий токов к проводящей площадке) и сопротивление пленок на площадках касания (R_f):

$$R = R_{c1} + R_{c2} + R_f, \quad (2.7)$$

где R_{c1} , R_{c2} – сопротивления стягивания первого и второго контактов; R_f – сопротивление пленки.

Большой процент выхода электрической аппаратуры из строя происходит за счет процессов, происходящих на контактах. Поэтому при выборе материалов для контактных пар нужно учитывать: условия их эксплуатации, окружающую среду; взаимодействие материалов друг с другом (термо-ЭДС, взаимная диффузия), твердость, окисляемость и т.д.

Наиболее ответственными контактами, применяемыми в радиоэлектронике, являются разрывные и скользящие. При этом материалы должны обеспечивать их высокую надежность: исключение возможности обгорания контактирующих поверхностей, приваривания друг к другу, сильного окисления и др.

В качестве контактирующих материалов при разрывных контактах применяют чистые тугоплавкие металлы, различные сплавы и металлокерамические композиции, например:

Cu-W; Ag-CdO; Ag-Co,Ni,Cr,W,Mo,To; Cu-C; Cu-W,Mo; Au-W,Mo и др.

2. 5. Классификация проводниковых материалов

Обычно проводники классифицируют по их удельному сопротивлению, по температуре плавления, по твердости и другим факторам.

К первой классификационной группе относят материалы высокой проводимости. Обычно это чистые материалы: медь, серебро, алюминий, никель, и др. Ко второй группе относят материалы высокого сопротивления. Это, как правило, сплавы: константан, манганин, нихром и др. К третьей группе относят материалы, способные переходить при определенных критических температурах в сверхпроводящее состояние – сверхпроводники 1 и 2го рода: кадмий, цинк, тантал, свинец, сплав Nb_3Sn и др. В четвертую группу включим различные материалы, используемые в качестве термопар: медь-константан;

медь-копель; хромель-копель; хромель-алюмель; платина-платинородий. В пятую группу относят материалы, используемые в качестве контактных для сильноточной аппаратуры, слаботочной аппаратуры, размыкаемых высоковольтной к низковольтной аппаратуры, скользящих: серебро, медь, золото, вольфрам, графит, композиции: Cu-W, Cu-графит, Ag-W и др.

Ниже приводится справочная таблица 2. 2 некоторых проводниковых материалов, используемых в радиоэлектронике.

Таблица 2.2

Металл проводника	Химический индекс	Удельн. эл. сопротивление ρ мкОм·м или Ом·мм ² /м	Темпер. коэфф. удельного сопротивления ТК _р , 1/град	Коэфф. теплопроводности λ Вт/м·град	Термо-ЭДС относительно меди, мкВ/град	Работа выхода электрона из металла, W _{вых} , эВ	Температура плавления, T _{пл} , °С
1	2	3	4	5	6	7	8
Чистые металлы							
Серебро	Ag	0,016	$4 \cdot 10^{-3}$	425		4,4	961
Медь	Cu	0,0172	$4,3 \cdot 10^{-3}$	390		4,3	1083
Золото	Au	0,024	$3,8 \cdot 10^{-3}$	293		4,8	1063
Алюминий	Al	0,028	$4,2 \cdot 10^{-3}$	209		4,3	657
Индий	In	0,09	$4,7 \cdot 10^{-3}$	25		—	156
Олово	Sn	0,12	$4,4 \cdot 10^{-3}$	65		4,4	232
Свинец	Pb	0,21	$3,7 \cdot 10^{-3}$	35		3,7	327
Никель	Ni	0,073	$6,5 \cdot 10^{-3}$	95		5	1455
Железо	Fe	0,098	$6 \cdot 10^{-3}$	73		4,5	1535
Титан	Ti	0,42	$4,4 \cdot 10^{-3}$	15		4,1	1680
Платина	Pt	0,105	$3,9 \cdot 10^{-3}$	71		5,3	1773
Молибден	Mo	0,057	$4,6 \cdot 10^{-3}$	151		4,2	2620
Тантал	Ta	0,135	$3,8 \cdot 10^{-3}$	54		4,1	2970
Вольфрам	W	0,055	$4,6 \cdot 10^{-3}$	168		4,5	3380
Графит поликристалл	C	8	$-1 \cdot 10^{-3}$	—			
Графит	C	10...50	$-2 \cdot 10^{-4}$	—			
Сплавы							
Манганин	Cu – 86% Mn – 12%	0,42...0,48		$(5...30) \cdot 10^{-6}$	1...2		940
Константан	Cu – 60% Ni – 40%	0,48...0,52		$(5...20) \cdot 10^{-6}$	40...50		1270
Нихром	Ni – 60% Cr – 15%	1...1,2		$1,7 \cdot 10^{-4}$			1360
Фехраль	Cr – 15% Al – 5% остальн. Fe	1,3		$1,2 \cdot 10^{-4}$			1450

Хромаль	Cr – 23% Al – 5% остальн. Fe	1,5	$6,5 \cdot 10^{-5}$				
Нейзильбер		0,35	$3 \cdot 10^{-6}$				1050
Термопары							
Медь-константан				Тизм до 350 °С			
Хромель-алюмель				Тизм до 1000 °С			
Платина-платинородий				Тизм до 1600 °С			

ТЕМА 3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Это материалы, используемые для изоляции токоведущих частей друг от друга, для создания емкостей (конденсаторов) – накопителей заряда, изоляторов для других целей. Это самая обширная группа радиоматериалов.

Они могут быть: газообразными – воздух или другие газы; жидкими – все возможные масла, клеи, лаки; твердыми – керамика, пластмасса, стекло, смола и др., имея широкую запрещенную зону, $W_g \geq 3$ эВ, они относятся к неметаллам; обладают большим удельным электрическим сопротивлением ($10^3 \dots 10^{16}$ Ом·м).

По химическому составу диэлектрики разделяют на:

органические – смолы, пластмассы, слоистые пластики, воскообразные, лаки, ткани, фторпласты, эластомеры и др.;

неорганические – керамика, стекла, слюды, сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, фториды, оксиды и др.;

элементоорганические – смолы, пластмассы, эластомеры, масла, клеи и др.

Основные электрические процессы и явления, происходящие в диэлектриках, помещенных в электромагнитное поле, показаны на структурной схеме (рис. 3.1). Там же приводятся типы и виды этих процессов, характеризующиеся основными параметрами.

В электрическом поле в диэлектрике происходят следующие основные процессы:

- 1) поляризация, характеризующаяся относительной диэлектрической проницаемостью ϵ ;

- 2) электропроводность γ (объемная γ_v и поверхностная γ_s), характеризуемая удельным электрическим сопротивлением (объемная ρ_v и поверхностная ρ_s)

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}; \quad \gamma_s = \frac{1}{\rho_s}; \quad (3.1)$$

- 3) диэлектрические потери, характеризуемые тангенсом угла диэлектрических потерь – $\text{tg } \delta$;
- 4) пробой в электрическом поле, характеризуемый пробивной напряженностью $E_{\text{пр}}$.

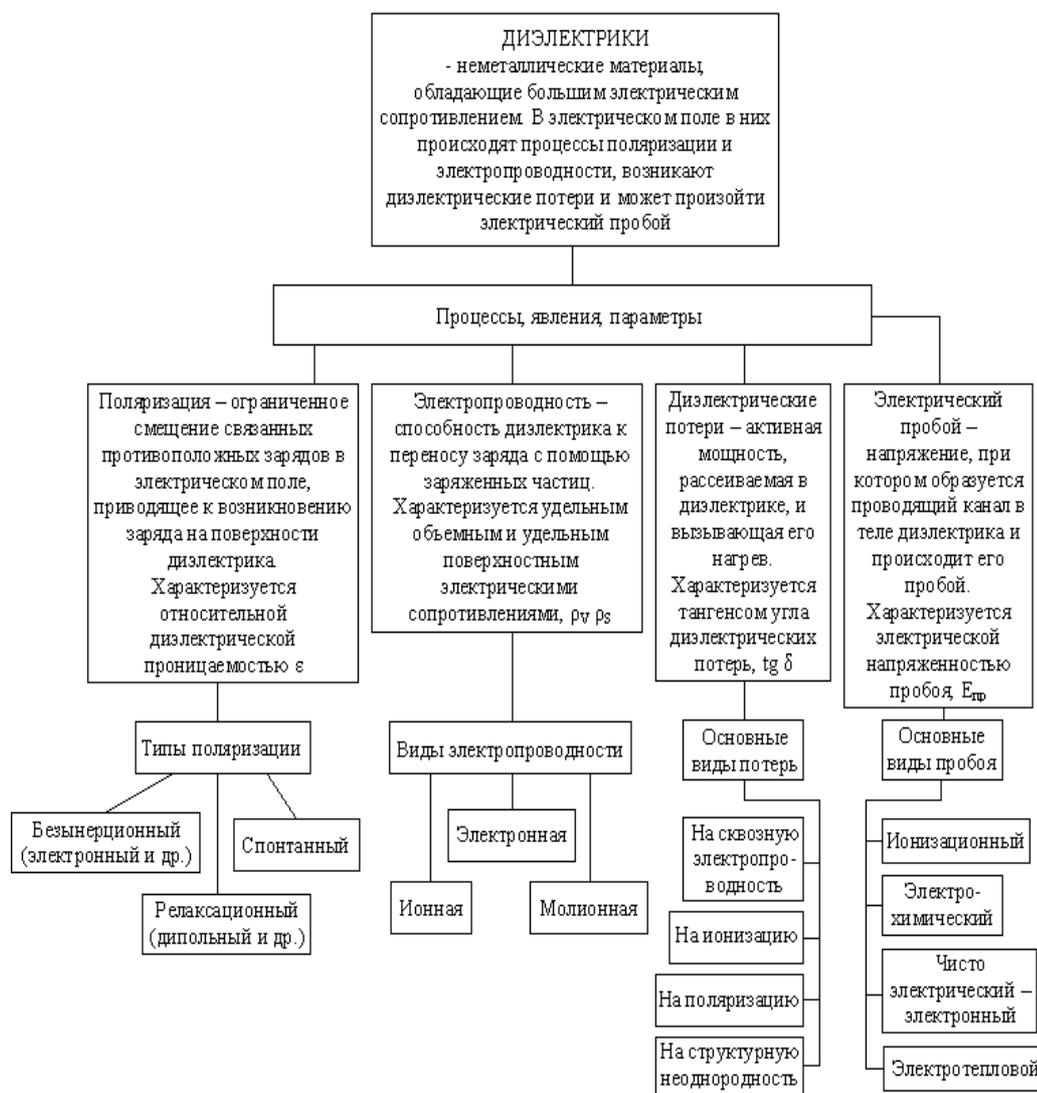


Рис. 3.1. Структурная схема диэлектриков

3.1. Поляризация диэлектриков

Поляризацией диэлектриков называется упорядоченное смещение связанных противоположных зарядов, находящихся в диэлектриках, происходящее под воздействием внешнего электрического поля. В результате

этого на противоположных поверхностях диэлектрика, перпендикулярных силовым линиям поля, возникает заряд.

Поляризация характеризуется величиной поляризованности диэлектрика P_D , которая является пределом отношения суммы электрических моментов всех связанных противоположных зарядов m_i , отнесенных к объему диэлектрика V , когда он стремится к нулю:

$$P_D = \lim \frac{\sum m_i}{V} \Big|_{V \rightarrow 0}. \quad (3.2)$$

С поляризованностью связана относительная диэлектрическая проницаемость ε , которая показывает во сколько раз емкость конденсатора с диэлектриком C_D больше емкости такого же конденсатора, если между ними его обкладками находится вакуум, C_0 :

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_0} = \frac{C_D'' + C_0}{C_0}, \text{ где } C_D'' + C_0 = C_D. \quad (3.3)$$

Из этого следует, что для вакуума $\varepsilon = 1$, а для любого другого диэлектрика $\varepsilon > 1$. Связь между ε , P_D и напряженностью приложенного электрического поля E определяется формулой:

$$\varepsilon = 1 + \frac{P_D}{E}. \quad (3.4)$$

Связь между величиной заряда на поверхности диэлектрика Q , его параметрами и приложенным электрическим полем U

$$Q = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} U, \text{ Кл}, \quad (3.5)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (диэлектрическая постоянная вакуума).

$$\text{Емкость диэлектрика} \quad C_D = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \text{ Ф}, \quad (3.6)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;
 S – площадь меньшего электрода, приложенного к диэлектрику, м²;
 d – толщина диэлектрика, м;

Таким образом заряд на диэлектрике (или конденсаторе) зависит от его емкости и приложенного к нему напряжения.

$$Q=C \cdot U, Кл \quad (3.7)$$

Абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна относительной, умноженной на диэлектрическую постоянную ϵ_0 вакуума

$$\epsilon_{абс} = \epsilon \cdot \epsilon_0. \quad (3.8)$$

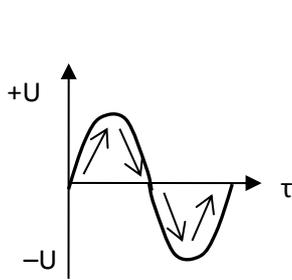
3. 1. 1. Виды поляризации

Так как в любом материале, а значит и в диэлектрике, имеется большое количество различных связанных между собой противоположных зарядов (электронов, протонов, ионов, диполей и т. п.), то существует много видов поляризации: дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, спонтанная, электронная, высоковольтная, резонансная и др.

Для сокращения сгруппируем все эти виды в три основных типа поляризаций:

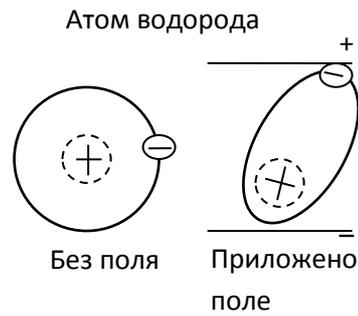
- а) электронный (безынерционный);
- б) дипольно-релаксационный (инерционный);
- в) спонтанный (самопроизвольный).

А. Электронный тип поляризации происходит мгновенно ($\tau \approx 10^{-13} \dots 10^{-15}$ с), упруго, без потерь и линейно. Если рассматривать поведение Q от величины U за один цикл измерения переменного поля рис. 5.2, для атома водорода рис. 5. 3, а, то это будет прямая, проходящая через начало координат рис. 5. 3, б.



a

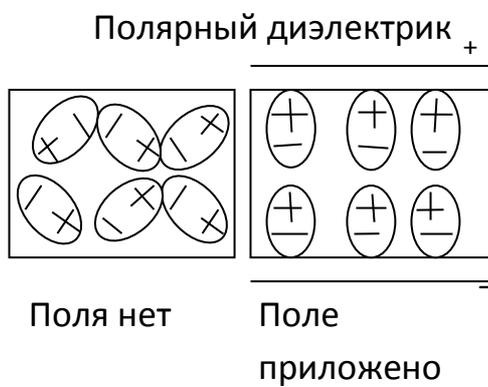
Рис. 3.2



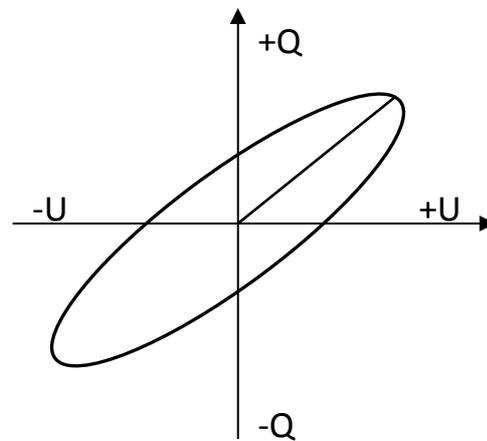
б

Рис. 3.3

Б. Дипольно-релаксационный тип поляризации связан с разворотом (смещением) диполей (молекул, ионов) рис. 3.4, *a*, и характерен для полярных диэлектриков. При этом поляризация происходит не мгновенно, с потерями, не упруго, но линейно. Зависимость $Q = f(U)$ представляет собой эллипс рис. 3. 4, *б*.



a)



б)

Рис. 3.4.

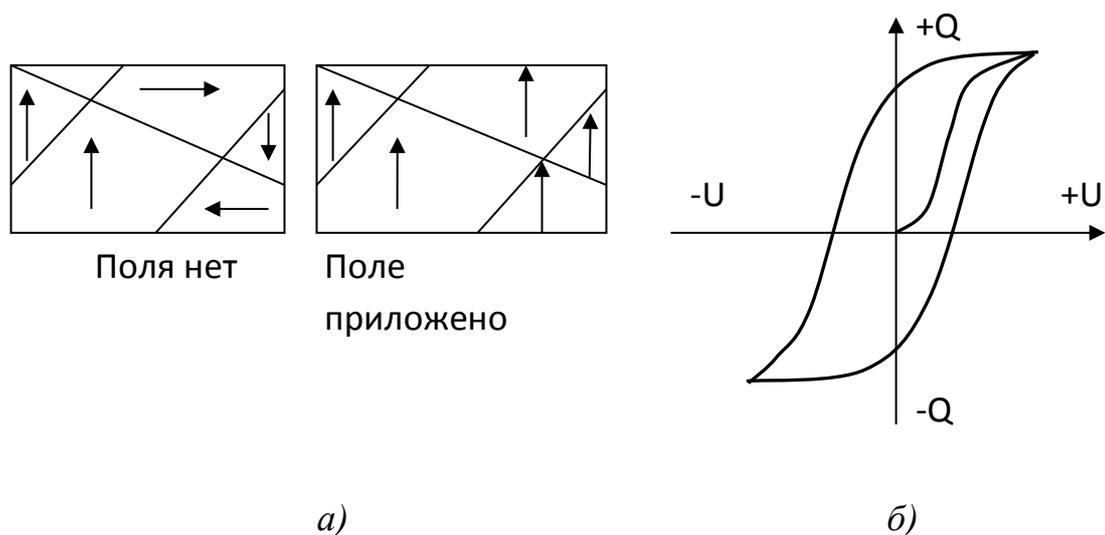


Рис. 3.5.

В. Спонтанный или самопроизвольный тип поляризации характерен для диэлектриков, имеющих доменную структуру, например, сегнетоэлектрики и нелинейно, т. е. имеет место явление насыщения, когда все моменты доменов развернутся по полю, рис. 3. 5, а.

Зависимость заряда на поверхности сегнетоэлектрика от приложенного напряжения представляет собой петлю гистерезиса, рис. 3. 5, б.

Все материалы, имеющие доменную структуру, обладают высокой проницаемостью в поле, нелинейностью, т. е. $\epsilon = f(U)$, петлей гистерезиса и имеет точку Кюри – температуру, выше которой начинается перекристаллизация и исчезновение доменной структуры.

Обычно реальные диэлектрики обладают несколькими видами поляризации, но преобладающим является какой-то один из трех вышеперечисленных типов.

Нейтральным диэлектриком свойственен электронный тип поляризации. При этом диэлектрическая проницаемость их мала: например, у фторопласта-4 $\epsilon = 2,5$, у парафина $\epsilon = 2,2$.

Полярным ионным диэлектрикам свойственен дипольно-релаксационный тип поляризации, относительная диэлектрическая проницаемость их больше, чем у нейтральных: например, у гетинакса $\epsilon = 6 \dots 8$, у полихлорвинила $\epsilon = 5 \dots 7$, у слюды $\epsilon = 6 \dots 7$.

Сегнетоэлектрикам свойственен спонтанный тип поляризации, их относительная диэлектрическая проницаемость велика: сегнетова соль имеет $\epsilon = 3000 \dots 6000$, титанат бария $\epsilon = 1700 \dots 3500$.

3. 1. 2. Влияние различных факторов на поляризуемость диэлектрика

Поляризуемость диэлектрика изменяется от многих факторов: температуры, частоты поля и др. Зависимости ϵ от температуры и частоты поля для полярных диэлектриков показаны на рис. 3. 6 и 3. 7.

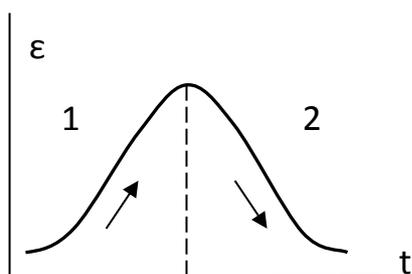


Рис. 3.6

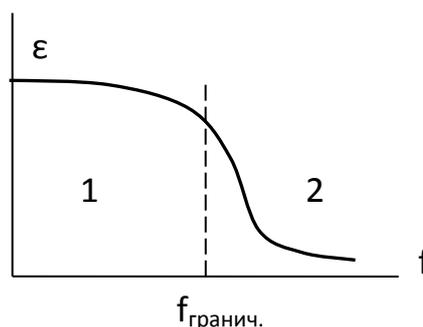


Рис. 3.7

Когда на участке 1 (рис. 3.6) повышается температура, происходит ослабление сил связи между молекулами (ионами) и поляризуемость увеличивается; на участке 2, при уже значительном тепловом движении, поляризуемость уменьшается, т. к. хаотическое движение мешает направленному, вызываемому полем.

На рис. 3.7 показано поведение диэлектрической проницаемости в зависимости от изменения частоты поля. На участке 1 диполи (молекулы, ионы) успевают следовать за полем (переполаризовываться) и ϵ не меняется. На участке 2, после граничной частоты, ϵ уменьшается за счет того, что диполи не успевают следовать за полем, их поляризация не мгновенная.

Явление поляризации в диэлектриках процесс объемный, т. е. смещение связанных противоположных зарядов происходит во всем объеме материала. Однако внешне это явление проявляется в виде накапливания заряда на поверхности диэлектрика. Так как диэлектрики обладают большим диэлектрическим сопротивлением по сравнению, например, с проводниками, то

в них может накапливаться электрическая энергия, создаваться значительное электрическое поле.

Это свойство диэлектриков используется в электрических конденсаторах и других устройствах, например, в электретах.

3. 1. 3. Электретный эффект

Если, например, полярный диэлектрик поместить в электрическое постоянное поле и одновременно нагреть, то диполи максимально развернутся вдоль силовых линий поля. Если затем в поле охладить диэлектрик до комнатной температуры, то на его поверхности после снятия поля может довольно длительно сохраняться электрический заряд рис. 3. 8.

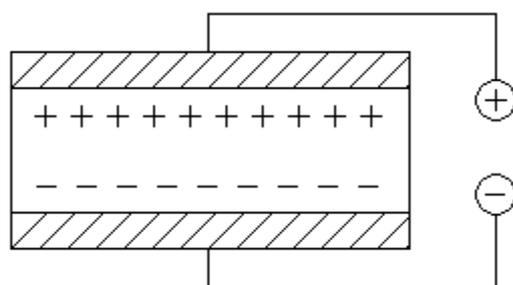


Рис. 3.8.

Такой диэлектрик называется электретом и может служить источником статического электричества.

3. 2. Электропроводность диэлектриков

Электропроводность материала – это способность пропускать через себя электрический ток за счет свободных или почти свободных заряженных частиц. Электропроводность определяется электрическим сопротивлением (ρ) и является его обратной величиной. В твердых диэлектриках ток может проходить как по их объему, так и по поверхности, поэтому различают удельную объемную проводимость γ_v и удельную поверхностную проводимость γ_s , а следовательно объемное удельное сопротивление ρ_v и поверхностное удельное сопротивление ρ_s , причем их соотношения:

$$\rho_v = \frac{1}{\gamma_v}; \quad \rho_s = \frac{1}{\gamma_s} . \quad (3.9)$$

За удельное объемное сопротивление материала принимается сопротивление (R_V) куба этого материала со стороной, равной метру, когда к противоположным граням его приложено напряжение (рис. 3. 9)

$$\rho_V = R_V \frac{S}{l}, \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (3. 10)$$

где S – площадь электрода, к которому приложено напряжение; l – расстояние между электродами.

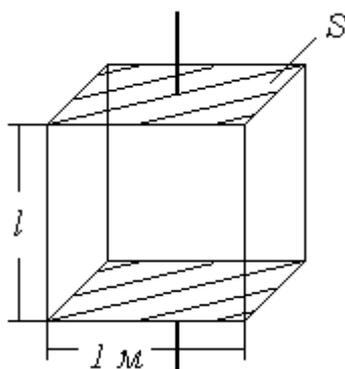


Рис. 3.9.

За удельное поверхностное сопротивление диэлектрика принимается сопротивление (R_S) квадрата его поверхности с любой стороной, когда к противоположным сторонам его приложено напряжение (рис. 3. 10)

$$\rho_S = R_S \frac{b}{l}, \text{ Ом}, \quad (3. 11)$$

где b – длина одного электрода, соприкасающегося с поверхностью; l – расстояние между электродами.

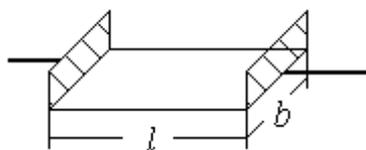


Рис. 3.10.

Полное сопротивление диэлектрика складывается из его объемного и поверхностного сопротивлений, соединенных параллельно

$$R = \frac{R_V \cdot R_S}{R_V + R_S}, \text{ Ом}. \quad (3. 12)$$

Рассмотрим электропроводность как количество заряженных частиц, способных к перемещению. Для любого материала, к которому приложено электрическое напряжение, удельная электропроводность зависит от наличия заряженных частиц (электронов, ионов), от их количества, от их способности к перемещению, т. е. подвижности.

Обозначим заряд частицы через q , Кл; количество заряженных частиц, приходящихся на 1 м³, через N , 1/м³; подвижность частиц - u через их скорость v , м/с, а поле, напряженностью 1 В/м, т.е. $u = \frac{v}{E}$, тогда получим формулу для электропроводности:

$$\gamma = q \cdot N \cdot u. \quad (3.13)$$

Подставим единицы измерения для каждого члена формулы:

$$\gamma \Rightarrow \text{Кл} \cdot \frac{1}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м/с}}{\text{В/м}} \Rightarrow \frac{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}} \Rightarrow \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}. \quad (3.14)$$

Для диэлектриков удельное сопротивление очень велико ($\rho \approx 10^3 \dots 10^{16}$ Ом·м), и электропроводность, а следовательно и токи утечки — малы. Поэтому диэлектрики служат для изоляции, для накопления заряда (конденсаторы) и для других подобных целей.

Различают несколько видов электропроводности в зависимости, от вида заряженных частиц, осуществляющих её:

- а) электронная – носители электроны;
- б) ионная (или электролитическая) – носители ионы;
- в) молионная (или электрофоретическая) – носители группы молекул;
- г) смешанная – носители разные (электроны, ионы, молионы).

Рассмотрим энергетическую диаграмму диэлектриков, чтобы проследить какие внешние воздействия влияют на электропроводность (рис. 3. 11).



Рис. 3. 11

Внизу находится валентная зона (ВЗ), заполненная валентными электронами, выше расположена зона запрещенных энергий, где нет энергетических уровней (ЗЗ), её величина - W_g (в эВ); вверху находится зона проводимости (ЗП). Если в эту зону попадает электрон, он становится свободным и может участвовать в переносе заряда.

Ширина запрещенной зоны у диэлектриков велика, т.е. $W_g \geq 3$ эВ, поэтому диэлектрики имеют большое сопротивление. Если же диэлектрик имеет в своем составе легкопроводящие примеси (ионы), то сопротивление за их счет снижается, возрастают токи утечки. Когда диэлектрик нагревается, возможность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости возрастает, увеличивается диссоциация ионов, несколько растет и подвижность заряженных частиц. Поэтому электропроводность, увеличивается, это увеличение идет по закону экспоненты (рис. 3. 12) Формула для электропроводности при температуре T :

$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{kT}}, \quad (3. 15)$$

где A – постоянная для данного диэлектрика, Ом^{-1} ;

e – основание натурального логарифма: ,

k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град;

T - абсолютная температура, К;

W_t - термическая энергия активации, эВ.

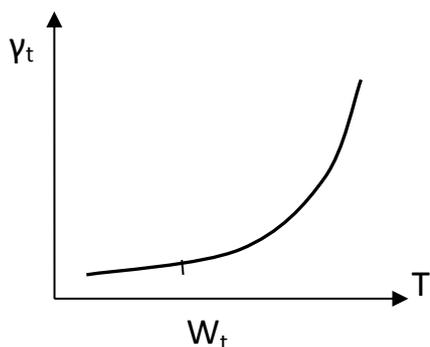


Рис.3. 12

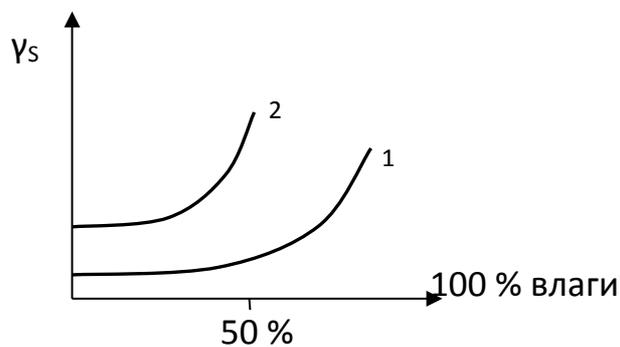


Рис. 3. 13

Поверхностная электропроводность γ_s сильно зависит от влажности и от способности диэлектрика смачиваться или не смачиваться влагой. Гидрофобные диэлектрики (несмачивающиеся) слабо изменяют γ_s от влажности среды, а гидрофильные (смачиваемые) довольно сильно. На рис. 3.13 приведены зависимости γ_s от процентного содержания влаги в окружающей среде для фторопласта -4 (1) – гидрофобного, и плавленного кварца (2) – гидрофильного.

В слабом электрическом поле для диэлектриков соблюдается закон Ома, т.е. их электропроводность постоянна (γ_0). Но в сильных полях ($> 10^6$ В/м) перестает действовать закон Ома и действует (рис. 3.14) закон Пуля (зависимость построена в полулогарифмическом натуральном масштабе)

$$\gamma_E = \gamma_0 e^{\alpha E}, \quad (3. 16)$$

где γ_0 – электропроводность в слабом поле;

α – коэффициент материала (обычно $1 < \alpha < 2$);

E – напряженность в области сильных полей.

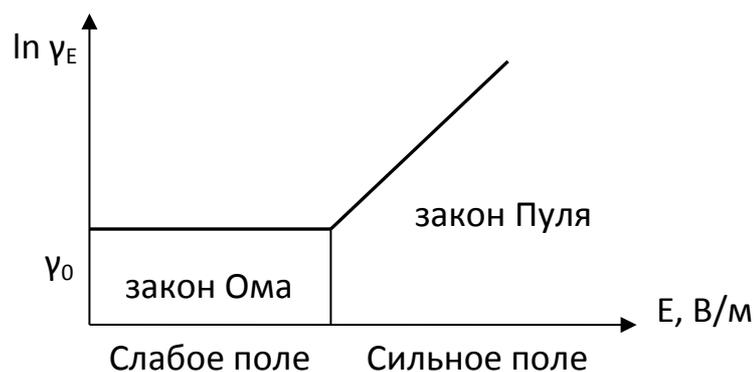


Рис. 3. 14

Обычно в справочных таблицах приводится два удельных сопротивления диэлектрика – объёмное ρ_v и поверхностное ρ_s .

Для газов ρ – велико, но при достижении поля выше ионизационного потенциала сопротивление резко падает. Воздух имеет $\rho \approx 10^{16}$ Ом·м при нормальных условиях.

Сопротивление жидкостей зависит от присутствия в них примесей, воды. Чистое трансформаторное масло имеет – $\rho \approx 10^{12} \dots 10^{13}$ Ом·м; вода (дистиллированная) — $\rho \approx 10^4 \dots 10^5$ Ом·м (вода сильно полярный диэлектрик). Твердые нейтральные диэлектрики, например, полистирол имеет $\rho \approx 10^{14} \dots 10^{16}$ Ом·м; полярные – оргстекло, винипласт $\rho \approx 10^{12} \dots 10^{13}$ Ом·м.

3.3. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называется активная мощность P_a , рассеиваемая в диэлектрике при приложении к нему электрического напряжения и вызывающая его нагрев,

$$P_a = UI - \text{в постоянном электрическом поле}; \quad (3. 17)$$

$$P_a = UI \cos\varphi - \text{в переменном электрическом поле}, \quad (3. 18)$$

где P_a – активная мощность – диэлектрические потери, Вт;

U – приложенное напряжение, В;

I – протекающий ток, А;

φ – угол сдвига фаз между током и напряжением.

Различают следующие виды потерь:

- а) потери на замедленные виды поляризации;
- б) потери на сквозную электропроводность (токи утечки);
- в) потери на ионизацию (в газообразных или твердых пористых диэлектриках);
- г) потери на структурную неоднородность (в неоднородных диэлектриках).

Идеальный диэлектрик, который совсем не проводит ток, может быть представлен в постоянном поле как разрыв в электрической цепи, а в переменном — как чистая емкость. Схема замещения такого диэлектрика представлена на рис. 3. 15; рядом векторная диаграмма тока и напряжения для неё; вектор тока на емкости опережает вектор напряжения на 90° (опережение — против часовой стрелки)

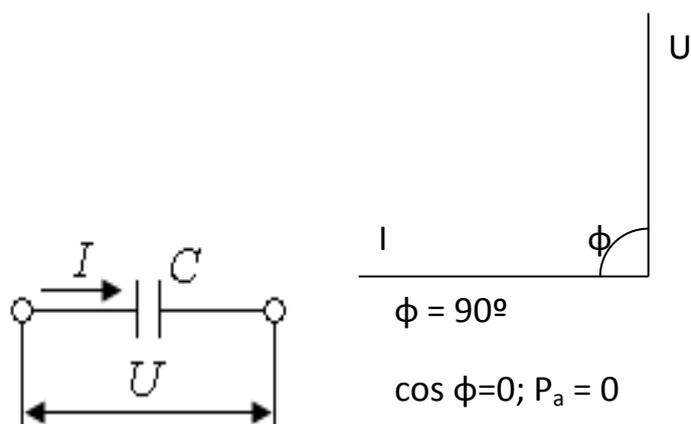


Рис. 3. 15

В таком идеальном диэлектрике диэлектрические потери отсутствуют. Однако реальный диэлектрик всегда имеет токи утечки, которые можно представить активным сопротивлением R . Схема замещения такого диэлектрика представлена, на рис. 3. 16. Рядом векторная диаграмма U и I ; вектор тока на активном сопротивлении совпадает с вектором напряжения, а полный ток I является суммой векторов I_c и I_a .

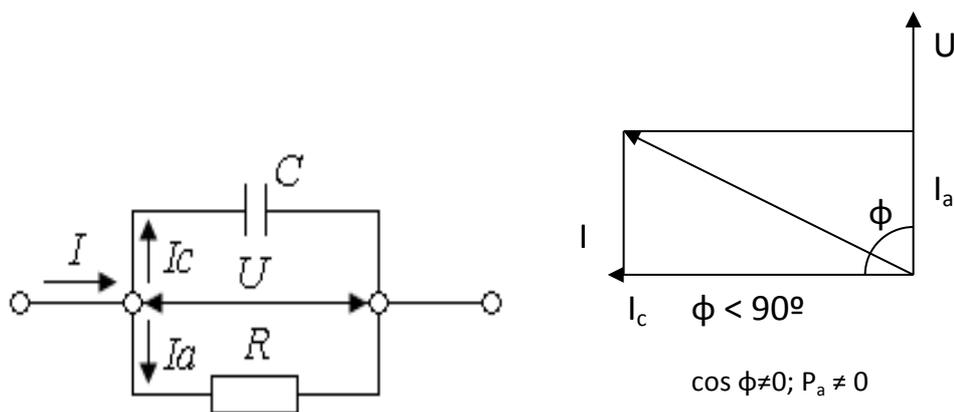


Рис. 3. 16

Угол δ дополняет угол сдвига фаз между током и напряжением (ϕ) до 90° и называется *углом диэлектрических потерь*. Как видим, чем меньше сопротивление диэлектрика, тем будет больше ток I , и тем больше будет угол δ — угол диэлектрических потерь. Для характеристики потерь пользуются **tg** угла потерь, чтобы избавиться от размерности угла (градус, минут).

Из векторной диаграммы тока и напряжения определяем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}, \quad (3. 19)$$

где ω – круговая частота поля $\omega = 2\pi f$, где f – линейная частота;

C – емкость диэлектрика

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \Phi \quad (3. 20)$$

R – его активное сопротивление.

Подставив значение тока (I) через $\operatorname{tg} \delta$ в формулу диэлектрических потерь, получим выражение для P_a :

$$P_a = UI_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \text{ Вт.} \quad (3. 21)$$

Эта мощность (P_a) характеризует диэлектрические потери при определенных напряжении, частоте и габаритах изделия. В справочнике приводится $\operatorname{tg} \delta$, который характеризует потери в материале, независимо от других факторов (кроме частоты электрического поля).

Зависимость диэлектрических потерь от различных факторов отражает зависимости величин, входящих в формулу потерь, от этих факторов.

Например, C зависит от ϵ , а ϵ от температуры и частоты. То же самое можно сказать и о электропроводности, ионизации и др.

Посмотрим поведение полярного диэлектрика при изменении температуры; будем рассматривать величины ϵ , γ , $\text{tg}\delta$ и P_a в функции T (рис. 3. 17). На рис. 3. 17 показана зависимость этих же параметров от частоты переменного поля.

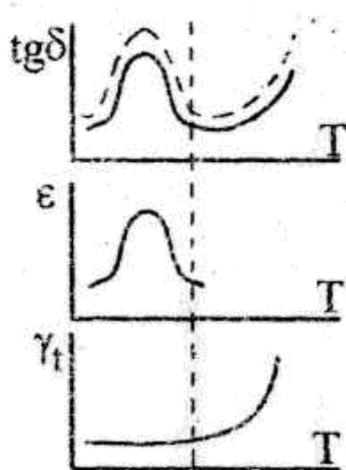


Рис. 3. 17

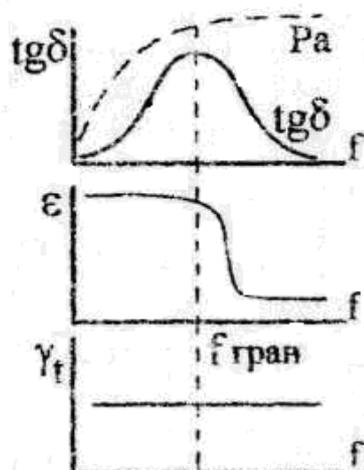


Рис. 3. 18

Особенности поведения каждого компонента сказываются на поведении $\text{tg}\delta$ и P_a .

Если диэлектрик неоднородный, в нем проявляются особенности каждого входящего в него компонента. В качестве примера рассмотрим поведение $\text{tg}\delta$ от T для картона (это полярный диэлектрик на основе целлюлозы), пропитанного полярной жидкостью (маслом).

У целлюлозы максимальные потери наблюдаются при отрицательных температурах, а у масла при положительных. Это отражается на зависимости $\text{tg}\delta$ от T (рис. 3.19).

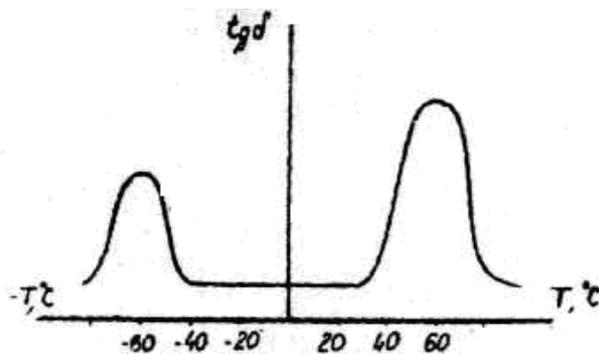


Рис. 3. 19

Величина $\text{tg}\delta$ приводится в справочных таблицах и характеризует потери в материале. Для полярных диэлектриков значения $\text{tg}\delta$ лежат в диапазоне десятых или сотых долей единиц, для нейтральных меньше, — тысячных или десятитысячных долей единиц.

Для газов, например воздуха, при напряжениях ниже ионизации, потери малы $\text{tg}\delta \sim 10^{-7}$, но как только напряжение превысит ионизационный потенциал, потери быстро растут.

Примеры $\text{tg}\delta$ для конкретных изоляционных материалов и их использование; полиуретан (полярный) — $\text{tg}\delta \approx 0,02$ - изоляционные платы, каркасы катушек, панели;

винипласт (полярный) — $\text{tg}\delta \approx 0,01$ - изоляционные пленки;

полистирол (нейтральный) — $\text{tg}\delta \approx 0,0001$ - материал для конденсаторов и изоляции;

фторопласт-4 (нейтральный) — $\text{tg}\delta \approx 0,0002$ - изоляционные платы;

керамика КМ-1 — $\text{tg}\delta \approx 0,002$ - платы для микросхем.

3. 4. Пробой диэлектриков

Диэлектрик в электрическом поле теряет свои свойства электроляционного материала, если напряженность поля, превысит некоторое критическое значение. Это явление называется *пробоем диэлектрика* или нарушением его электрической прочности. Минимальное напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называется *пробивным напряжением* — $U_{\text{пр}}$, а соответствующее ему значение напряженности поля — $E_{\text{пр}}$ — электрической прочностью диэлектрика,

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}, B/m, \quad (3.22)$$

где d – толщина диэлектрика, м.

Электрическая прочность E_{np} является одним из важнейших параметров электроизоляционного материала. На её значение влияет множество факторов: однородность поля, вид напряжения, время нахождения диэлектрика под напряжением, частота поля, температура, влажность диэлектрика, его чистота, нагревостойкость и др. Явления, имеющие место в диэлектрике при и после пробоя, определяются видом материала. Так в газах, в месте пробоя, образуется канал газоразрядной плазмы, в жидкостях происходит вскипание и газовыделение, сопутствующие образованию проводящего канала, а в твердых диэлектриках в месте пробоя остаётся прожженное или проплавленное отверстие, нередко покрытое изнутри проводящими продуктами разложения.

Для газообразных, жидких и твердых диэлектриков различают несколько видов пробоя.

1. Ионизационной, связанный с ударной и фотоионизацией. Он характерен для газообразных и очень чистых жидких диэлектриков. Развивается мгновенно ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с). После снятия напряжения прочность таких диэлектриков восстанавливается.
2. Чисто электрический – за счет возникающей лавины электронов. Он характерен для беспримесных твердых однородных и неоднородных материалов с малыми диэлектрическими потерями. Развивается мгновенно ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ с), когда скорость электронов $v \geq 100$ км/с.
3. Электрохимический пробой. Он связан с возникновением химических процессов в диэлектрике (жидком или твердом) под действием электрического поля – химическое разложение, электролиз и т.п. Развивается медленно (минуты, часы, дни и более).
4. Электротепловой пробой. Наблюдается в твердых (или жидких) диэлектриках. Обусловлен нарушением теплового равновесия вследствие больших диэлектрических потерь и недостаточности теплоотдачи.

5. Поверхностный пробой. Это пробой в газообразном или жидком диэлектрике прилегающем к поверхности, твердой изоляции. Он связан с появлением короны, искры, проводящего канала по поверхности.

3. 5 Классификация диэлектрических материалов

Обычно диэлектрики классифицируются по:

- 1) агрегатному состоянию – газы, жидкости, твердые вещества;
- 2) химическому составу – органические, неорганические и элементоорганические;
- 3) характерным группам каждого из химического состава:

органические:

- а) воскообразные,
- б) смолы и пластмассы,
- в) битумы и компаунды,
- г) лаки и клеи,
- д) лакоткани,
- е) слоистые пластики,
- ж) эластомеры,
- з) фторорганические диэлектрики.

неорганические:

- а) стекла, ситаллы и эмали,
- б) керамика,
- в) слюда и материалы на её основе,
- г) сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики,
- д) оксидная и фторидная изоляции,
- е) асбест.

Таблица 3. 2

Агрегатное состояние	Наименование материалов (диэлектриков)	Диэлектрическая проницаемость, относительная	Удельное объемное сопротивление ρ_V , Ом·м	Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$	Прочность (электрическая) $E_{пр}$, МВ/м	Удельная теплопроводность λ , Вт/м·°К	Допустимая рабочая температура (max), °С

		Е					
1	2	3	4	5	6	7	8
Газы	Воздух Элегаз (SF ₆)	1,00058 1,002	10 ¹⁶ 10 ¹⁵	4·10 ⁻⁷ 10 ⁻⁵	3,2 8	0,07...0,6 –	– 800
Жидкости	Масло трансформаторное Совтол	2,3	10 ¹¹ ...10 ¹³	(2...5)·10 ⁻³	20...35	0,2	95
		4,7	10 ⁸ ...10 ¹¹	0,1	15...20	–	–
Твердые материалы	Органические а) Парафин Головакс б) Смола бакелитовая Канифоль Поливинил - хлорид Полистирол Полиэтилен Полиметил - метакрилат Смола эпоксидная в) Битум Компаунд КЭЦ г) Фенолпласт (ФАС) Клей БФ-4 Лак ФЛ-98 д) Лако-ткань х/б (с) е) Гетинакс А Текстолит (А) Бумага кабельная Электрокартон (ЭВТ) ж) Каучук бутадиеновый	2,2	10 ¹⁴	0,0005	20...25	0,2	≤ 50
		5	10 ¹¹	0,003	10	–	100
		4,5	10 ¹⁰	0,03	10...40	–	150
		2,5...3	10 ¹³	0,04	10...15	–	65
		3...5	10 ¹³	0,01...0,08	15...20	0,09	65
		2,5	10 ¹⁶	0,0005	20...35	0,9	80
		2,3	10 ¹⁴ ...10 ¹⁶	0,0003	35...60	0,29	90
		4	10 ⁹ ...10 ¹¹	5·10 ⁻²	20...35	0,15	–
		3,5	10 ¹¹ ...10 ¹³	0,01...0,08	20...80	0,2	115
		3	10 ¹²	0,02	5...15	0,07..0,6	18...90
		4...7	10 ¹²	0,007	20	0,07...0,6	90
		7	10 ¹⁰	0,02	13	–	300
		5	10 ¹²	0,02			90
		5...7	10 ¹³	0,03	95	–	–
		8	10 ⁹	0,08	20	0,13	105
		8	10 ⁹	0,05...0,2	24	0,2...0,35	150
		7	10 ⁸	0,06	6...10	0,17	105
		3,5	10 ¹¹	0,035	5...10	0,13	90
		2,5	10 ⁷	0,05	8...90	0,17	90
		2,5...5	10 ¹²	0,025	35	–	–

Резина изоляц. Эбонит	2,5...5 3...3,5	10^{13} 10^{13}	0,01...0,03 0,018	20...30 12...24	– 0,018	60 50
з) Фторо- пласт-4 фторо- пласт-3	2 3	$10^{16} \dots 10^{14}$ 10^{16}	0,003 0,01	25...40 15	0,25 0,06	> 180 –
Неоргани- ческие а) Стекла электротех.	4...16	$10^6 \dots 10^{15}$	0,002...0,01	10...200	0,01	500
б) Стеатит (керам.) фарфор электротех.	6 6,5	$10^7 \dots 10^{11}$ $10^{12} \dots 10^{13}$	0,003 0,035	20...40 20...30	2,2 1,6	1000 1000
в) Слюда мусковит Микалекс	7 8	$10^{11} \dots 10^{14}$ 10^{11}	0,015 0,025	50...100 10...100	0,36 –	500 300
г) Сегнето- керамика ВК-1 Пьезокварц	1700... 6000 4	10^8 10^{14}	0,18 0,0003	2,5 2,5	– –	1000 200
д) Фторид- ная изоляция (AlF_3)	4	10^{11}	~ 0,02	~ 200... 400	–	1000
е) Асбест		10^{10}	–	~ 2	0,18	450
Элемнто- рган. а) Кремний орг. смола	4,5	$10^{12} \dots 10^{13}$	0,01...0,03	15...25	0,09	180
б) Кремний рган. каучук	3,2	10^{13}	0,0005	32		

ТЕМА 4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Все вещества в природе взаимодействуют с внешним магнитным полем, но каждое вещество по-разному.

Магнитные свойства веществ зависят от магнитных свойств элементарных частиц, структуры атомов и молекул, а также их групп, но основное определяющее влияние оказывают электроны, их магнитные моменты.

Все вещества, по отношению к магнитному полю, поведению в нем, разделяются на следующие группы:

Диаммагнетики – материалы, не имеющие постоянного магнитного дипольного момента, обладающие относительной магнитной проницаемостью ($\mu \leq 1$) чуть меньше единицы. Относительная диэлектрическая проницаемость μ диаммагнетиков почти не зависит от величины магнитного поля (H) и не зависит от температуры. К ним относятся: инертные газы (Ne, Ar, Kr, Xe), водород (H₂); медь (Cu), цинк (Zn), серебро (Ag), золото (Au), сурьма (Sb) и др.

Парамагнетики – материалы, имеющие постоянные дипольные моменты, но расположены они беспорядочно, поэтому взаимодействие между ними очень слабое. Относительная магнитная проницаемость парамагнетиков чуть больше единицы ($\mu \geq 1$), слабо зависит от напряженности магнитного поля и от температуры.

К парамагнетикам относятся следующие материалы: кислород (O₂), алюминий (Al), платина (Pt), щелочные металлы, соли железа, никеля, кобальта и др.

Ферромагнетики – материалы, имеющие постоянные магнитные дипольные моменты, доменную структуру. В каждом домене они параллельны друг другу и одинаково направлены, поэтому взаимодействие между ними очень сильное. Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков велика ($\mu \gg 1$), у некоторых сплавов достигает до 1500000. зависит от напряженности магнитного поля и от температуры.

К ним относятся: железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co), многие сплавы, редкоземельные элементы: самарий (Sm), гадолиний (Gd) и др.

Антиферромагнетики – материалы, имеющие постоянные дипольные магнитные моменты, которые расположены антипараллельно друг другу. Относительная магнитная проницаемость их чуть больше единицы ($\mu \geq 1$), очень слабо зависит от напряженности магнитного поля и от температуры. К ним относятся: окиси кобальта (CoO), марганца (MnO), фтористый никель (NiF₂) и др.

Ферримагнетики – материалы, обладающие антипараллельными постоянными дипольными магнитными моментами, которые не полностью компенсируют друг друга. Чем меньше такая компенсация, тем выше их

ферромагнитные свойства. Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков может быть близка к единице (при почти полной компенсации моментов), а может достигать до десятков тысяч (при малой компенсации).

К ферромагнетикам относятся ферриты, их можно назвать оксиферрами, так как они представляют собой, окислы двухвалентных металлов с Fe_2O_3 . Общая формула феррита $[\text{MeO Fe}_2\text{O}_3]$, где Me – двухвалентный металл.

Магнитная проницаемость ферритов зависит от температуры и напряженности магнитного поля, но в меньшей степени, чем у ферромагнетиков.

Ферриты представляют собой керамические ферромагнитные материалы с малой электропроводностью, вследствие чего могут быть отнесены к электронным полупроводникам с высокой магнитной ($\mu \approx 10^4$) и высокой диэлектрической ($\epsilon \approx 10^3$) проницаемостями.

Диа-, пара- и антиферромагнетики можно объединить в группу слабомагнитных веществ, а ферро- и ферромагнетики – в группу сильномагнитных веществ.

Для технического применения в области радиоэлектроники наибольший интерес представляют сильномагнитные вещества.



Рис. 4.1. Структурная схема магнитных материалов

4. 1. Природа ферромагнетизма

Магнитные свойства материалов определяются внутренними скрытыми формами движения электрических зарядов, представляющими собой элементарные круговые токи. Круговой ток характеризуется магнитным моментом и может быть заменен эквивалентным магнитным диполем. Магнитные диполи образуются, в основном, спиновым вращением электронов, орбитальное же вращение электронов принимает в этом процессе слабое участие, так же как и ядерное вращение.

У большинства материалов спиновые моменты электронов компенсируют друг друга. Поэтому ферромагнетизм наблюдается далеко не у всех веществ таблицы Менделеева.

Условия, которые необходимы, чтобы материал был ферромагнитным:

1. Существование элементарных круговых токов в атомах.
2. Наличие некомпенсированных спиновых моментов, электронов.

3. Соотношение между диаметром электронной орбиты (D), имеющей нескомпенсированный спиновый момент, и постоянной кристаллической решетки вещества (a) должно быть

$$2,8 \geq \frac{a}{D} \geq 1,6. \quad (4.1)$$

4. Наличие доменной структуры, т.е. таких кристаллических областей, в которых дипольные магнитные моменты оказываются параллельно ориентированы.

5. Температура материала (вещества) должна быть ниже точки Кюри, так как при более высокой температуре происходит исчезновение доменной структуры, материал переходит из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

4. 2. Основные характеристики ферромагнетиков

Характерным свойством ферромагнитного состояния вещества является наличие спонтанной намагниченности без приложения внешнего магнитного поля. Однако магнитный поток такого тела будет равен нулю, так как направление магнитных моментов отдельных доменов различно (доменная структура с замкнутой магнитной цепью).

Степень намагничивания вещества характеризуют величиной намагниченности, или интенсивности намагничивания (J), которая определяется как предел отношения результирующего магнитного момента Σm , отнесенного к объему вещества (V), когда, объем стремится к нулю

$$J = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Sigma m}{V}. \quad (4.2)$$

Если поместить вещество во внешнее магнитное поле с напряженностью H , то соотношение между J и H будет

$$J = 4\pi\chi H, \quad (4.3)$$

где χ (каппа) называется магнитной вязкостью.

Относительная магнитная проницаемость μ зависит от χ :

$$\mu = 1 + 4\pi\chi. \quad (4.4)$$

Интенсивность, намагничивания можно определить, зная μ

$$\mu = 1 + \frac{J}{H}. \quad (4.5)$$

В общем, магнитное поле в ферромагнетике создается как сумма двух составляющих: внешней, создаваемой напряженностью внешнего магнитного поля H , и внутренней, создаваемой намагниченностью (J).

Суммарное магнитное поле характеризуется магнитной индукцией B :

$$B = \mu_0(H + J), \quad (4.6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума)

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Г/м}. \quad (4.7)$$

Выражая значение J через χ , а затем и μ , получим:

$$B = \mu_0 H(1 + 4\pi\chi) \text{ или } B = \mu_0 \mu H. \quad (4.8)$$

Абсолютная величина магнитной проницаемости

$$\mu_{\text{абс}} = \mu_0 \cdot \mu. \quad (4.9)$$

Окончательная формула для магнитной индукции B

$$B = \mu_{\text{абс}} H. \quad (4.10)$$

Процесс намагничивания ферромагнитного материала под влиянием внешнего магнитного поля заключается в следующем:

- рост доменов, магнитные моменты которых близки по направлению с внешним полем, и уменьшением других доменов;
- ориентация магнитных моментов всех доменов в направлении внешнего поля.

Процесс намагничивания характеризуется для каждого ферромагнетика своей основной кривой намагничивания $B = f(H)$.

Магнитная проницаемость μ в процессе намагничивания тоже изменяется. Это показано на рис. 4.2.

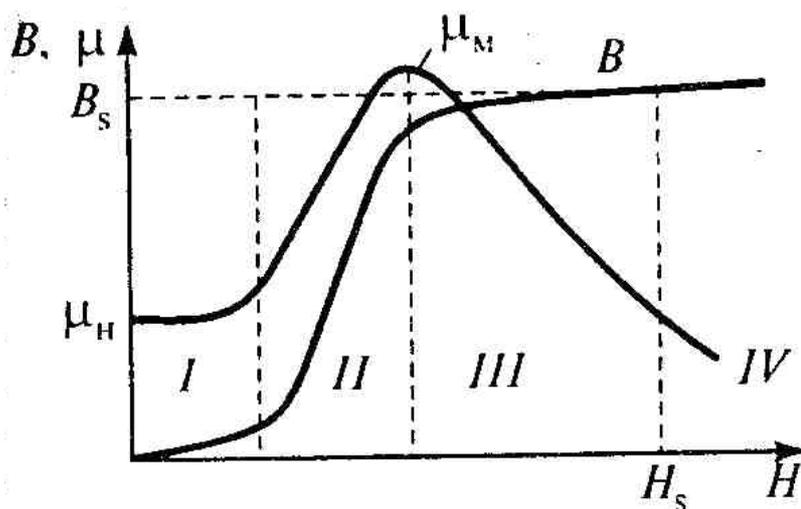


Рис. 4.2. Кривые намагниченности ($B = f(H)$) и магнитной проницаемости ($\mu = f(H)$)

Магнитная проницаемость μ при напряженности H , близкой к нулю, называется начальной (участок 1), а при переходе материала к насыщению она будет принимать максимальное значение (2), с дальнейшим увеличением H магнитная проницаемость μ – уменьшается (участки 3 и 4).

При циклическом намагничивании ферромагнетика кривые намагничивания и размагничивания образуют петлю гистерезиса. Петлю гистерезиса, полученную при условии насыщения материала, называют предельной. По петле гистерезиса, полученной, например, на экране осциллографа можно получить довольно полную информацию об основных магнитных параметрах материала (рис. 4.3).

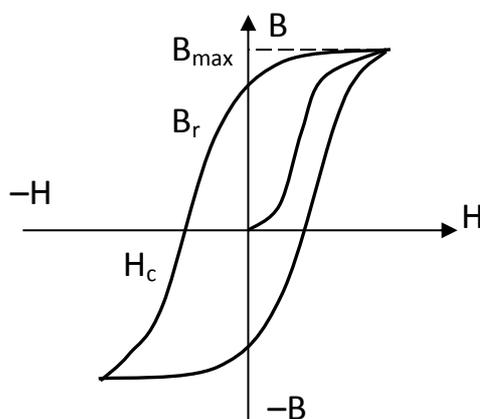


Рис. 4.3. Петля гистерезиса

Основными параметрами являются:

- 1) остаточная индукция, после снятия напряженности поля – B_r ;
- 2) коэрцитивная сила H_c – напряженность, которую нужно приложить к образцу, чтобы снять остаточную индукцию;
- 3) максимальная индукция B_{max} , которая достигается при полном насыщении образца;
- 4) удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания, которые характеризуются площадью, охватываемой петлей гистерезиса.

Остальные магнитные параметры материала, а также потери на перемагничивание (гистерезис), на вихревые токи, энергию в зазоре (для постоянного магнита) можно рассчитать по формулам, которые были приведены выше и будут приведены в дальнейшем.

4. 3. Потери в ферромагнитных материалах

Затраты энергии, которые идут на перемагничивание ферромагнетиков, на возникновение вихревых токов в переменном магнитном поле, на магнитную вязкость материала – создают так называемые потери, которые можно разделить на следующие виды:

- а) потери на гистерезис P_g , пропорциональны площади петли гистерезиса

$$P_g = \eta \cdot f \cdot B_{max}^n \cdot V, \text{ Вт} \quad (4.11)$$

где η – коэффициент гистерезиса для данного материала;

f – частота поля, Гц;

B_{max} – максимальная индукция, Тл;

V – объем образца, м³;

$n \approx 1,6...2$ – значение показателя степени;

- б) потери на вихревые токи

$$P_{в.т.} = \xi \cdot f^2 \cdot B_{max} \cdot V, \text{ Вт} \quad (4.12)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от удельного электрического сопротивления материала и от формы образца;

в) потери на последствие $P_{п.с.}$, (потери на магнитную вязкость), которые не поддаются аналитическому расчету и определяются исходя из полных потерь P , $P_{г}$ и $P_{в.т.}$ по формуле

$$P_{п.с.} = P - P_{г} - P_{в.т.} \quad (4.13)$$

Потери на вихревые токи можно уменьшить, увеличивая электрическое сопротивление ферромагнетика. Для этого магнитопровод, например для трансформаторов, набирают из отдельных тонких, изолированных друг от друга пластин ферромагнетика.

4. 4. Энергия в зазоре ферромагнетика

На практике иногда применяют ферромагнетики с разомкнутой магнитной цепью, т.е. имеющие, например, воздушный зазор, обладающий большим магнитным сопротивлением. В теле, имеющем воздушный зазор, возникают свободные полюса, создающие размагничивающее поле, направленное навстречу внешнему намагничивающему полю. Происходит снижение индукции тем большее, чем шире воздушный зазор. Это проявляется в электромашинах, магнитных подъемных устройствах и др.

Энергия в зазоре (W_L), например, постоянного магнита, выражается формулой

$$W_L = \frac{B_L \cdot H_L}{2}, \text{ Дж/м}^3, \quad (4.14)$$

где B_L и H_L – собственно индукция и напряженность поля при данной длине воздушного зазора.

Изменяя подаваемую напряженность на ферромагнетик, можно получить в данном зазоре максимальную энергию.

Для нахождения W_{\max} пользуются диаграммой, на которой по кривой размагничивания для магнитного материала, расположенной во втором квадранте (участок петли гистерезиса), строят кривую энергии в зазоре, задаваясь различными значениями B (или H). Зависимость W_L от B_L и H_L показана на рис. 4.4.

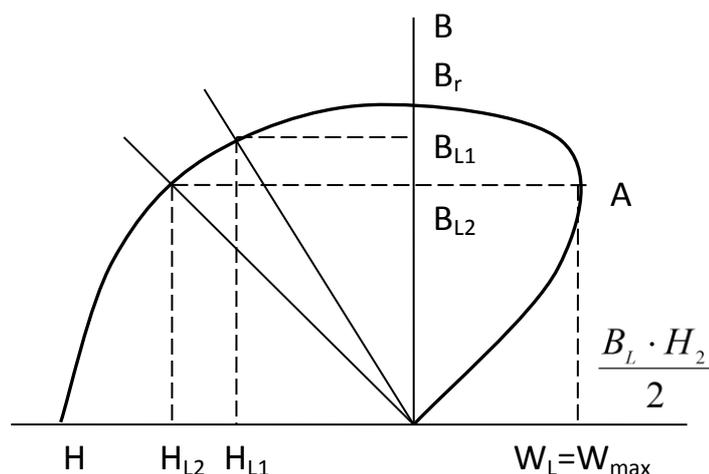


Рис. 4.4. Энергия в воздушном зазоре ферромагнетика

Чтобы определить напряженность поля H , при которой будет максимальная энергия в зазоре магнита, нужно провести касательную к максимальной энергии (в точке A), а от нее провести горизонтальную линию до пересечения с петлей гистерезиса во втором квадранте. Затем опустить перпендикуляр до пересечения с координатой H . Точка H_{L2} будет определять искомую напряженность магнитного поля.

4. 5. Классификация магнитных материалов

По основным магнитным параметрам ферромагнитные материалы можно классифицировать на следующие группы;

1. Магнитно-мягкие – материалы с малым значением коэрцитивной силы H_c (до 100 А/м), большой величиной магнитной проницаемости и малыми потерями на гистерезис. Они используются в качестве магнитопроводов постоянного тока (сердечники трансформаторов, измерительных приборов, катушек индуктивности и т.п.). Рис. 4.5. *а, б и в* включает в себя разновидности гистерезисных петель с разным характером кривых намагничивания для магнитно-мягких ферромагнетиков; рис. 4.5. *г* – представляет петлю гистерезиса для магнитно-твердого материала.

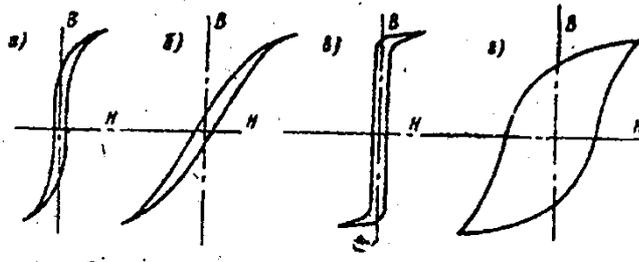


Рис. 4.5. Гистерезисные петли магнитных материалов

К магнитно-мягким материалам относятся:

- технически чистое железо, карбонильное железо;
- электротехническая сталь;
- пермаллой;
- альсиферы;
- ферриты (медномарганцевые);
- термомагнитные сплавы (Ni-Cr-Fe) и др.

2. Магнитно-твердые – материалы, имеющие большую коэрцитивную силу ($H_c > 100$ А/м) (см. рис. 4.5, г).

Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, в которых используется магнитная энергия в воздушном зазоре между полюсами магнита.

К магнитно-твердым материалам относятся:

- литые сплавы альни (Al-Ni-Fe);
- альнико (Al-Ni-Co-Fe);
- магнико;
- легированные стали, закаливаемые на мартенсит и др.

3. Ферриты – материалы представляющие собой двойные окислы железа с окислами двухвалентных металлов ($MeO \cdot Fe_2O_3$). Ферриты могут быть магнитно-мягкими и магнитно-твердым, в зависимости от их кристаллического строения, например, типа шпинели – ($MgAl_3O_4$), гаусмагнита (Mn_3O_4), граната $Ga_3Al_2(SiO_4)_3$ и др. Электрическое удельное сопротивление их велико (от 10^{-1}

до 10^{10} Ом·м), следовательно потери на вихревые токи, особенно при высоких частотах, малы.

4. Магнитодиэлектрики – материалы, состоящие из ферромагнитного порошка с диэлектрической связкой. Порошок берется обычно на основе магнитно-мягкого материала – карбонильное железо, альсифер, а связующим диэлектриком служит материал с малыми диэлектрическими потерями – полистирол, бакелит и др.

В таблице 4.1 приводятся справочные параметры некоторых ферромагнитных материалов различных классификационных групп.

Таблица 4.1

Наименование магнитного материала	Химический состав или марка	Относительная магнитная проницаемость, μ		Магнитная индукция В, Т		Коэрцитивная сила H_c , А/м	Удельн. эл. сопротивление ρ , мкОм·м	Энергия в зазоре $W_L = \frac{B_L \cdot H_L}{2}$, Дж/м ³
		начальная, μ_n	максимальная, μ_{max}	остаточная, В	максимальная, B_{max}			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Магнитно-мягкие								
Электро-техн. сталь	Si до 2,8%	—	50000	0,4	1,5	16	0,4	
Пермаллой низко-никелевый	50 НХС	1500	15000	—	1	20	0,9	
Пермаллой высоко-никелевый	76 НХД	35000	220000	—	0,65	1	0,55	
Супермаллой	—	100000	1500000	—	0,8	0,3	0,6	
Альсифер	Al, Ni, Fe	35000	120000	—	1,5	1,8	0,8	
Ферриты								
Феррит никель-цинковый	2000 НМ	2000	7000	—	—	12	10^{-7}	
Феррит марганец-цинковый	6000 НМ	6000	10000	—	—	12	10^5	
Магнитно-твердые								
Альни	Ю НД8	—	—	0,55	—	44000	—	5000
Альнико	ЮНДР 3515	—	—	0,8	—	87000	—	14000
Феррит бариевый	1 БИП	—	—	0,19	—	120000	—	2800
Феррит	2,4 БА	—	—	0,33	—	224000	—	9600

бариевый								
Магнито		—	—	1,3	—	60000	—	24000
Магнитодиэлектрики								
На основе карбонильного железа	16	73	0,2	0,8	7	—	—	—

ТЕМА 5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Это материалы, имеющие запрещенную зону. На их основе изготавливаются датчики различных видов энергий, выпрямители, триоды, тиристоры, интегральные микросхемы и множество других приборов и элементов.

Используются они, в основном, в твердом агрегатном состоянии, хотя имеются и жидкие полупроводники, например: Bi_2S , Cu_2S .

Ширина запрещенной зоны полупроводников имеет большой диапазон – от сотых долей электрон-вольта до 3 эВ. Удельные электрические сопротивления занимают более десяти порядков ($10^{-4} \dots 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)

Полупроводники относятся к неметаллам, а по химическому составу могут быть неорганическими – кремний, арсенид галлия, карбид кремния и органическими – антрацен, нафталин, фталоцианин меди и др.

5. 1. Особенности полупроводников

К ним относят:

1. Электрические параметры очень чувствительны к содержанию примесей (0,000001% примеси может изменить величину электропроводности на один или два порядка).

2. Внешние воздействия (тепло, свет, давление, трение и др.) могут сильно изменять свойства материала. Поэтому полупроводники используются для изготовления датчиков всевозможных видов энергии: терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы и др.

3. Полупроводники, в зависимости от определенных вводимых примесей, могут обладать электронной (n - типа) или дырочной (p - типа) электропроводностью. Это позволяет создавать электронно-дырочный переход (p - n переход), который обладает униполярной проводимостью и позволяет

создавать выпрямители, усилители и другие активные элементы и приборы. Некоторые параметры и свойства полупроводников представлены на рис. 4.1.

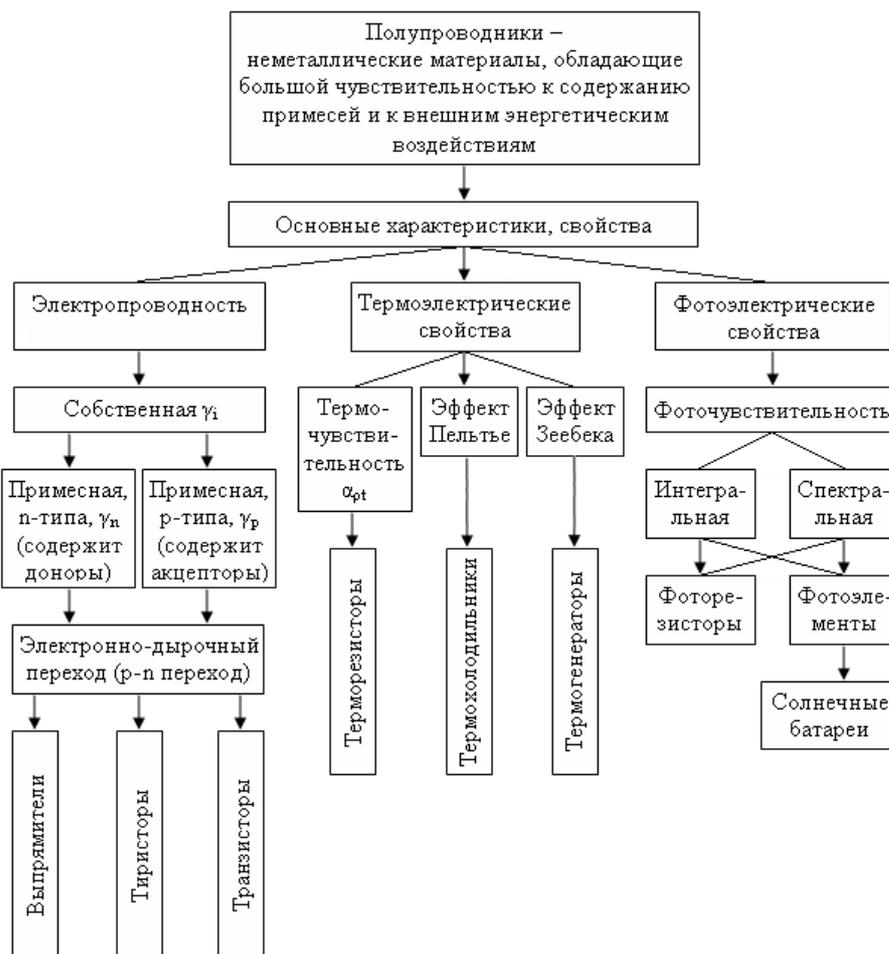


Рис. 5.1. Свойства полупроводниковых материалов

5.2. Электропроводность полупроводников

Различают собственную (γ_i) электропроводность, когда полупроводник не имеет примесей (рис. 5.2, а), примесную (γ_n) n - типа, когда в него введена донорная примесь (рис. 5.2,б); примесную (γ_p) p - типа, когда в полупроводник введена акцепторная примесь (рис. 5.2, в).

Электропроводность любого материала определяется формулой

$$\gamma = q \cdot N \cdot u, \quad (5.1)$$

где N – количество носителей заряда, u – подвижность носителей заряда, q – заряд электрона.

На рис. 5.2. приведены энергетические диаграммы собственного полупроводника (а), полупроводника с донорной примесью (б) и с акцепторной примесью (в).

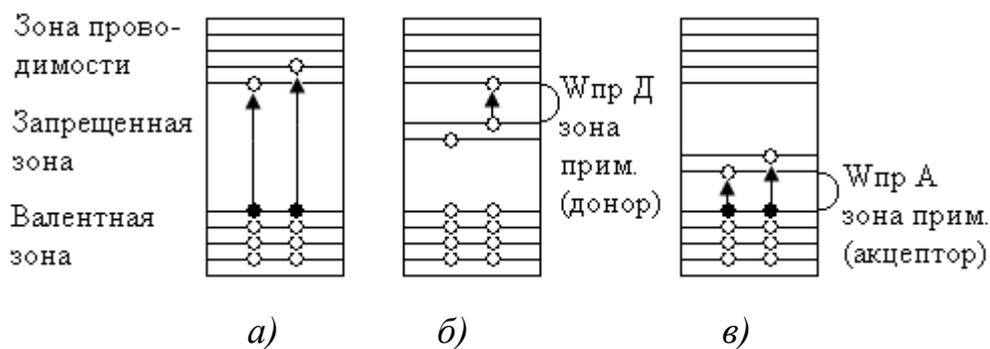


Рис. 5.2. Энергетические диаграммы полупроводниковых материалов

5.2.1. Собственная проводимость (γ_i)

Она осуществляется двумя типами носителей – электронами (n), которые переходят из валентной заполненной зоны в зону проводимости (рис. 5.2.), оставляя свободное место (дырку) в валентной зоне, и дырками (p), которые, заполняясь ниже лежащими электронами валентной зоны, перемещаются в ней. Таким образом, в переносе зарядов участвуют и электроны и дырки, причем в равных количествах. Подвижность электронов (u_n) больше, чем подвижность дырок (u_p), так как электроны непосредственно переносят заряд, а дырки такой же заряд передают эстафетно, двигаясь в противоположную сторону движения электронов. Формула для собственной электропроводности γ_i полупроводников имеет вид:

$$\gamma_i = q \cdot n \cdot u_n + q \cdot p \cdot u_p \quad (5.2)$$

Электропроводность γ_i состоит из двух составляющих: электронной и дырочной; т.к. количество $n = p$, а $u_n > u_p$, собственная проводимость γ_i имеет преобладание электронной составляющей и носит электронный характер. Перепишем формулу

$$\gamma_i = q \cdot n_i \cdot (u_n + u_p), \quad (5.3)$$

где n_i – концентрация собственных носителей заряда.

5.2.2. Примесная проводимость n - типа (γ_n)

Она возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой больше, чем валентность полупроводника. Например, для четырехвалентного кремния – Si донорной примесью является пятивалентный

мышьяк – As. Доноры располагаются в запрещенной зоне ближе к зоне проводимости. Для того, чтобы атом донора отдал свой электрон в зону проводимости, требуется очень малая энергия – $W_{пр Д}$ (рис. 5.2, б). Например, ширина запрещенной зоны кремния – 1,12 эВ, а энергия активации донорной примеси (As) равна всего – 0,025 эВ. Атом мышьяка, отдавший свой электрон в зону проводимости, превращается в положительно заряженный ион, который хотя и имеет заряд, но закреплен в кристаллической решетке и в электропроводности не участвует.

Перенос зарядов происходит только за счет электронов

$$\gamma_n = q \cdot n \cdot u_n \quad (5.4)$$

Поэтому характер проводимости электронный; n - типа.

5.2.3. Примесная проводимость p – типа (γ_p)

Она возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой меньше валентности основного полупроводника. Например, если в кремний ввести трехвалентный алюминий (Al), он является акцепторной примесью для Si. Акцепторы располагаются в запрещенной зоне ближе к зоне валентной. Их энергия активации также значительно меньше запрещенной зоны кремния (рис. 5.2, в), $W_{пр А} \approx 0,027$ эВ. При такой энергии, полученной извне, акцептор захватывает электрон из валентной зоны, превращаясь при этом в отрицательно заряженный ион, а в валентной зоне начинается эстафетное перемещение электронов, т.е. будет иметь место дырочная проводимость

$$\gamma_p = q \cdot n \cdot u_p \quad (5.5)$$

5.2.4. Воздействие теплового поля на электропроводность

С увеличением температуры электропроводность полупроводников увеличивается экспоненциально. Такой характер поведения обусловлен носителями заряда. В общем случае подвижность носителей с увеличением температуры сначала изменяется пропорционально температуре в степени +3/2 ($T^{+3/2}$), т.е. возрастает. Это происходит за счет небольшого увеличения средней

длины пробега и увеличения скорости носителей заряда. При более высокой температуре увеличиваются хаотические тепловые колебания носителей заряда и атомов, поэтому подвижность начинает уменьшаться, но уже пропорционально температуре в степени $-3/2$, т.е. $\sim T^{-3/2}$. Из рис. 5.3. видно, как влияет каждый из компонентов формулы $\gamma = q \cdot N \cdot u$ на поведение электропроводности полупроводника при увеличении температуры.

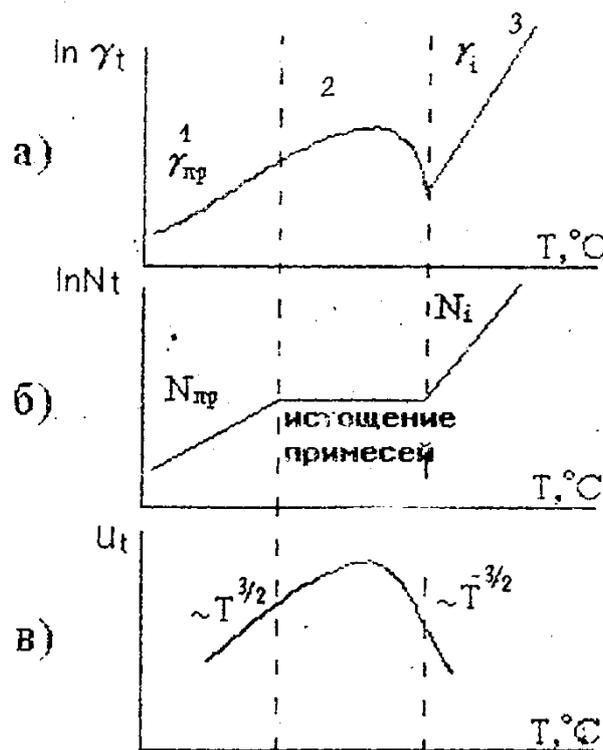


Рис. 5.3. Температурная зависимость электропроводности

Запишем формулу, отражающую зависимость концентрации носителей заряда от температуры

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}, \quad (5.6)$$

где N_t – количество носителей заряда при данной температуре T , м^{-3} ;

N_0 – количество носителей при нормальных условиях ($T_{\text{комн.}}$), м^{-3} ;

W_t – термическая энергия активации носителей, Вт; для примесных полупроводников $W_t = W_{\text{пр}}$, для собственных – $W_t = W_{\text{д}}$, $W_{\text{д}}$ – запрещенная зона;

K – постоянная Больцмана ($K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град);

T – абсолютная температура.

Подвижность носителей изменяется пропорционально температуре

$$u_t \approx T^{\pm 3/2}, \quad (5.7)$$

где u_t – подвижность носителей заряда при температуре T , $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Видим, что основное влияние на поведение электропроводности с изменением температуры оказывает концентрация носителей заряда.

Таким образом, электропроводность полупроводника от температуры изменяется экспоненциально

$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}, \quad (5.8)$$

где A – постоянная, представляющая собой электропроводность полупроводника при экстремальных условиях; это электропроводность, например, при $T = 0$ К.

Так как подвижность носителей заряда изменяется с температурой незначительно, то определяет характер поведения электропроводности γ , в основном, концентрация носителей заряда N . На участке 1 (рис. 5.3) наблюдается рост примесных носителей заряда, их подвижности и примесной проводимости $\gamma_{\text{пр}}$; на участка 2 показано истощение примесных носителей заряда (они уже все активизированы и число не растет с ростом T), а подвижность (U) – несколько падает. На участке 3 уже наблюдается увеличение собственных носителей заряда, способных переходить в зону проводимости из валентной зоны. На фоне быстрого роста числа носителей подвижность почти не оказывает влияния на изменение электропроводности.

Для удобства изображения зависимости γ_t и N_t , даны в полулогарифмическом натуральном масштабе, а T – в обычном. Поэтому вместо экспонент, мы получаем зависимости в виде прямых линий (или кривых).

Таким образом, тепловая энергия способствует переходу носителей в зону проводимости (или на примесные уровни для р-типа) и электропроводность полупроводника увеличивается экспоненциально.

Температурный коэффициент сопротивления полупроводников ТКР – отрицательный, т.к. сопротивление их, как правило, с увеличением температуры уменьшается

$$TKR = \frac{I}{R_1} \cdot \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} < 0, \quad (5.9)$$

где R_1 – сопротивление полупроводника при начальной температуре T_1 ;
 R_2 – сопротивление при более высокой температуре T_2 .

5.3. Термоэлектрические свойства

Эти свойства полупроводников рассмотрим на примере терморезисторов и термоэлементов.

5.3.1. Терморезисторы

Чувствительность некоторых полупроводников к тепловому полю очень велика, например, таких как оксиды CuO, NiO, MnO, их смеси. Она может составлять (3...7)% на 1 градус температуры.

Эта особенность используется для изготовления терморезисторов – сопротивлений, величина которых сильно изменяется от температуры. Подбирая разный состав полупроводника, можно получить требуемый ТКР. Вольт-амперная характеристика терморезистора имеет вид, показанный на рис. 5.4. На участке 2, когда теплота Джоуля-Ленца, выделяемая в сопротивлении, превышает теплоотдачу в окружающую среду, термосопротивление нагревается, его сопротивление уменьшается (по экспоненте), а ток возрастает.

Терморезисторы изготавливают в виде стерженьков, таблеток, бусинок путем прессования окислов. Масса их, как правило, мала, чтобы терморезистор обладал меньшей инерционностью при реакции на тепло.

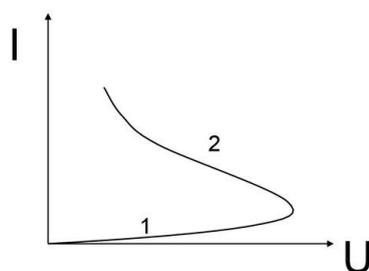


Рис. 5.4. Вольт-амперная характеристика терморезистора

Используются они как датчики температуры к различным схемам автоматики, в измерительных приборах в целях температурной компенсации, непосредственно для измерения температуры.

5.3.2. Термоэлементы

Это устройства, с помощью которых можно преобразовывать энергию электрического поля в тепловую энергию, и наоборот – тепловую в электрическую. Эти преобразования основаны на эффектах Зеебека и Пельтье.

Рассмотрим причины, которые могут способствовать направленному движению микрочастиц, носителей заряда и др.

Направленное движение заряженных частиц вызывают:

- 1) градиент электрического поля;
- 2) градиент теплового поля;
- 3) градиент концентрации частиц и другие факторы.

(Движение частиц направлено от большего градиента к меньшему!).

Если в полупроводнике образуются электронно-дырочные пары, т.е. если валентный электрон из своей зоны переходит в зону проводимости, образуя в валентной зоне дырку, способную в ней перемещаться, а в зоне проводимости перемещается сам электрон, то на этот процесс затрачивается энергия, при этом генерируется (возникает) электронно-дырочная пара. Если же электрон из зоны проводимости переходит на нижнюю валентную зону и заполняет там дырку, этот процесс идет с выделением энергии и называют его рекомбинацией электронно-дырочной пары (исчезновение носителя заряда – электрона и исчезновение носителя заряда – дырки).

Полупроводниковый термоэлемент представляет собой два разнотипных полупроводника, концы которых с одной стороны соединены проводящей пластиной (например, Cu), а вторые концы разомкнуты и к ним можно присоединять измерительный прибор (например, гальванометр) или источник постоянного напряжения (рис. 5.5.).

Если к p - столбику полупроводника приложите минус (–) источника питания, а к n-столбику плюс (+), то положительные носители заряда будут двигаться вниз к минусу; отрицательные заряды – к плюсу, тоже вниз. При

этом возникает эффект Пельтье, т.е. одни из спаев (верхний) будет охлаждаться, а второй спай (нижний) нагреваться.

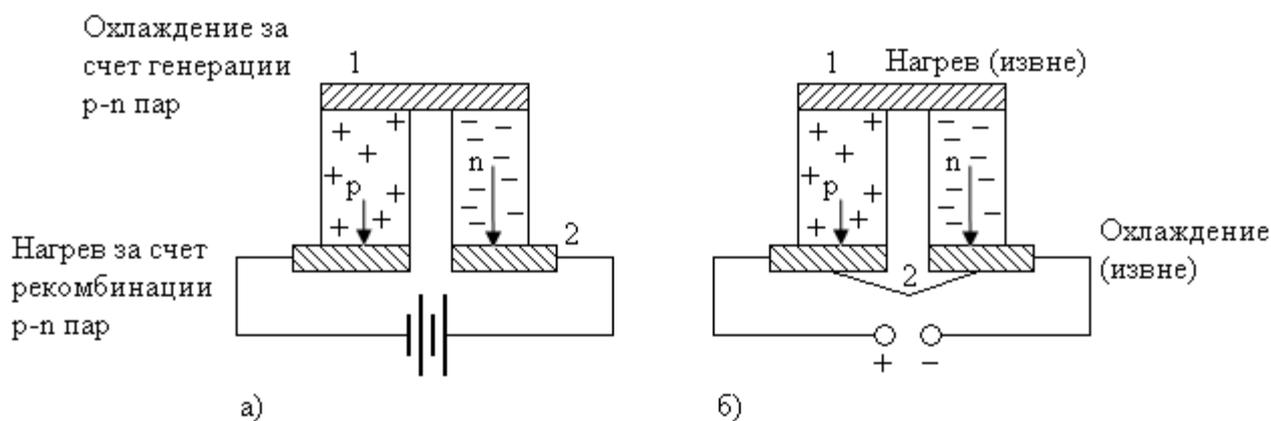


Рис. 5.5. Эффект Пельтье (а) и Зеебека (б)

Действительно, это будет иметь место и вот почему: через элемент будет протекать ток; носители заряда, которые идут вниз, в нижнем спае встречаясь, будут рекомбинировать, исчезать как носители заряда. Но ток протекает через элемент непрерывно, значит в верхнем спае должно возникать (генерироваться) столько же пар, сколько их рекомбинировало в нижнем спае. При генерации идет затрата энергии, значит верхний спай будет охлаждаться; при рекомбинации идет выделение энергии – значит нижний спай будет нагреваться. Нагрев одного спаю и охлаждение другого можно подсчитать по формуле Пельтье:

$$Q_{\text{П}} = \Pi \cdot I \cdot \tau, \quad (5.10)$$

где $Q_{\text{П}}$ – теплота Пельтье, которая на одном спае выделяется (нагрев), а на другом поглощается (охлаждение), Дж;

I – протекающий ток, А;

τ – время протекания тока, с.

В материале, по которому протекает ток, выделяется теплота Джоуля-Ленца, причем независимо от того или другого спаю.

Она определяется формулой

$$Q_{\text{Д-Л}} = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau, \quad (5.11)$$

где $Q_{\text{Д-Л}}$ – теплота Джоуля-Ленца, Дж;

R – сопротивление материала, Ом.

Как видим и Q_{Π} и $Q_{Д-Л}$ зависят от величины протекающего тока.

Эффект Зеебека показан с помощью рис. 5.5, б. Если один из спаев термоэлемента, например верхний (1), нагреть, а спай (2) охладить, то на разорванном нижнем спае появится постоянная разность потенциалов. Это произойдет в результате того, что носители заряда при наличии градиента температуры спаев будут двигаться направленно (от нагретого спае к холодному). На нижних концах столбиков термоэлемента скопятся носители заряда: на p - дырки (положительные), на n – электроны (отрицательные). Скопление противоположных носителей заряда создает электрическое поле.

Напряжение на таком термоэлементе определяется формулой Зеебека

$$U = A \cdot (T_{нагр.} - T_{охл.}), \quad (5.12)$$

где U – напряжение;

A – коэффициент термо-ЭДС для данных пар полупроводниковых столбиков;

$T_{нагр.}$ – температура нагретого спае;

$T_{охл.}$ – температура охлаждаемого спае.

В термоэлектрических явлениях взаимодействуют электрические и тепловые поля. К материалам для изготовления, например, столбиков термоэлементов, предъявляются требования – иметь высокую электропроводность, т.к. эффекты зависят от величины тока, протекающего в них, но в то же время материал не должен обладать высокой теплопроводностью, чтобы тепло от нагретого спае не ухудшало эффекта охлаждения другого спае. Эти требования противоречивые, но им удовлетворяют сложные соединения типа $Bi_2Te_3 \cdot Sb_2Se_3$ и подобные им.

5. 4. Электронно-дырочный (или p - n) переход

В каждом примесном полупроводнике есть два вида носителей: основные и неосновные, причем основных намного больше, чем неосновных. Обычно основные носители обозначаются: n_n и p_p , а неосновные имеют противоположный индекс основному обозначению, т.е. p_p и n_n .

$$n_n \gg p_n \text{ и } p_p \gg n_p$$

Если привести в соприкосновение (на расстояние порядка атомных) два полупроводника с разным типом проводимости, то в результате градиента концентрации на границе их начнется направленное движение основных носителей заряда (рисунок 3.6, а). Плотность тока диффузии при этом

$$I_D = q \cdot D \cdot \bar{\nabla} N, \quad (5.13)$$

где D – коэффициент диффузии; $\bar{\nabla} N$ – градиент концентрации носителей заряда; q – заряд электрона.

Электроны, которых много в n-области, будут переходить в p-область. Как только приграничный слой электронов перейдет в соседнюю область, нарушится электронейтральность n- и p- областей у границы. Электронная область зарядится положительно, а дырочная – отрицательно. Между ними появится электрическое приграничное диффузионное поле E_D , направленное от (+) к (-) (рис. 4.6, а). Это поле создает потенциальный барьер для дальнейшего перехода электронов в p-область, а дырок в n-область. При этом возникает область пространственного заряда (Δ), лишенная носителей, т.к. электроны присоединяются к акцепторам, образуя отрицательные ионы, а доноры, лишенные электронов, превращаются в положительные ионы. И те и другие закреплены в кристаллической решетке, поэтому свободные носители отсутствуют. Область пространственного заряда невелика, всего несколько микрон, но сопротивление её очень большое (т.к. нет свободных носителей, способных переносить заряд), порядка $10^4 \dots 10^5$ Ом.

P-n переход обладает униполярной проводимостью. Если приложить внешнее электрическое поле так, что у p-области будет минусовый знак, а у n-области плюсовой, то такое поле по направлению совпадет с полем на границе p-n перехода, значит создаваемый им барьер для основных носителей заряда будет увеличиваться, а область объемного заряда расширяться (рис. 5.6, б). Через p-n переход смогут переходить только неосновные носители заряда т.к. потенциальный барьер для них отсутствует и даже наоборот, способствует их прохождению. При такой полярности через p-n переход будет проходить ток, обусловленный неосновными носителями заряда, а их очень мало. Сопротивление p-n перехода при этом велико, а ток очень мал – это показано

на вольтамперной характеристике (левая нижняя сторона – третий квадрант) (рис. 5.7.).

Если полярность внешнего поля изменить (рис. 5.6, в), приложить (+) к р-области, а (-) к n-области, то внешнее поле будет направлено встречно с направлением потенциального барьера E_D ; он будет уничтожаться и через p-n переход будет протекать большой ток, обусловленный основными носителями заряда обеих областей. Область объемного заряда заполнится свободными носителями, сопротивление p-n перехода будет мало (рис.5.7.) – правая верхняя ветвь вольтамперной характеристики p-n перехода (первый квадрант).

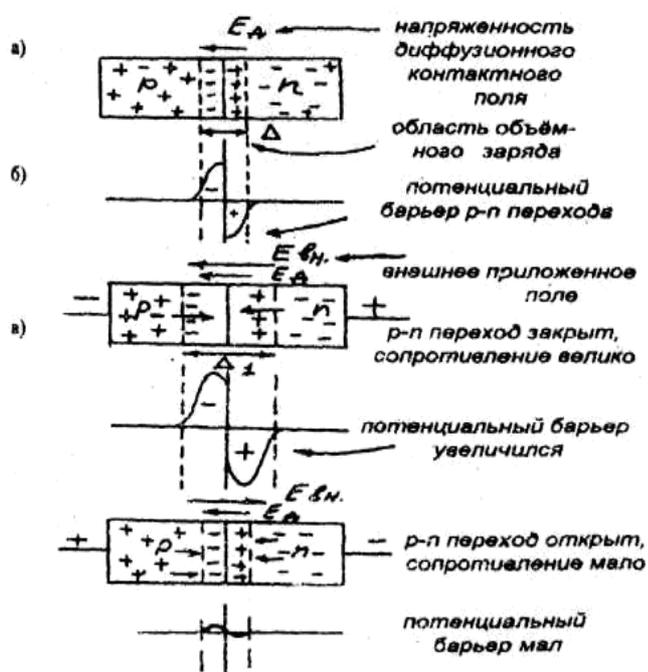


Рис. 5.6. p-n переход

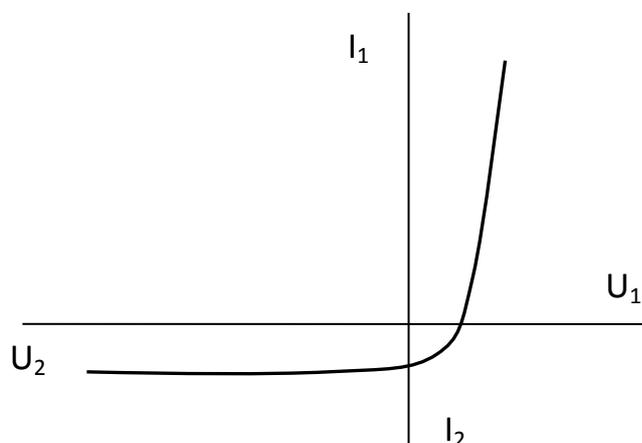


Рис.5. 7. Вольтамперная характеристика p-n перехода

Электронно-дырочные (p-n) переходы используются для изготовления множества активных приборов и устройств: диодов, триодов тиристоров, фотоэлементов и др.

Для изготовления p-n переходов используют, обычно монокристаллические материалы атомарных (элементарных) полупроводников – кремний, германий, селен, а также полупроводниковых соединений – арсенид галлия, фосфид галлия и др. Чем шире запрещенная зона полупроводника, тем до более высоких температур может работать прибор, изготовленный на его основе. Тем более высокой является предельная рабочая температура прибора, изготовленного на его основе.

5.5. Фотоэлектрические свойства полупроводников

Физический процесс внутреннего освобождения электронов фотонами, т.е. квантами электромагнитного излучения, называется внутренним фотоэффектом, а добавочная электропроводность, обусловленная этим процессом, называется фотопроводностью.

На энергетической диаграмме полупроводника (рис. 5.2, б) с донорной примесью $W_{пр}$ – энергия активации примеси, а W_g – ширина запрещенной зоны полупроводника. Чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону примесную, или из примесной в зону проводимости, нужно затратить энергию.

Энергия фотона

$$W_{\phi} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad (5.14)$$

где $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж·с;

ν – частота электромагнитного излучения, 1/с;

$c \approx 3 \cdot 10^8$ – скорость света в вакууме, м/с;

$\lambda = \frac{c}{\nu}$ – длина волны электромагнитного излучения, м.

Фотоэлектрические свойства полупроводников рассмотрим на примере фоторезисторов и фотоэлементов.

5.5.1. Фоторезистивный эффект

Если энергия фотона W_{ϕ} , попадающего на поверхность полупроводника, больше энергии примеси $W_{\phi} \geq W_{пр}$ – возникает примесная фотопроводимость;

если W_{Φ} больше ширины запрещенной зоны полупроводника $W_{\Phi} > W_g$ – возникает собственная фотопроводимость; если полупроводник не подвергается облучению – он обладает темновой электропроводностью – γ_{τ} .

Каждый фотон, воздействующий на полупроводник, при условии, например, что $W_{\Phi} \geq W_g$, способен перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости и создать пару носителей – электрон и дырку.

Когда электронно-дырочных пар становится много, увеличивается вероятность их рекомбинации, т.е. возвращение электрона на свое место в валентную зону. Поэтому при увеличении интенсивности светового потока F_{Φ} рост фотопроводимости будет замедляться, как показано на рис. 5.8, на котором представлена интегральная характеристика полупроводникового фотосопротивления.

На следующем рисунке (рис. 5.9.) приведены спектральные характеристики фотосопротивлений – зависимость чувствительности полупроводника – в %, от длины волны – λ падающего на него лучистого потока. Мы видим, что максимальная чувствительность наблюдается в сравнительно узком диапазоне длин волн излучения, например, для ФС1 и для ФС2.

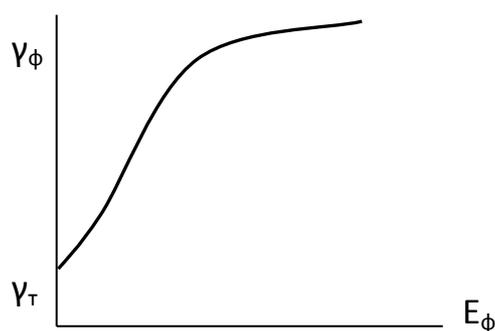


Рис. 5.8. Интегральная характеристика фотосопротивления

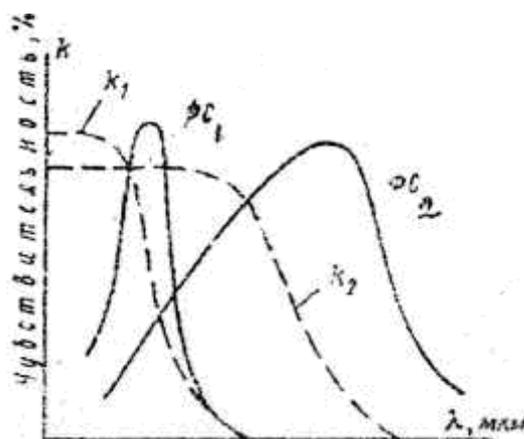


Рис. 5.9. Сравнительные характеристики фотосопротивления

Объяснить это можно следующим образом:

а) при больших длинах волн энергии фотона недостаточно для перевода электрона в зону проводимости – чувствительность мала;

б) по мере уменьшения λ энергия фотона растет, и увеличивается чувствительность;

в) когда частота излучения совпадает с собственной частотой материала полупроводника – наступает явление резонанса, чувствительность довольно интенсивно возрастает;

г) с дальнейшим ростом частоты излучения чувствительность начинает падать, так как увеличивается коэффициент поглощения k излучения в поверхностном слое; увеличивается рекомбинация на поверхности и чувствительность становится низкой (рис.5.9).

Каждый материал имеет свой спектр поглощения и свой спектр излучения, а также свою собственную частоту колебаний. Для каждого вещества известны эти частотные спектры, они сведены в таблицы – полосы. По спектральной характеристике можно определить исследуемый материал, а по всплескам (пикам) на основной спектральной характеристике можно определить какие примеси содержит данное вещество в своем составе (спектральный анализ).

На описанных фотосвойствах полупроводниковых материалов основана работа полупроводниковых фоторезисторов, фотоэлементов и др. приборов. Чувствительность их может лежать в инфракрасной области спектра (частота \leq

$3,5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$), видимой части (частота от $4 \cdot 10^{14}$ до $8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$), ультрафиолетовой части ($> 8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$).

5.5.2. Фотозлектрический эффект

Фотозлектрический эффект наблюдается в фотоэлементах, которые служат для преобразования световой (лучистой) энергии в электрическую (в солнечных батареях, вентильных элементах).

В основе устройства ФЭ лежит р-п переход (рис. 5.10).

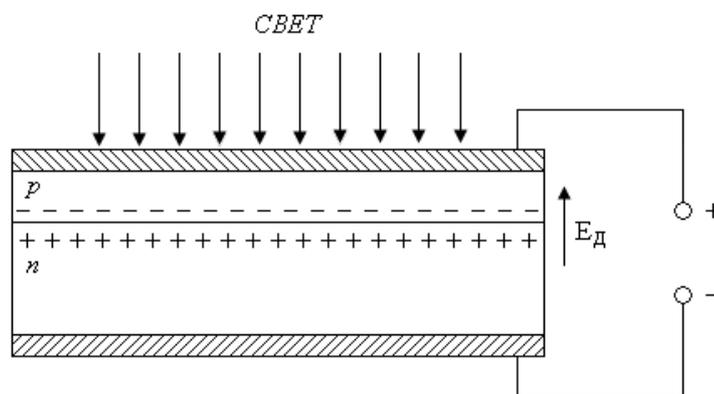


Рис. 5.10. Устройство ФЭ

Когда лучистый поток падает на прозрачную для него верхнюю часть фотоэлемента, и если энергия фотонов $W_{\text{ф}} \geq W_{\text{г}}$ полупроводника, то в верхней части будут образовываться электроны и дырки. Они диффундируют вглубь полупроводника, подходят к р-п переходу и здесь происходит их разделение. Неосновные носители заряда (для верхней области) втягиваются в нижнюю часть полупроводника, свободно проходя через потенциальный барьер, а основные носители заряда не проходят и скапливаются в верхней части. Таким образом вверху скапливается один тип носителей, внизу – противоположный тип. Любое скопление противоположных носителей заряда создает электрическое поле. Это и будет фотоэлектродвижущая сила, которая используется как источник электрической энергии.

На этом принципе работают солнечные батареи, вентильные элементы – возобновляемые источники энергии.

Для изготовления фоторезисторов используются различные полупроводниковые соединения, типа PbS, CdS и др.

Для изготовления фотоэлементов, преобразующих солнечную энергию в электрическую, обычно используются полупроводники, имеющие ширину запрещенной зоны: $1 \text{ эВ} < W_g < 3 \text{ эВ}$; это Si, Se, GaAs и др.

5.6. Классификация полупроводниковых материалов

Приведем классификацию полупроводников по химическому составу и структуре материалов.

1. Элементарные атомарные кристаллические материалы: кремний (Si), германий (Ge), селен (Se), фосфор (P), теллур (Te).

2. Полупроводниковые кристаллические (алмазоподобные) соединения, типа:

A^1B^7 – CuCl, AgCl и др.

A^2B^6 – PbS, CdS...

A^3B^5 – GaAs, InSb...

A^4B^4 – SiC, GeSi...

3. Молекулярные неорганические полупроводники: Te_2 , Se_2 ...

4. Оксиды, теллуриды, фосфиды, селениды, карбиды –

NiO, MgO, CuO, SiC, PbS и др.

5. Стеклообразные полупроводники: халькогенидные стекла –

As_2Te_2Se , $As_2Se_3 \cdot Al_2Se_3$.

6. Органические полупроводники:

а) ароматические углеводороды – антрацен, нафталин и др.

б) красители и пигменты – краска индиго, хлорофилл и др.

в) комплексы с переносом зарядов (донорно - акцепторные системы): бром-антрацен, иод-пирен.

Ниже приведена таблица 5.1 некоторых групп полупроводниковых материалов. В таблицу помещены основные параметры конкретных полупроводников.

Таблица 5.1

№ п/п	Наименование полупроводникового материала	Химический индекс	Ширина запрещ. зоны W_g , эВ	Концентрация собствен. носителей заряда n_i , M^{-3}	Подвижность носителей заряда $U, \frac{cm^2}{V \cdot s}$		Температура плавл., °C	Удельное электрич. сопротивление ρ , Ом·м
					электр. U_n	дырок U_p		
Неорганические								
Кристалл. элементарные (атомарные)								
1	Германий	Ge	0,72	$2,5 \cdot 10^{19}$	0,39	0,19	936	-0,5
2	Кремний	Si	1,12	$6,8 \cdot 10^{16}$	0,14	0,05	1417	$-2 \cdot 10^3$
3	Селен	Se	1,7	10^{10}	—	$2 \cdot 10^{-3}$	220	
Кристалл. соединения								
4	Карбид кремния	SiC	2,8	10	0,1	0,005	2200 возгонка	
5	Сурьмянистый индий	InSb	0,18	10^{22}	7,8	0,08	525	
6	Арсенид галлия	GaAs	1,4	10^{12}	0,85	0,04	1240	
7	Фосфид галлия	GaP	2,25	—	0,011	$\frac{0,007}{5}$	1500	
8	Арсенид индия	InAs	0,36	—	4	0,06	940	
9	Теллурид висмута	Bi_2Te_3	0,16	—	0,057	0,04	570	
10	Сульфид свинца	PbS	0,4	—	0,04	—	1114	
Стеклообразные								
11	Халькогениды	$As_2Te_2Se,$ $As_2Se_3 \cdot Al_2Se_3$		$1,7 \cdot 10^{21}$	0,015	—	—	10^8 10^{10}

Органические								
12	Антрацен	—	1,6	—	—	—	—	10^{12}
13	Нафталин	—	1,4	—	—	—	—	10^{14}
14	Красители и пигменты Фталоцианин меди	—	1,7	—	—	—	—	10^{11}
15	Молекулярные комплексы Иод-пирен	—	0,14	—	—	—	—	1,3
16	Полимеры Полиакрилонитрил	—	0,75	—	—	—	—	140

ТЕМА 6. ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Радиокомпоненты делят на две группы: активные и пассивные. К активным компонентам относят транзисторы, электронные компоненты, микросхемы и другие, то есть такие компоненты, которые способны преобразовывать электрические сигналы и усиливать их мощность.

К пассивным компонентам относят резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы, коммутационные элементы, то есть такие компоненты, которые предназначены для перераспределения электрической энергии.

6.1 Резисторы

Резисторы предназначены для перераспределения и регулирования электрической энергии между элементами схемы. Принцип их действия основан на способности радиоматериалов оказывать сопротивление протекающему через них электрическому току. Особенностью резисторов является то, что электрическая энергия в них превращается в тепло, которое рассеивается в окружающую среду.

По назначению дискретные резисторы делят на: резисторы общего назначения, прецизионные, высокочастотные, высоковольтные, высокоомные и специальные.

По постоянству значения сопротивления резисторы подразделяют на: постоянные, переменные и специальные. Постоянные резисторы имеют фиксированную величину сопротивления, у переменных резисторов предусмотрена возможность изменения сопротивления в процессе эксплуатации, сопротивление специальных резисторов изменяется под действием внешних факторов: протекающего тока или приложенного напряжения (варисторы), температуры (терморезисторы), освещения (фоторезисторы).

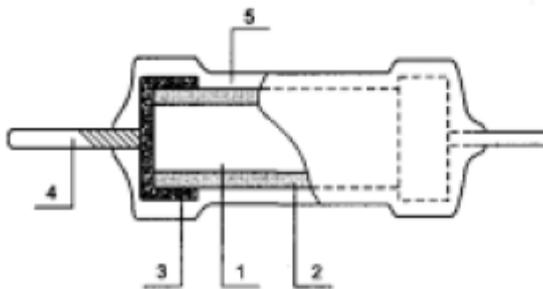
По виду токопроводящего элемента различают проволочные и непроволочные резисторы.

По эксплуатационным характеристикам дискретные резисторы делят на: термостойкие, влагостойкие, вибро- и ударопрочные, высоконадежные.

Основным элементом конструкции постоянного резистора является резистивный элемент, который может быть либо пленочным, либо объемным. Величина объемного сопротивления материала определяется количеством свободных носителей заряда в материале, температурой, напряженностью поля и выражается соотношением: $R = \rho \cdot l \cdot S^{-1}$, где ρ - удельное электрическое сопротивление материала; l - длина резистивного слоя; S - площадь поперечного сечения резистивного слоя.

Для расчета сопротивления тонких пленок пользуются понятием удельного поверхностного сопротивления ρ_s , под которым понимают сопротивление тонкой пленки, имеющей в плане форму квадрата: $R = \rho_s \cdot l^{-1}$, где ρ_s - удельное поверхностное сопротивление, зависящее от толщины пленки.

Широкое применение нашли пленочные резисторы (рис.6.1).



- 1 — диэлектрическое цилиндрическое основание;
2 — резистивная пленка; 3 — контактные колпачки;

4 — выводы; 5 — защитная пленка

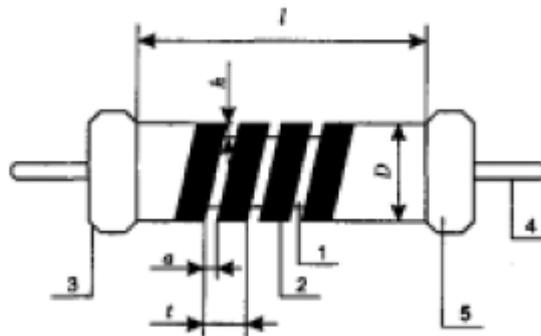
Рис.6.1. Пленочный резистор

На диэлектрическое цилиндрическое основание 1 нанесена резистивная пленка 2. На торцы цилиндра надеты контактные колпачки 3 из проводящего материала с припаянными к ним выводами 4. Для защиты резистивной пленки от воздействия внешних факторов резистор покрывают защитной пленкой 5.

Сопротивление пленочного резистора определяется соотношением:

$$R = \rho_s \frac{l}{\pi D}$$

Такая конструкция резистора обеспечивает получение сравнительно небольших сопротивлений (сотни Ом). Для увеличения сопротивления резистивную пленку наносят на поверхность керамического цилиндра в виде спирали (рис. 6.2).



1 — керамический цилиндр; 2 — резистивная пленка;
3 — контактные колпачки; 4 — выводы; 5 — защитная пленка

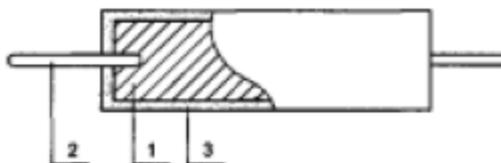
Рис.6.2. Пленочный резистор

Сопротивление такого резистора определяется соотношением $R = \rho_s \frac{N\pi D}{t - \alpha}$

где t — шаг спирали, alpha — ширина канавки, N- число витков спирали.

На рис.6.3 показана конструкция объемного резистора, представляющего собой стержень 1 из токопроводящей композиции круглого или прямоугольного сечения с запрессованными проволочными выводами 2. Снаружи стержень защищен стеклоэмалевой или стеклокерамической

оболочкой 3. Постоянный проволочный резистор представляет собой изоляционный каркас, на который намотана проволока с высоким удельным электрическим сопротивлением. Снаружи резистор покрывают термостойкой эмалью, опрессовывают пластмассой или герметизируют металлическим корпусом, закрываемым с торцов керамическими шайбами.



- 1 — стержень; 2 — проволочные выводы;
3 — стеклоэмалевая или стеклокерамическая оболочка

Рис.6.3. Объемный резистор

Для гибридных ИМС выпускают микромодульные резисторы, представляющие собой стержень из стекловолокна с нанесенным на поверхность тонким слоем токопроводящей композиции. Такие резисторы приклеивают к контактным площадкам подложек токопроводящим клеем — контактолом.

Резисторы гибридных ИМС изготавливают в виде резистивных пленок, наносимых на поверхность диэлектрической подложки. Эти резисторы могут быть тонкопленочными (толщина пленки порядка 1 мкм) и толстопленочными (толщина пленки порядка 20 мкм). Резисторы полупроводниковых ИМС представляют собой тонкую (толщиной до 2 мкм) локальную область полупроводника, изолированную от подложки и защищенную слоем SiO₂. Конструкции переменных резисторов гораздо сложнее, чем постоянных. На рис. 6.4 представлена конструкция переменного непроволочного резистора круглой формы.

Переменный непроволочный резистор состоит из подвижной и неподвижной частей. Неподвижная часть представляет собой пластмассовый круглый корпус 2, в котором смонтирован токопроводящий элемент 3, имеющий подковообразную форму. Посредством заклепок 6 он крепится к круглому корпусу. Эти заклепки соединены с внешними выводами 4.



- 1 — токосъемник; 2 — пластмассовый круглый корпус;
 3 — токопроводящий элемент; 4 — внешние выводы; 5 — стопор;
 6 — заклепки; 7 — вращающая ось с торцом; 8 — изоляционная планка

Рис. 6.4. Переменный непроволочный резистор

Подвижная часть представляет собой вращающуюся ось, с торцом которой 7 посредством чеканки соединена изоляционная планка 8, на которой смонтирован подвижный контакт 1 (токосъемник), соединенный с внешним выводом. Угол поворота оси составляет 270° и ограничивается стопором 5.

Существуют и другие конструкции переменных непроволочных резисторов. Токопроводящий элемент в них представляет собой тонкую графитовую, металлическую, металлооксидную или композиционную пленку. Переменные резисторы могут иметь разный закон изменения сопротивления в зависимости от угла поворота оси (рис.6.5).

У линейных резисторов (типа А) сопротивление зависит от угла поворота линейно. У логарифмических резисторов (тип Б) сопротивление изменяется по логарифмическому закону, а у резисторов типа В — по обратнологарифмическому. Кроме того, существуют резисторы, у которых сопротивление изменяется по закону синуса (тип В) или косинуса (тип Б).

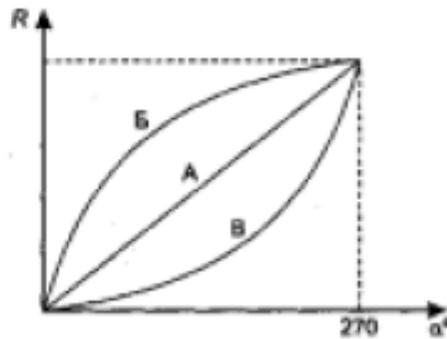


Рис.6.5. Изменение сопротивления в зависимости от угла поворота оси

Некоторые типы переменных резисторов состоят из двух переменных резисторов, объединенных в единую конструкцию, в которой токосъемники расположены на общей оси.

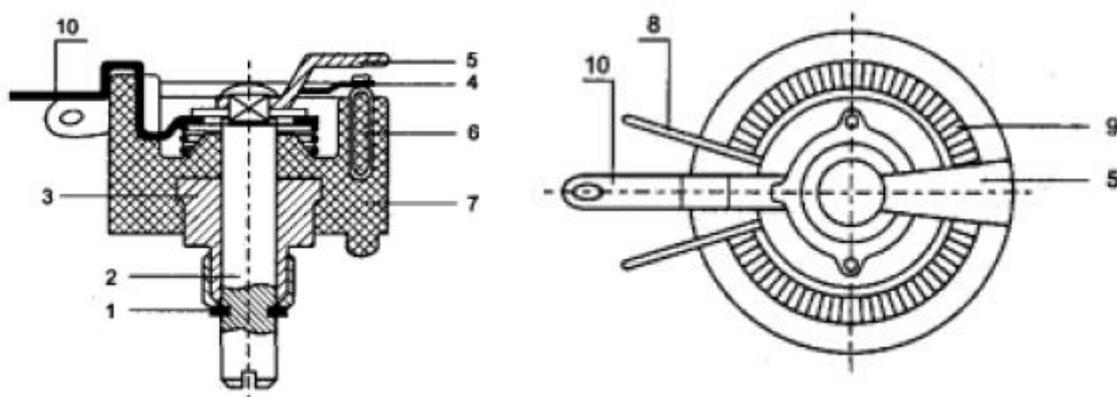
Существуют переменные резисторы, содержащие выключатель, контакты которого разомкнуты, если ось резистора повернута в крайнее положение при вращении против часовой стрелки. При повороте оси по часовой стрелке на небольшой угол контакты выключателя замыкаются. Некоторые типы резисторов комплектуются специальными стопорящими устройствами, жестко фиксирующими положение оси.

На рис.6.6 показана конструкция переменного проволочного резистора с круговым перемещением токосъемника. В пластмассовом корпусе 7 с помощью цапговой втулки 3 укреплен поворотная ось 2, на которой закреплен изоляционный диск с контактной пружиной (ползуном) 4, скользящей по проводу обмотки 9, укрепленной на гетинаксовой дугообразной пластине 6.

Концы обмотки соединены с выводами 8, а ползун через контактное кольцо соединен с внешним контактным лепестком 10. Положение оси может быть зафиксировано стопорной разрезной гайкой 1, а угол поворота оси ограничен выступами корпуса, в которые упирается планка-ограничитель 5, закрепленная на оси.

Кроме переменных резисторов с круговым перемещением, существуют резисторы с прямолинейным перемещением подвижного контакта. В этом случае контактный ползун укрепляется не на поворотной, а на червячной оси.

Выбор типа резистора (постоянного или переменного) для конкретной схемы производится с учетом условий работы и определяется параметрами резисторов.



- 1 — стопорная разрезная гайка; 2 — поворотная ось; 3 — цанговая втулка;
 4 — ползун; 5 — планка-ограничитель; 6 — гетинаксовая дугообразная
 пластина; 7 — пластмассовый корпус; 8 — выводы; 9 — обмотка;
 10 — внешний контактный лепесток

Рис.6.6. Переменный проволочный резистор

Резистор нельзя рассматривать как элемент, обладающий только активным сопротивлением, определяемым его резистивным элементом. Помимо сопротивления резистивного элемента, он имеет емкость, индуктивность и дополнительные паразитные сопротивления.

Активное сопротивление резистора определяется следующим

$$\text{соотнош } R = \frac{(R_R + R_K)R_{из}}{R_R + R_K + R_{из}}$$

где R_R — сопротивление резистивного элемента, $R_{из}$ — сопротивление изоляции, определяемое свойством защитного покрытия и основания, R_K — сопротивление контактов.

Сопротивление R_K имеет существенное значение только для низкоомных резисторов. Сопротивление $R_{из}$ практически влияет на общее сопротивление только высокоомных резисторов. Реактивные элементы определяют частотные свойства резистора. Из-за их наличия сопротивление резистора на высоких частотах становится комплексным.

Относительная частотная погрешность определяется как: $\alpha_R = \frac{Z - R}{R} \cdot 100\%$
где Z — комплексное сопротивление резистора на частоте ω .

На практике, как правило, величины R и C неизвестны. Поэтому для некоторых типов резисторов указывают значение обобщенной постоянной времени τ_{\max} , которая связана с относительной частотной погрешностью сопротивления приближенным ур $\alpha_R \approx 50\omega^2 \tau_{\max}^2$.

Параметры резисторов характеризуют эксплуатационные возможности применения конкретного типа резистора в конкретной электрической схеме. Номинальное сопротивление $R_{\text{НОМ}}$ и его допустимое отклонение от номинала $\pm \Delta R$ являются основными параметрами резисторов.

Номиналы сопротивлений стандартизованы в соответствии с ГОСТ 28884-90. Для резисторов общего назначения ГОСТ предусматривает шесть рядов номинальных сопротивлений: E6, E12, E24, E48, E96 и E192. Цифра указывает количество номинальных значений в данном ряду, которые согласованы с допустимыми отклонениями. Номинальные значения сопротивлений определяются числовыми коэффициентами, которые умножаются на 10^n , где n — целое положительное число. Так например, числовому коэффициенту 1,0 соответствуют резисторы с номинальным сопротивлением, равным 10, 100, 1000 Ом и т.д. Допустимые отклонения от номинала для ряда E6 составляют $\pm 20\%$, для ряда E12 — $\pm 10\%$, для ряда E24 — $\pm 5\%$. Это значит, что резистор с сопротивлением 1,5кОм из ряда E12 может обладать сопротивлением в пределах от 1,35 до 1,65кОм, а тот же резистор из ряда E6 — в пределах от 1,2 до 1,8 кОм. Числовые коэффициенты, определяющие номинальные значения сопротивлений, подобраны так, что образуется непрерывная шкала сопротивлений, т.е. максимально возможное сопротивление какого-либо номинала совпадает (или несколько больше) с минимальной величиной сопротивления соседнего номинала.

Прецизионные резисторы имеют отклонения от номинала $\pm 2\%$; $\pm 1\%$; $\pm 0,5\%$; $\pm 0,2\%$; $\pm 0,1\%$; $\pm 0,05\%$; $\pm 0,02\%$ и $\pm 0,01\%$.

Номинальная мощность рассеивания $P_{ном}$ определяет допустимую электрическую нагрузку, которую способен выдержать резистор в течение длительного времени при заданной стабильности сопротивления.

Протекание тока через резистор связано с выделением тепла, которое должно рассеиваться в окружающую среду. Мощность, выделяемая в резисторе в виде тепла, зависит от величины приложенного к нему напряжения U и протекающего тока I , и определяется соотношением: $P_{выд} = UI$

Мощность, рассеиваемая резистором в окружающую среду, пропорциональна разности температур резистора T_R и окружающей среды T_0 : $P_{выд} = \frac{T_R - T_0}{R_T}$

Рассеиваемая мощность зависит от условий охлаждения резистора, определяемых значением теплового сопротивления R_T , которое тем меньше, чем больше поверхность резистора и теплопроводность материала резистора.

Из условия баланса мощностей можно определить температуру резистора.

Если $P_{выд} = P_{отв}$, то $UI = (T_R - T_0)/R_T$, следовательно $T_R = UI R_T + T_0$.

При увеличении мощности, выделяемой в резисторе, возрастает его температура T_R , что может привести к выходу резистора из строя. Для того чтобы этого не произошло, необходимо уменьшить R_T , что достигается увеличением размеров резистора.

Для каждого типа резистора существует определенная *максимальная температура* T_{max} , превышать которую нельзя.

Температура резистора T_R зависит также от температуры окружающей среды. Если она очень высока, то температура T_R может превысить максимальную. Чтобы этого не произошло, необходимо уменьшать мощность, выделяемую в резисторе.

Для всех типов резисторов в технических условиях (ТУ) оговаривают указанные зависимости мощности от температуры окружающей среды.

Номинальные мощности стандартизованы (ГОСТ 24013-80 и ГОСТ 10318-80) и соответствуют ряду: 0,01; 0,025; 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 1,2; 5; 8; 10; 16; 25; 50; 75; 100; 160; 250; 500.

Предельное рабочее напряжение $U_{пред}$ определяет величину допустимого напряжения, которое может быть приложено к резистору.

Для резисторов с небольшой величиной сопротивления (сотни Ом) эта величина определяется мощностью резистора и рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{пред}} = \sqrt{P_{\text{ном}} R_{\text{ном}}}$$

Для остальных резисторов предельное рабочее напряжение определяется конструкцией резистора и ограничивается возможностью электрического пробоя, который, как правило, происходит на поверхности между выводами резистора или между витками спиральной нарезки.

Напряжение пробоя зависит от длины резистора и давления воздуха. При длине резистора, не превышающей 5 см, оно определяется по формуле:

$$U_{\text{проб}} \cong 300 \sqrt{Pl}, \text{ где } p \text{ — давление, мм рт. ст.; } l \text{ — длина резистора, см.}$$

Значение предельного рабочего напряжения указывается в ТУ, оно всегда меньше напряжения пробоя. При испытании резисторов на них подают испытательное напряжение, которое больше $U_{\text{пред}}$ и меньше $U_{\text{проб}}$.

Маркировка резисторов регламентируется ГОСТ 13453-68, где постоянные резисторы стали обозначаться буквой С, а переменные — СП.

По конструкции токонесущей части резисторы были разделены на шесть групп:

- 1) непроволочные углеродистые или бороуглеродистые;
- 2) непроволочные металлопленочные или металлооксидные;
- 3) непроволочные тонкопленочные композиционные;
- 4) непроволочные объемные композиционные;
- 5) проволочные;
- 6) резисторы для сверхвысоких частот.

Для обозначений применяют следующую номенклатуру:

1) первый элемент — буквенный: Р — постоянный резистор, РП — переменный резистор, РН — набор резисторов;

2) второй элемент — цифра: 1 — непроволочный резистор, 2 — проволочный резистор;

3) третий элемент — цифра, обозначающая разновидность конструкции.

Например, Р2-15 означает: резистор постоянный, проволочный, 15-й вариант конструкции.

В конструкторской документации, кроме типа резистора, указывают номинальную мощность, номинальное сопротивление, допуск на сопротивление и ряд других параметров.

На принципиальных схемах резисторы изображают в виде прямоугольника с указанием сопротивления, мощности и порядкового номера.

Основные параметры резисторов указывают на его корпусе. Для миниатюрных резисторов ГОСТ предусматривает сокращенную буквенно-цифровую маркировку. При такой маркировке вместо запятой в наборе цифр, означающих номинальное значение сопротивления, ставят букву, указывающую, в каких единицах выражено сопротивление. Например: R (или E) — в омах, K — в килоомах, M — в мегаомах, G — в гигаомах, T — в тераомах; при этом ноль, стоящий до или после запятой, не ставят. После указания величины номинального сопротивления ставят букву, обозначающую допуск.

Также применяется международная система обозначений. Например, резистор с сопротивлением 0,47 кОм и допуском $\pm 20\%$ маркируют K47B или K47M.

Кроме буквенно-цифровой, применяется цветовая индексация номинального сопротивления и допуска на корпусе резистора (ГОСТ 28883-90). Вблизи одного из торцов корпуса наносят 4 цветные полосы: первая обозначает первую цифру номинала, вторая — вторую цифру номинала, третья — множитель; четвертая — величину допуска; цвет полосок стандартизован.

В зависимости от конкретных условий работы в РЭА применяются различные типы резисторов.

Непроволочные тонкослойные постоянные резисторы. У резисторов группы С1 токопроводящий слой представляет собой пленку пиролитического углерода, а у резисторов группы С2 — пленку сплава металла или оксида металла. Эти резисторы являются резисторами широкого применения с допусками $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ или $\pm 20\%$ и мощностью от 0,125 до 2 Вт. Кроме резисторов С1 и С2, к этой категории резисторов относятся резисторы типов МЛТ, МТ и ВС.

Поскольку металл обладает более высокой теплостойкостью, чем углерод, то резисторы С2 при равной мощности имеют меньшие, чем С1, габариты. Резисторы С2 обладают более высокой стабильностью при циклических изменениях температуры. Недостатками металлопленочных резисторов являются: небольшая стойкость к импульсной нагрузке и меньший частотный диапазон, чем у углеродистых. Объясняется это тем, что токопроводящий слой у металлопленочных резисторов толще, чем у углеродистых, поэтому увеличивается паразитная емкость между витками резистивной спирали.

На основе резисторов С2 создаются также прецизионные резисторы с допусками $\pm(0,1-1)$ %. Прецизионные резисторы имеют большие габариты, чем резисторы общего применения. Это облегчает тепловые режимы и повышает стабильность свойств проводящего слоя.

Композиционные резисторы. У этих резисторов токопроводящий материал получают путем смешивания проводящего компонента(графита или сажи) со связующими компонентами, наполнителем, пластификатором и отвердителем. В резисторах группы С3 полученную композицию наносят на поверхность изоляционного основания, а в резисторах группы С4 спрессовывают в виде объемного цилиндра или параллелепипеда. В зависимости от состава композиционные материалы имеют очень широкий диапазон удельных сопротивлений. Объемные композиционные резисторы С4 имеют прямоугольную форму и предназначены для установки на печатных платах. Они обладают высокой теплостойкостью (до 350 °С) и имеют небольшие габариты. Недостатком композиционных резисторов является высокий уровень токовых шумов, что объясняется крупнозернистой структурой проводящего материала.

Проволочные постоянные резисторы. Для изготовления этих резисторов используют провод из специальных сплавов, имеющих высокое удельное сопротивление, хорошую теплостойкость и малый температурный коэффициент сопротивления. Эти резисторы обладают очень высокой допустимой мощностью рассеивания (десятки ватт) при относительно

небольших размерах, высокой точностью и хорошей температурной стабильностью.

Так как резисторы этого типа изготавливают путем намотки провода на каркас, то они имеют большую индуктивность и собственную емкость. Для уменьшения индуктивности применяют бифилярную намотку, при которой обмотку резистора выполняют сдвоенным проводом, благодаря чему поля расположенных рядом витков направлены навстречу друг другу и вычитаются. Уменьшение индуктивности достигается также путем намотки на плоский каркас. Недостатком бифилярной намотки является большая собственная емкость. Для получения малых индуктивности и емкости применяют разбивку обмотки на секции, в каждой из которых поочередно меняется направление намотки.

Проволочные резисторы значительно дороже тонкопленочных, поэтому применяют их в тех случаях, когда характеристики тонкопленочных резисторов не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Высокочастотные резисторы и резисторы СВЧ. Эти резисторы обладают небольшими собственными индуктивностью и емкостью, что обеспечивается отсутствием спиральной нарезки, но при этом сопротивление не превышает 300 Ом. Однако это не является недостатком, так как на СВЧ высокие номиналы сопротивлений не применяют.

В ряде случаев высокочастотные резисторы изготавливают без проволочных выводов и эмалевого покрытия, что уменьшает паразитную индуктивность и шунтирующее действие диэлектрика. На сверхвысоких частотах применяют резисторы группы С6, способные работать на частотах до 10 ГГц.

К категории высокочастотных относятся также резисторы типов: С2-11, С2-34, МОН (металлооксидные незащищенные) и МОУ (металлооксидные ультравысокочастотные). На высоких частотах находят применение, кроме того, микропроволочные малогабаритные резисторы типа С5-32 Т, имеющие длину 6 мм, диаметр 2,6 мм и паразитную индуктивность не более 0,1 мкГн. Эти

резисторы имеют мощность 0,125 Вт и номинальное сопротивление от 0,24 до 300 Ом с точностью 0,5; 1; 2 и 5 %.

6.2 Конденсаторы

Принцип действия конденсаторов основан на способности накапливать электрические заряды на металлических обкладках при приложении к ним напряжения. Количественной мерой способности накапливать электрические заряды является емкость конденсатора.

В простейшем случае конденсатор представляет собой две металлические пластины, разделенные слоем диэлектрика. Емкость такого конденсатора [пФ]: $C = 0,0885 \varepsilon \cdot S \cdot d^{-1}$, где ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S - площадь обкладок конденсатора, [см²]; d - расстояние между обкладками, [см].

Конденсаторы широко используют в РЭА для самых различных целей. На их долю приходится примерно 25 % всех элементов принципиальной схемы. Конденсаторы делят на конденсаторы общего назначения и конденсаторы специального назначения.

Конденсаторы общего назначения делят на низкочастотные и высокочастотные. К конденсаторам специального назначения относят высоковольтные, помехоподавляющие, импульсные, дозиметрические, конденсаторы с электрически управляемой емкостью (варикапы, вариконды) и другие.

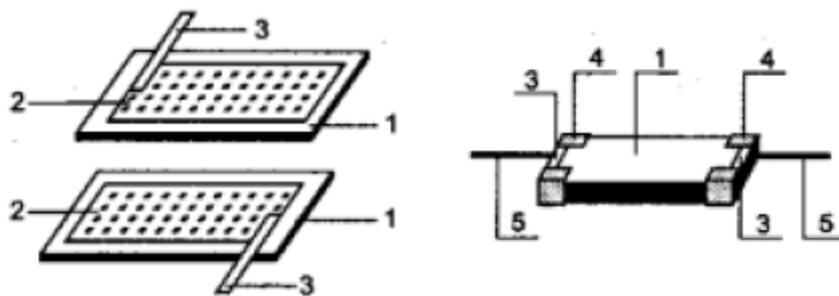
По назначению конденсаторы подразделяют на контурные, разделительные, блокировочные, фильтровые; а *по характеру изменения емкости* — на постоянные, переменные и полупеременные (подстроечные).

По материалу диэлектрика различают три вида конденсаторов: с твердым, газообразным и жидким диэлектриком.

По способу крепления различают конденсаторы для навесного и печатного монтажа, для микромодулей и микросхем. Рассмотрим типичные конструкции конденсаторов.

Пакетная конструкция применяется в слюдяных, стеклоэмалевых, стеклокерамических и некоторых типах керамических конденсаторов и

представляет собой пакет чередующихся металлических и диэлектрических пластин или тонких пленок. На рис. 6.7 показана конструкция слюдяного конденсатора.



1 — слюда; 2 — металлические обкладки; 3 — полоски фольги;
4 — обжимы; 5 — гибкие выводы

Рис.6.7. Конструкция слюдяного конденсатора

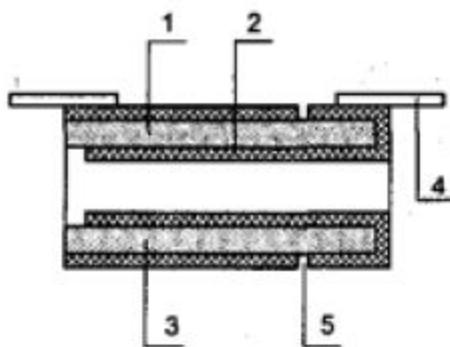
На пластины слюды 1 толщиной около 0,04 мм напыляют металлические обкладки 2, которые соединяются в общий контакт полосками фольги 3. Собранный пакет опрессовывается обжимками 4, к которым присоединяются гибкие выводы 5, и покрывается влагозащитной эмалью. Количество пластин в пакете достигает 100.

Емкость такого типа конденсатора зависит от числа пластин в пакете:

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

Трубчатая конструкция характерна для высокочастотных трубчатых конденсаторов и представляет собой керамическую трубку 1 с толщиной стенок около 0,25 мм, на внутреннюю и внешнюю поверхность которой нанесены серебряные обкладки 2 и 3 (рис.6.8).

Для присоединения гибких проволочных выводов 4 внутреннюю обкладку выводят на внешнюю поверхность трубки и создают между ней и внешней обкладкой изолирующий поясок 5. Снаружи на трубку наносят защитную пленку из изолирующего материала.



1 — керамическая трубка; 2 — серебряные обкладки; 3 — серебряные обкладки;
4 — проволочные выводы; 5 — изолирующий поясok

Рис.6.8. Трубчатая конструкция конденсатора

Емкость такого конденсатора:
$$C = 0,241 \frac{\epsilon l}{\lg \frac{D_2}{D_1}}$$

где l — длина перекрывающейся части обкладок; D_1 и D_2 — наружный и внутренний диаметры трубки соответственно.

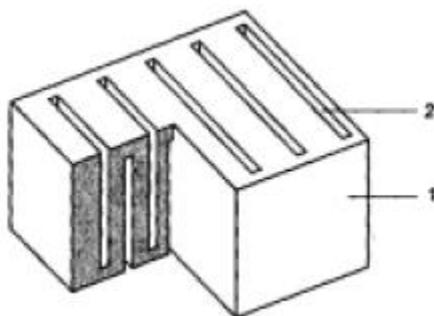
Дисковая конструкция характерна для высокочастотных керамических конденсаторов (рис.6.9). На керамический диск 1 с двух сторон наносят серебряные обкладки 2 и 3, к которым присоединяют гибкие выводы 4. Емкость такого конденсатора определяется площадью обкладок.

Литая секционированная конструкция характерна для монолитных многослойных керамических конденсаторов, получивших в последние годы широкое распространение, в том числе в ИМС (рис.6.10). Такие конденсаторы изготавливают путем литья горячей керамики, в результате которого получают керамическую заготовку 1 с толщиной стенок около 100 мкм и пазами 2 между ними, толщина которых составляет порядка 150 мкм. Затем эту заготовку обрабатывают серебряной пастой, которая заполняет пазы, после чего осуществляют вжигание серебра в керамику.



1 — керамический диск; 2 — серебряные обкладки;
3 — серебряные обкладки; 4 — гибкие выводы

Рис.6.9. Дисконная конструкция конденсатора

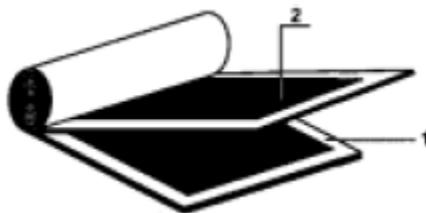


1 — керамическая заготовка; 2 — пазы

Рис.6.10. Литая секционированная конструкция конденсатора

В результате образуются две группы серебряных пластин, расположенных в пазах керамической заготовки, к которым припаивают гибкие выводы. Снаружи всю структуру покрывают защитной пленкой.

Рулонная конструкция характерна для бумажных пленочных низкочастотных конденсаторов, обладающих большой емкостью (рис.6.11). Бумажный конденсатор образуется путем свертывания в рулон бумажной ленты 1 толщиной около 6 мкм и ленты из металлической фольги 2 толщиной около 20 мкм. В металлобумажных конденсаторах вместо фольги применяют тонкую металлическую пленку толщиной менее 1 мкм, нанесенную на бумажную ленту.



1 — рулон бумажной ленты; 2 — лента из металлической фольги

Рис.6.11. Рулонная конструкция конденсатора

Рулон из чередующихся слоев металла и бумаги не обладает механической жесткостью и прочностью, поэтому его размещают в металлическом корпусе, являющемся механической основой конструкции.

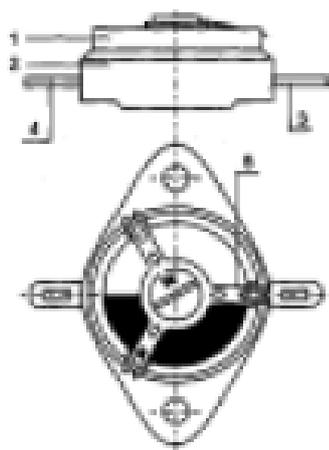
$$\text{Емкость таких конденсаторов} \quad C = 0,1768 \frac{\epsilon b l}{d}$$

где b — ширина ленты; l — длина ленты; d — толщина бумаги.

Емкость бумажных конденсаторов достигает 10 мкФ, а металлобумажных — 30 мкФ. Конденсаторы гибридных ИМС представляют собой трехслойную стру туру: на диэлектрическую подложку наносят металлическую пленку, затем диэлектрическую пленку и снова металлическую пленку.

В качестве конденсаторов полупроводниковых ИМС используют один из электронно-дырочных переходов транзистора под металл-диэлектрик-полупроводник -структуру. В этом случае роль нижней обкладки конденсатора выполняет полупроводниковая подложка, роль диэлектрика — слой оксида кремния, и роль верхней обкладки конденсатора — металлическая пленка.

Подстроечные (полупеременные) конденсаторы. Особенностью этих конденсаторов является то, что их емкость изменяется в процессе регулировки РЭА, а в процессе эксплуатации их емкость должна сохраняться постоянной и не изменяться под воздействием вибрации и ударов. Они могут быть с воздушным или твердым диэлектриком. На рис.6.12 показано устройство подстроечного конденсатора с твердым диэлектриком типа КПК (конденсатор подстроечный керамический).



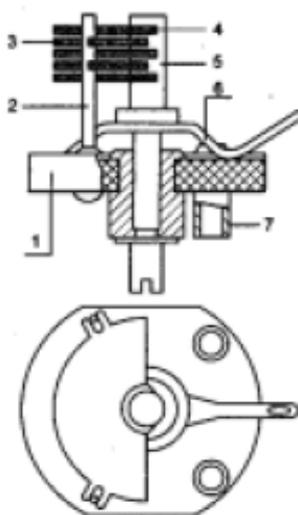
- 1 — ротор; 2 — статор; 3 — внешние выводы;
4 — внешние выводы; 5 — прижимная пружина

Рис.6.12. Подстроечный (полупеременный) конденсатор.

Такой конденсатор состоит из основания 2 (статора) и вращающегося диска 1 (ротора). На основание и диск напылены серебряные пленки полукруглой формы. При вращении ротора изменяется площадь перекрытия пленок, а следовательно, емкость конденсатора.

Как правило, минимальная емкость (когда пленки не перекрыты) составляет несколько пикофард, а при полном перекрытии пленок емкость конденсатора будет максимальной — несколько десятков пикофард. От ротора и статора сделаны внешние выводы 3 и 4. Плотное прилегание ротора к статору обеспечивается прижимной пружиной 5.

На рис.6.13 показано устройство подстроечного конденсатора с воздушным диэлектриком. На керамическом основании 1 установлены колонки 2 для крепления пластин статора 3. Пластины ротора 4 закреплены на оси ротора 5.



1 — керамическое основание; 2 — колонки; 3 — статор; 4 — пластины ротора;
5 — ось ротора; 6 — пружина для токосъема; 7 — колонка

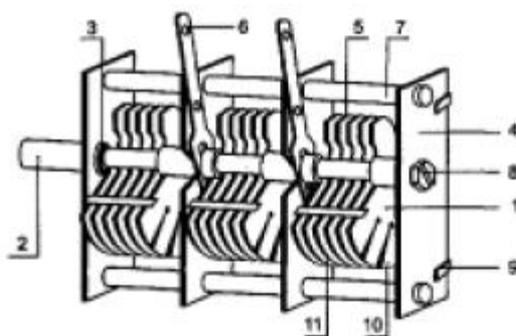
Рис.6.13. Подстроечный конденсатор с воздушным диэлектриком

Посредством пружины для токосъема 6 ротор подключается к соответствующим точкам принципиальной схемы. Крепление конденсатора осуществляется с помощью колонок 7, имеющих внутреннюю резьбу.

Конденсаторы переменной емкости. Емкость этих конденсаторов может плавно изменяться в процессе эксплуатации РЭА, например для настройки

колебательных контуров. Так же, как и подстроечный конденсатор, конденсатор переменной емкости состоит из статора и ротора, но, в отличие от подстроечного, количество роторных и статорных пластин велико, что необходимо для получения максимальной емкости порядка 500 пФ. Как правило, эти конденсаторы имеют воздушный диэлектрик.

На рис.6.14 показано устройство трехсекционного конденсатора переменной емкости. Каждая секция служит для настройки своего колебательного контура. Такие конденсаторы применяют в радиоприемной аппаратуре.



- 1 — роторная секция; 2 — ось ротора; 3 — шариковые подшипники;
 4 — корпус; 5 — статорная секция; 6 — пружины для токосъема;
 7 — валики крепления; 8 — подпятник; 9 — планка крепления;
 10 — разрезные пластины; 11 — неразрезные пластины

Рис.6.14. Устройство трехсекционного конденсатора переменной емкости

Конструктивной основой является корпус 4, содержащий валики крепления 7 и планку крепления 9, в котором размещены статорная и роторная секции. Статорная секция 5 изолирована от корпуса, а роторная секция 1 состоит из неразрезных (внутренних) пластин 11 и разрезных (внешних) пластин 10. Отгибая или подгибая часть сектора внешней пластины, можно изменять емкость в небольших пределах, что бывает необходимо в процессе заводской настройки аппаратуры. Роторные пластины закреплены на оси 2.

Плавность вращения оси обеспечивается шариковым подшипником 3 и подпятником 8. На корпусе конденсатора около каждой роторной секции

установлены специальные пружины-токосъемы 6, которые плотно прижимаются к ротору. Посредством токосъемов производится подключение роторных секций к соответствующим точкам схемы аппаратуры.

Основными параметрами конденсатора являются емкость и рабочее напряжение. Кроме того, свойства конденсаторов характеризуют рядом паразитных параметров.

Номинальные значения емкости $C_{\text{ном}}$ высокочастотных конденсаторов так же, как и номинальные значения сопротивлений, стандартизованы ГОСТом и определяются рядами E6, E12, E24 и так далее. Номинальные значения емкости электролитических конденсаторов определяются рядом: 0, 5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 300; 500; 1000; 2000; 5000 мкФ.

Номинальные значения емкости бумажных пленочных конденсаторов определяются рядом: 0,5; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 20; 20; 40; 60; 80; 100; 200; 400; 600; 800; 1000 мкФ. По отклонению от номинала конденсаторы разделяют на классы точности.

Конденсаторы I, II и III классов точности являются конденсаторами широкого применения и соответствуют рядам E24, E12 и E6. В зависимости от назначения в РЭА применяют конденсаторы различных классов точности. Блокировочные и разделительные конденсаторы обычно выбирают по II и III классам точности, контурные конденсаторы обычно имеют I, 0 или 00 классы точности, а фильтровые — IV, V и VI классы точности.

Электрическая прочность конденсаторов характеризуется значением напряжения пробоя и зависит в основном от изоляционных свойств диэлектрика. Все конденсаторы в процессе изготовления подвергают воздействию испытательного напряжения в течение 5 с. В технической документации указывают номинальное напряжение, то есть такое максимальное напряжение, при котором конденсатор может работать длительное время при соблюдении условий, указанных в технической документации. Для повышения надежности РЭА конденсаторы используют при напряжении, которое меньше номинального.

Стабильность емкости определяется ее изменением под воздействием внешних факторов. Наибольшее влияние на емкость оказывает температура. Ее влияние оценивают *температурным коэффициентом емкости (ТКЕ)*:

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta T}$$

Изменение емкости обусловлено изменением линейных размеров обкладок конденсатора и диэлектрика, но в основном изменением диэлектрической проницаемости диэлектрика. У высокочастотных конденсаторов величина ТКЕ не зависит от температуры и указывается на корпусе конденсатора методом окраски корпуса в определенный цвет и нанесения цветной метки. У низкочастотных конденсаторов температурная зависимость емкости носит нелинейный характер. Температурную стабильность этих конденсаторов оценивают величиной предельного отклонения емкости при крайних значениях температуры. Низкочастотные конденсаторы разделены на три группы по величине температурной нестабильности: Н20 — $\pm 20\%$; Н30 — $\pm 30\%$; Н90 — $\pm 50 - 90\%$.

Стабильность конденсаторов во времени характеризуется

коэффициентом старения:

$$\beta = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta t}$$

Потери энергии в конденсаторах обусловлены электропроводностью и поляризацией диэлектрика. Их характеризуют тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Конденсаторы с керамическим и слюдяным диэлектриком имеют $\text{tg}\delta = 10^{-4}$, с бумажным диэлектриком — $\text{tg}\delta = 10^{-2}$, с оксидным диэлектриком — $\text{tg}\delta = 10^{-1}$.

В настоящее время принята система обозначений конденсаторов постоянной емкости, состоящая из ряда элементов: на первом месте стоит буква К, на втором — двузначное число, первая цифра которого характеризует тип диэлектрика, а вторая — особенности диэлектрика или эксплуатации, затем через дефис указывается порядковый номер разработки.

Например, обозначение К10-17 означает керамический низковольтный конденсатор с порядковым номером разработки 17. Кроме того, применяют

обозначения, указывающие на конструктивные особенности: КСО — конденсатор слюдяной опрессованный, КЛГ — конденсатор литой герметизированный, КТ — керамический трубчатый и так далее.

Подстроечные конденсаторы обозначают буквами КТ, переменные — буквами КП. Затем следует цифра, указывающая тип диэлектрика: 1 — вакуумные; 2 — воздушные; 3 — газонаполненные; 4 — твердый диэлектрик; 5 — жидкий диэлектрик. В конструкторской документации, кроме типа конденсатора, указывают емкость, рабочее напряжение и ряд других параметров.

Например, обозначение КП2 означает конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, а обозначение КТ4 — подстроечный конденсатор с твердым диэлектриком.

На принципиальных схемах конденсаторы обозначают в виде двух параллельных черточек и дополнительных элементов; около конденсатора ставится буква С с порядковым номером конденсатора, например С26, и указывается емкость. Около подстроечных и переменных конденсаторов указывают минимальную и максимальную емкости. Например, обозначение 5...25 означает, что емкость изменяется от 5 до 25 пФ. На корпусе конденсатора указывают его основные параметры.

В малогабаритных конденсаторах применяют сокращенную буквенно-кодировую маркировку. При емкости конденсатора менее 100 пФ ставят букву П. Например, 33П означает, что емкость конденсатора составляет 33 пФ. Если емкость находится в пределах от 100 пФ до 0,1 мкФ, то ставят букву Н (нанофарада). Например, 10Н означает емкость в 10 нФ или 10 000 пФ. При емкости более 0,1 мкФ ставят букву М, например, 10М означает емкость в 10 мкФ. Слитно с обозначением емкости указывают буквенный индекс, характеризующий класс точности. Для ряда Е6 с точностью $\pm 20\%$ ставят индекс В, для ряда Е12 — индекс С, а для ряда Е24 — индекс И. Например, маркировка 1Н5С означает конденсатор емкостью 1,5 нФ (1500 пФ), имеющий отклонение от номинала $\pm 10\%$.

РЭА применяют большое количество различных типов конденсаторов постоянной емкости. Рассмотрим их основные особенности.

Керамические конденсаторы. Эти конденсаторы широко применяют в высокочастотных цепях. Основной конструкции керамического конденсатора является заготовка из керамики, на две стороны которой нанесены металлические обкладки. Конструкция может быть секционированной, трубчатой или дисковой. Эти конденсаторы нетрудоемки в изготовлении и дешевы.

Для изготовления конденсаторов применяют керамику с различными значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon > 8$) и температурного коэффициента, который может быть как положительным, так и отрицательным. Численные значения ТКЕ находятся в пределах от $1/^\circ\text{C}$ до $+100 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Применяя параллельное включение конденсаторов с разными знаками ТКЕ, можно получить достаточно высокую стабильность результирующей емкости.

Промышленность в настоящее время выпускает несколько разновидностей керамических конденсаторов:

КЛГ — керамические литые герметизированные;

КЛС — керамические литые секционированные;

КМ — керамические малогабаритные пакетные;

КТ — керамические трубчатые;

КТП — керамические трубчатые проходные;

КО — керамические опорные;

КДУ — керамические дисковые;

КДО — керамические дисковые опорные.

Новые разработки керамических конденсаторов обозначают К10, они предназначены для использования в качестве компонентов микросхем и микросборок. Конденсаторы типа К15 могут работать при напряжениях более 1600 В.

Стекланные, стеклокерамические и стеклоэмалевые конденсаторы. Эти конденсаторы, как и керамические, относят к категории высокочастотных. Они

состоят из тонких слоев диэлектрика, на которые нанесены тонкие металлические пленки.

Для придания конструкции монолитности такой набор спекают при высокой температуре. Эти конденсаторы обладают высокой теплостойкостью и могут работать при температуре до 300 °С.

Существуют три разновидности таких конденсаторов:

- 1) К21 — стеклянные;
- 2) К22 — стеклокерамические;
- 3) К23 — стеклоэмалевые.

Стеклокерамика имеет более высокую диэлектрическую проницаемость, чем стекло. Стеклоэмаль обладает более высокой электрической прочностью.

Слюдяные конденсаторы. Эти конденсаторы имеют пакетную конструкцию, в которой в качестве диэлектрика используют слюдяные пластинки толщиной от 0,02 мм до 0,06 мм, диэлектрическая проницаемость которых $\epsilon = 6$, а тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 10^{-4}$. В соответствии с принятой в настоящее время маркировкой их обозначают К31.

В РЭА применяют также ранее разработанные конденсаторы КСО — конденсаторы слюдяные опрессованные. Емкость этих конденсаторов лежит в пределах от 51 пФ до 0,01 мкФ. Слюдяные конденсаторы применяют в высокочастотных цепях.

Бумажные конденсаторы. В этих конденсаторах в качестве диэлектрика применяют конденсаторную бумагу толщиной от 6 мкм до 10 мкм с невысокой диэлектрической проницаемостью, поэтому габариты этих конденсаторов большие. Обычно бумажные конденсаторы изготавливают из двух длинных, свернутых в рулон лент фольги, изолированных конденсаторной бумагой, то есть конденсаторы имеют рулонную конструкцию.

Из-за больших диэлектрических потерь и наличия собственной индуктивности эти конденсаторы нельзя применять на высоких частотах. В соответствии с принятой маркировкой бумажные конденсаторы обозначают К40 или К41.

Разновидностью бумажных конденсаторов являются металlobумажные (типа К42), у которых в качестве обкладок вместо фольги используют тонкую металлическую пленку, нанесенную на конденсаторную бумагу, благодаря чему уменьшаются габариты конденсатора.

Электролитические конденсаторы. В этих конденсаторах в качестве диэлектрика используют тонкую оксидную пленку, нанесенную на поверхность металлического электрода, называемого анодом. Второй обкладкой конденсатора является электролит. В качестве электролита используют концентрированные растворы кислот и щелочей. По конструктивным признакам эти конденсаторы делят на четыре типа: жидкостные, сухие, оксидно-полупроводниковые и оксидно-металлические.

В жидкостных конденсаторах анод, выполненный в виде стержня, на поверхности которого создана оксидная пленка, погружен в жидкий электролит, находящийся в алюминиевом цилиндре. Для увеличения емкости анод делают объемно-пористым путем прессования порошка металла и спекания его при высокой температуре.

В *сухих* конденсаторах применяют вязкий электролит. В этом случае конденсатор изготавливают из двух лент фольги (оксидированной и неоксидированной), между которыми размещается прокладка из бумаги или ткани, пропитанной электролитом. Фольга сворачивается в рулон и помещается в кожух. Выводы делают от оксидированной (анод) и неоксидированной (катод) фольги.

В *оксидно-полупроводниковых* конденсаторах в качестве катода используют диоксид марганца. В оксидно-металлических конденсаторах функции катода выполняет металлическая пленка оксидного слоя. Особенностью электролитических конденсаторов является их униполярность, то есть они могут работать при подведении к аноду положительного потенциала, а к катоду — отрицательного. Поэтому их применяют в цепях пульсирующего напряжения, полярность которого не изменяется, например, в фильтрах питания.

Электролитические конденсаторы обладают очень большой емкостью (до тысячи микрофарад) при сравнительно небольших габаритах. Но они не могут работать в высокочастотных цепях $tg\delta$, так как из-за большого сопротивления электролита достигает значения 1,0. Поскольку при низких температурах электролит замерзает, то в качестве параметра электролитических конденсаторов указывают *минимальную температуру*, при которой допустима работа конденсатора.

По допустимому значению отрицательной температуры электролитические конденсаторы делят на четыре группы:

- 1) Н (неморозостойкие, $T_{min} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- 2) М (морозостойкие, $T_{min} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- 3) ПМ (с повышенной морозостойкостью, $T_{min} = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- 4) ОМ (особо морозостойкие, $T_{min} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$).

При понижении температуры емкость конденсатора уменьшается, а при повышении температуры — возрастает.

Пленочные конденсаторы. В этих конденсаторах в качестве диэлектрика используют синтетические высокомолекулярные тонкие пленки. Современная технология позволяет получить пленки, наименьшая толщина которых составляет 2 мкм, механическая прочность 1000 кг/см, а электрическая прочность достигает 300 кВ/мм. Такие свойства пленок позволяют создавать конденсаторы очень малых габаритов. Конструктивно они аналогичны бумажным конденсаторам и относятся к 7-й группе.

Конденсаторы типа К71 в качестве диэлектрика имеют полистирол. В конденсаторах типа К72 применен фторопласт, в конденсаторах К73 — полиэтилентерефталат. В конденсаторах К75 применено комбинированное сочетание полярных и неполярных пленок, что повышает их температурную стабильность.

В конденсаторах К76 в качестве диэлектрика применена тонкая лаковая пленка толщиной около 3 мкм, что существенно повышает их удельную емкость. Высокими значениями удельной емкости и температурной

стабильности обладают конденсаторы К77, в которых в качестве диэлектрика применен поликарбонат.

В качестве обкладок в пленочных конденсаторах используют либо алюминиевую фольгу, либо напыленные на диэлектрическую пленку тонкие слои алюминия или цинка. Корпус таких конденсаторов может быть как металлическим, так и пластмассовым и иметь цилиндрическую или прямоугольную форму.

Вариконды. Это конденсаторы, емкость которых зависит от напряженности электрического поля. Они выполняются на основе сегнетоэлектриков (титаната бария, стронция, кальция). Для таких конденсаторов характерны высокие значения относительной диэлектрической проницаемости и ее сильная зависимость от напряженности электрического поля и температуры.

Применяют вариконды как элементы настройки колебательных контуров. Если вариконд включить в цепь резонансного LC-контура и изменять постоянное напряжение, подводимое к нему от источника, имеющего высокое внутреннее сопротивление (оно необходимо для того, чтобы источник не ухудшал добротность колебательного контура), то можно изменять резонансную частоту этого контура.

Варикапы. Это одна из разновидностей полупроводникового диода, к которому подводится обратное напряжение, изменяющее емкость диода. Благодаря малым размерам, высокой добротности, стабильности и значительному изменению емкости варикапы нашли широкое применение в РЭА для настройки контуров и фильтров.

6.3 Катушки индуктивности

Катушкой индуктивности называют изделие, обладающее сосредоточенной индуктивностью и используемое в цепях частотной селекции.

Высокочастотной катушкой индуктивности (ВКИ) называется свернутый в спираль (изолированный) проводник, обладающий в области высоких частот (0.1...400 МГц) значительным индуктивным сопротивлением при относительно малом активном и ёмкостном сопротивлении.

В зависимости от **назначения** ВКИ делятся на три вида: катушки контуров, катушки связи и дроссели высокой частоты.

Катушки контуров предназначены для работы в колебательных контурах входных цепей приемников, в узкополосных и широкополосных фильтрах, в промежуточных цепях и оконечных каскадах передающих устройств, в задающих генераторах и других функциональных устройствах. Конструктивно катушки контуров могут быть выполнены с постоянной индуктивностью или с переменной – вариометры.

Катушки связи используются для передачи энергии от антенного устройства во входной каскад приемника, от выходного каскада передатчика к антенне, а также для связи отдельных цепей различных каскадов в РЭА.

Дроссели высокой частоты – это катушки индуктивности, используемые для увеличения реактивного сопротивления высокочастотных апериодических цепей и для ограничения токов высокой частоты. Основным назначением дросселей высокой частоты является фильтрация высокочастотных составляющих тока.

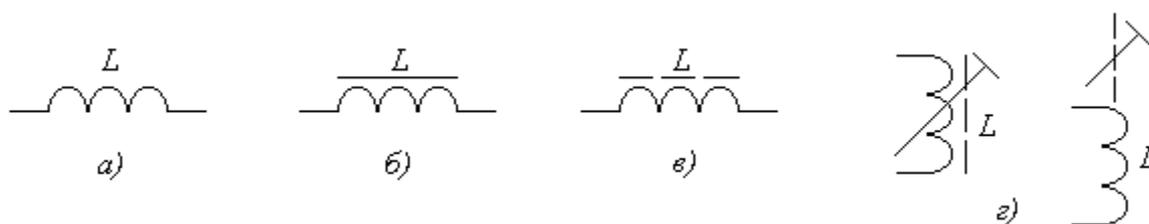
По назначению дроссели можно разделить на фильтровые и корректирующие. Фильтровые используются в фильтрах цепей питания на высоких частотах. Корректирующие используются в цепях коррекции амплитудно-фазовых характеристик в области высоких частот.

По конструктивному признаку ВКИ можно разделить на:

- однослойные и многослойные;
- секционированные и несекционированные;
- цилиндрические, кольцевые (тороидальные) и спиральные (плоские, печатные);
- катушки без сердечников, с магнитными сердечниками и с немагнитными сердечниками.

По виду защиты ВКИ можно разделить на катушки экранированные и не экранированные.

В электрических схемах катушки индуктивности и высокочастотные дроссели условно обозначаются согласно ГОСТ 2.723-68. Наиболее часто встречающиеся общие обозначения приведены на рисунке 6.15.



а – без сердечника; б – с ферромагнитным сердечником без зазора;
 в – с магнитодиэлектрическим сердечником (с распределенным немагнитным зазором); г – с подстраиваемым магнитодиэлектрическим сердечником

Рис.6.15. Условные обозначения катушек индуктивности

Для создания катушек индуктивности используется эффект взаимодействия магнитного поля и переменного тока. Коэффициент пропорциональности между переменным напряжением и током с учетом частоты ω имеет смысл реактивного сопротивления $j\omega L$, где L – коэффициент пропорциональности. Для увеличения индуктивности провод, по которому протекает ток, наматывают в виде катушки. При этом добавляется взаимная индуктивность между витками и индуктивное сопротивление, т. е. значение L увеличивается. Индуктивность является основным параметром катушки.

Катушки используются в РЭА как дроссели для перераспределения переменного тока по цепям и создания индуктивной связи между цепями. При их использовании вместе с конденсаторами образуются колебательные контуры, входящие в состав фильтров и генераторов высокочастотных колебаний. Следует подчеркнуть, что под катушками индуктивности будем понимать те индуктивные элементы, которые работают в диапазоне радиочастот примерно от 100 кГц и выше.

В катушке индуктивности помимо основного эффекта – индуктивности – наблюдаются и паразитные. Схема замещения (рис. 6.16) катушки отображает ее основные свойства и содержит не только основной параметр, индуктивность L , но и ряд дополнительных: индуктивность выводов (учтены в L);

собственную емкость, обусловленную наличием обмотки, выводов, сердечника и экрана C_L ; сопротивление, отображающее потери в емкости R_C ; сопротивление, зависящее от потерь в катушке R_L . C_L с L образует параллельный резонансный контур. Его резонансная частота $f_0 = 1/2\pi (LC_0)^{1/2}$, эквивалентная схема контура показана на рис. 6.17.

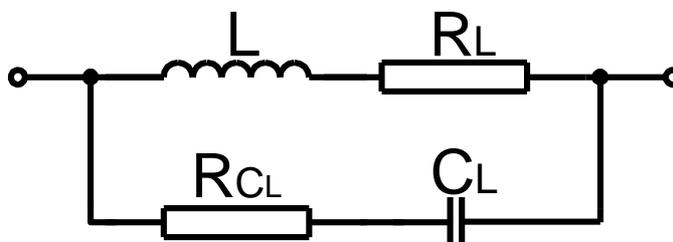


Рис.6.16.Схема замещения катушки

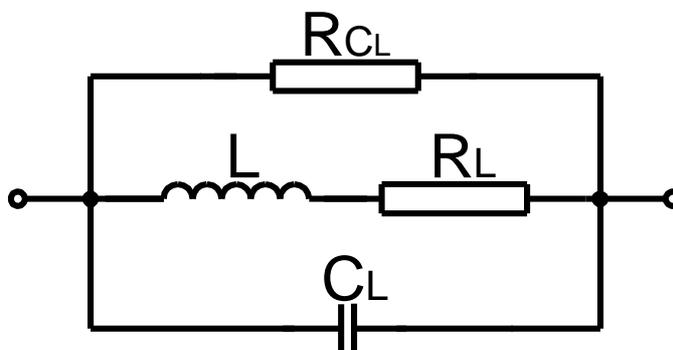


Рис.6.17. Эквивалентная схема контура

В зависимости от конструкции катушки индуктивности делятся на каркасные и бескаркасные, одно- и многослойные, экранированные и неэкранированные, с магнитными сердечниками (с ферритовыми сердечниками) и без них (рис. 6.18). Важное достоинство катушек индуктивности с сердечниками – возможность подстройки (изменение индуктивности катушки индуктивности в определенных пределах путем изменения параметров сердечника). Катушки индуктивности применяются в качестве одного из основных элементов электрических фильтров и колебательных контуров, накопителя электрической энергии и др.

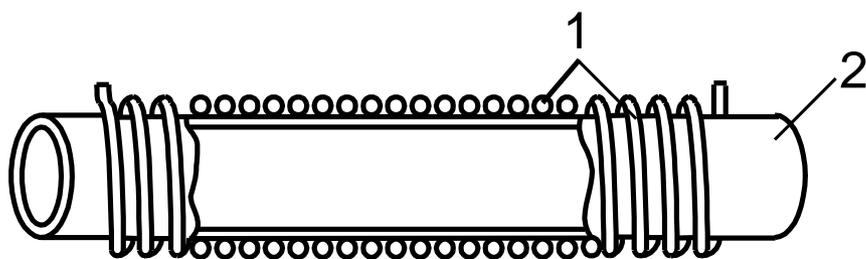


Рис.6.18. Цилиндрическая однослойная катушка индуктивности

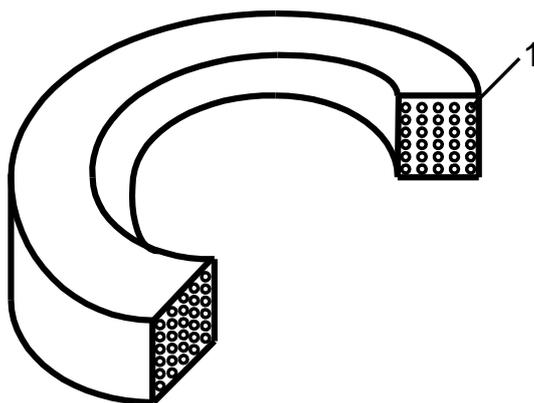


Рис.6.19. Тороидальная многослойная катушка индуктивности с сечением

– квадрат

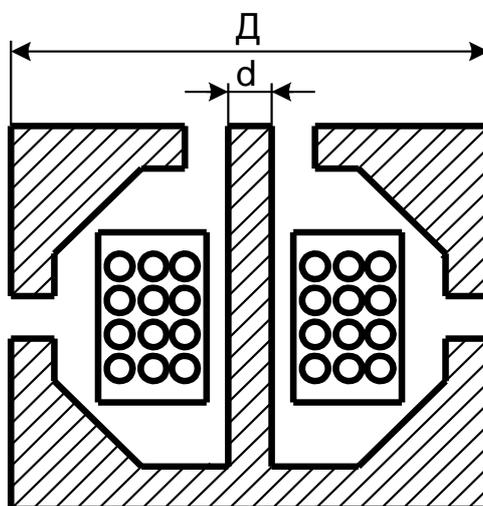


Рис.6.20. Катушка индуктивности с цилиндрическим сердечником

(броневая)

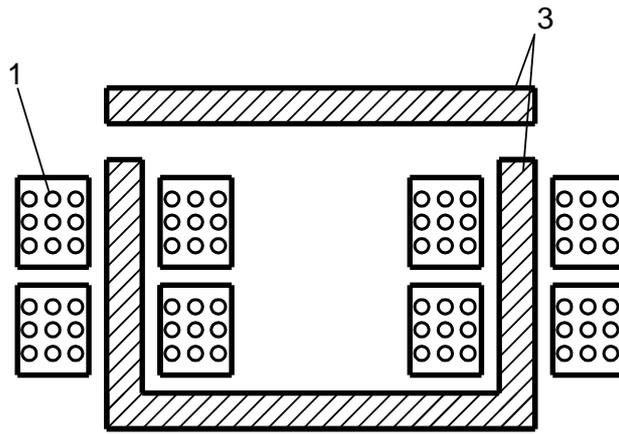


Рис.6.21. Катушка индуктивности с П-образным сердечником

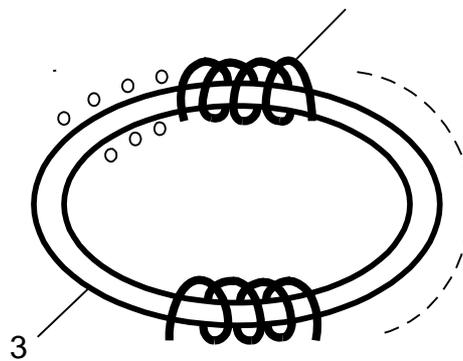


Рис.6.22. Образцовая индуктивность на керамическом тороиде

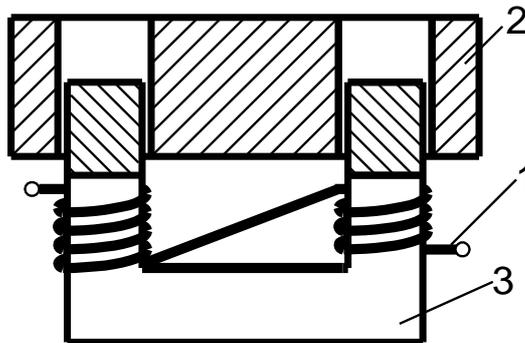


Рис.6.23. Вариометр – катушка с регулируемой индуктивностью и поступательным перемещением сердечника 1 - обмотка; 2 - каркас; 3 - сердечник;

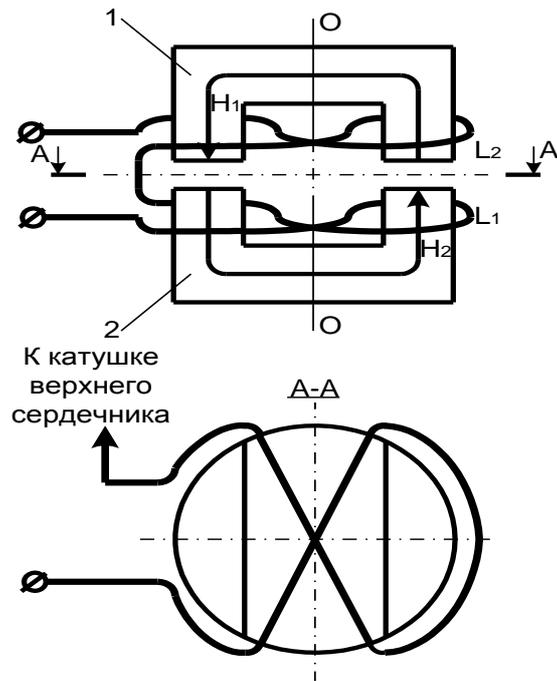


Рис.6.24. Вариометр с вращающимся сердечником 1 – ротор; 2 – статор.

Индуктивность катушки, мкГн, может быть рассчитана по формулам:

$$L=L_0W^2D \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Для однослойной катушки $L_0 = f(l_n/D)$, где l_n – длина намотки, см; $D_{cp} = D_k + d$ – средний диаметр витка, см; D_k – диаметр каркаса; d – диаметр провода; W – количество витков.

Для многослойной катушки: $L_0 = f(l_n/D_{cp})$ и $L_0 = f(b/D_{cp})$, где D – наружный диаметр катушки, см; D_{cp} – средний диаметр катушки, см; D_k – диаметр каркаса, см; b – глубина намотки, см.

Важным параметром катушки при ее применении в колебательных контурах является добротность, характеризующая относительный уровень активных потерь в ее обмотке, собственной емкости, сердечнике и экране:

$$Q = \omega L / R_L$$

Свойства катушки при изменении температуры описываются температурным коэффициентом индуктивности α_L , который определяется выражением

$$\alpha_L = \frac{dL \cdot I}{dT \cdot L_{OT}}$$

Индуктивность при температуре T определяется выражением

$$L(T) = L_{OT} [1 + \alpha_L(T - T_0)]$$

где T – температура; L_{OT} – индуктивность при номинальной температуре; T_0 – номинальная температура.

Изменение параметров во времени (старение) характеризуется коэффициентом старения

$$\beta_L = (dL / dt) (1 / L_0),$$

где t – время; L_0 – индуктивность непосредственно после изготовления катушки.

Индуктивность после длительной работы быть определена из выражения

$$L(t) = L_0 (1 + \beta_L t)$$

Большое значение имеют также конструктивные параметры: надежность, габариты, масса, диапазон температур, влагостойкость, устойчивость против механических воздействий, а также технологичность катушки, возможность ее изготовления с использованием высокопроизводительных методов, стоимость, согласованность ее конструкции с ИС и возможность изготовления катушек методами микроэлектроника. Конструкция и параметры катушки существенно зависят от использования в ней сердечника с высокой магнитной проницаемостью.

При применении катушек в контурах большое значение имеет стабильность индуктивности. Наиболее высокой стабильностью обладают однослойные катушки без сердечников. Рассмотрим, чем она определяется.

Из (3) следует, что стабильность индуктивности однослойной катушки зависит от изменения диаметра каркаса при воздействии температуры. Однако при оценке температурной стабильности необходимо учитывать также то, что в высокочастотных катушках в результате поверхностного эффекта ток протекает не по всему сечению провода, а по той части, которая примыкает к каркасу. Положим, что толщина слоя, используемая током, будет взята такой же, как толщина поверхностного (скин-) слоя в проводе

$$\chi_{\text{эф}} = 0,5 \sqrt{\frac{\rho}{\phi}}$$

где $\rho=10^{-6}$ Ом·м – удельное сопротивление; ϕ – частота, МГц; $\chi_{эф}$ – глубина, на которой ток падает до 0,37 его значения на поверхности проводника, мм.

Эффективный диаметр витка

$$D_{эф} \approx D_k + 2\chi_{эф}.$$

На рисунке 6.26 показана конструкция высокочастотной катушки (1 – каркас из материала с малым температурным коэффициентом линейного расширения; 2 – виток).

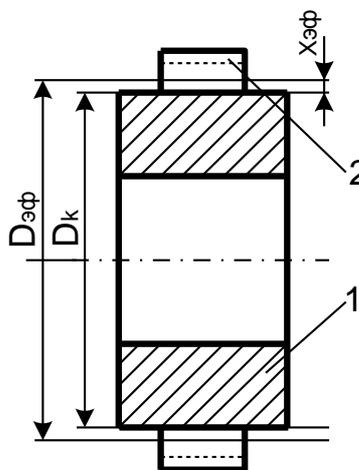


Рис. 6.26. Конструкция высокочастотной катушки

Катушки без сердечников мало пригодны для микроминиатюризации, так как уменьшение диаметра каркаса катушки приводит к необходимости увеличения количества витков. Поэтому для улучшения характеристик катушки используют сердечники с высокой проницаемостью и малыми потерями на радиочастоте.

Первоначально в качестве материала для таких сердечников использовалось карбонильное железо, затем альсифер, а в настоящее время все шире применяются ферриты. Введение сердечника позволяет уменьшить количество витков при той же индуктивности.

Если предположить, что в сердечнике нет потерь, то добротность катушки с сердечником Q_c увеличится в $\sqrt{\mu_c}$ раз: $Q_c = Q_{б/с} \sqrt{\mu_c}$, где $Q_{б/с}$ – добротность катушки без сердечника той же индуктивности; μ_c – действующая магнитная проницаемость.

Основным методом повышения проницаемости сердечника является придание ему такой формы, при которой магнитные силовые линии практически полностью проходят путь по магнитному материалу с высокой проницаемостью. Это, например, броневой сердечник, индуктивность катушки с сердечником с зазором: $L_c = 12,6 \cdot 10^{-3} S_c W^2 \mu_c / l_c = 12,6 S_c W^2 \mu_n \cdot 10^{-3} / l_c (1 + \mu_n l_3 / l_c)$, где S_c – площадь сечения сердечника.

В гибридных микросхемах могут использоваться миниатюрные катушки индуктивности с сердечниками из ферритов. Их добротность порядка 50, они по габаритам должны быть совместимы с корпусами гибридных микросхем до 10 мм и меньше.

Индуктивность тороидальной катушки с магнитным сердечником прямоугольного сечения

$$L = 4,6 \cdot \mu_c a n^2 \cdot 10^{-4} \lg[(D_{cp} + b)/(D_{cp} - b)],$$

где n – число витков; a и b – высота и ширина сечения сердечника, мм; D_{cp} – средний диаметр сердечника, мм.

Тонкопленочные катушки индуктивности имеют ограниченный частотный диапазон (10-100 МГц).

Поэтому тонкопленочные катушки обычно имеют на площади 1 см² число витков не более 10 и выполняются в виде круглой или квадратной спирали (рисунок 7а,б). Индуктивность таких катушек определяют по формулам:

$$L = 24,75 D_{cp} N^{5/3} \lg D_{cp} \cdot 10^{-3} / t$$

$$L = 55,5 N^{5/3} \lg 8a \cdot 10^{-3} / t'$$

где $D_{cp} = (D_n + D_e)/2$ – средний диаметр спирали, см; $a = (A_n + A_e)/2$ – средняя длина стороны квадрата, см; $t = (D_n + D_e)/2$ и $t' = (A_n + A_e)/2$ – радиальная ширина намотки, см.

Тонкопленочные катушки обладают низкой добротностью ($Q = 20 ? 30$) и поэтому используются только в тех случаях, когда другие варианты технически невозможны.

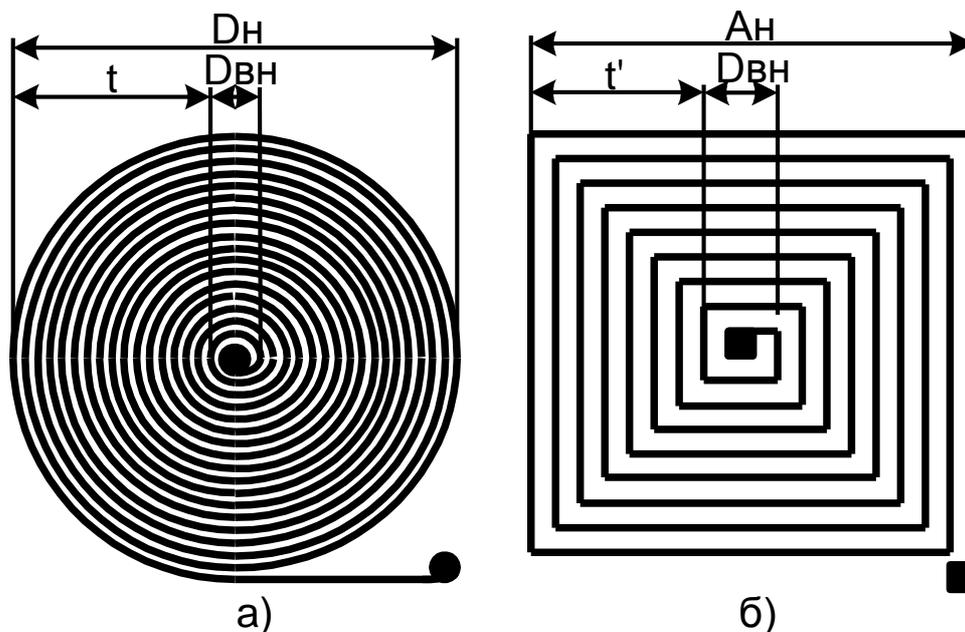


Рис.7а,б. Тонкопленочные катушки индуктивности:
а – круглая;б – квадратная.

Дроссель электрический – катушка индуктивности, включаемая в электрическую цепь последовательно с нагрузкой для устранения (подавления) или ограничения переменной составляющей тока различной частоты. Реактивное сопротивление

$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

где f – частота; ω – циклическая частота; L – индуктивность;

Дроссели обычно имеют сердечник (электротехническая сталь).

Применяются преимущественно в электрических фильтрах.

Дроссель высокой частоты – это катушка индуктивности, включаемая в цепь тока высокой частоты для увеличения ее сопротивления. При этом значение постоянного тока или тока низкой частоты не изменяется. Дроссели применяются в цепях фильтрации питания усилителей высокой частоты. Для повышения заградительных свойств дроссель должен обладать значительной по сравнению с контурной катушкой индуктивностью и весьма малой емкостью. Резонансная частота дросселя должна быть гораздо больше частоты выделяемого в контуре рабочего сигнала. В этом случае при индуктивности порядка сотен микрогенри дроссель должен быть эффективен в развязывающих цепях контуров УВЧ. Конструктивно дроссели высокой частоты выполняют

намоткой на любой каркас, например, на основания непроволочных резисторов, в виде однослойных сплошных катушек либо катушек типа "универсаль". Дроссели, выпускаемые промышленностью, намотаны на ферритовые стержни и опрессованы пластмассой, их индуктивность сотни микрогенри – единицы миллигенри.

Низкочастотные дроссели, в большинстве случаев предназначенные для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения в телевизорах, радиоприемниках, передатчиках и других устройствах, входят в состав сглаживающих и низкочастотных LC -фильтров. Сопротивление дросселя постоянному току весьма мало и равно омическому сопротивлению провода обмотки. Сопротивление дросселя переменному току

$$Z = 2\pi fL$$

(где f – частота питающей сети 50 или 400 Гц или пульсаций 100 или 800; L – индуктивность дросселя в Гн) составляет несколько единиц – десятков кОм и зависит от требуемого уровня допустимых пульсаций.

В управляемых дросселях, наоборот, используется свойство магнитного материала изменять свое сопротивление переменному току при изменении рабочей точки магнитной характеристики.

ТЕМА 7. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный прибор с одним или несколькими электрическими переходами и двумя выводами для подключения к внешней цепи. Принцип действия большинства диодов основан на использовании физических явлений в электрических переходах.

Диоды классифицируются: по материалу (селеновые, германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые); структуре перехода (точечные, плоскостные); назначению (выпрямительные, импульсные, стабилитроны и т.д.); диапазону частот (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные диоды (СВЧ-диоды)); виду вольт-амперной характеристики и т.д.

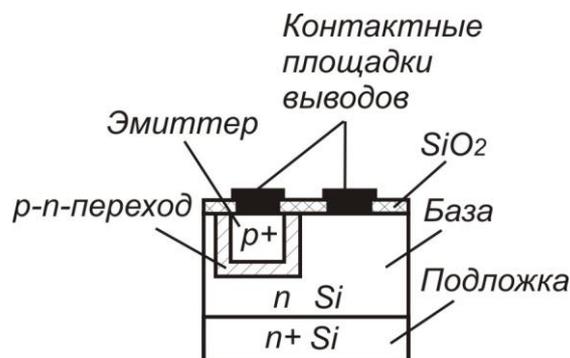


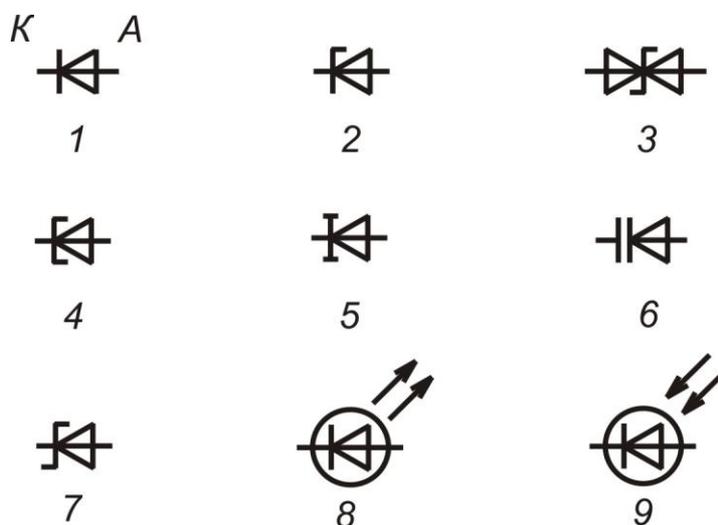
Рис. 7.1

В зависимости от технологических процессов, используемых при изготовлении диодов, различают: микросплавные, сплавные, диффузионные, планарно-эпитаксиальные диоды и их разновидности. Устройство полупроводникового диода, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии, приведено на рис. 7.1. Вся структура с электрическим переходом заключается в металлический, стеклянный, керамический или пластмассовый корпус для исключения влияния окружающей среды.

Система обозначений полупроводниковых диодов. Для маркировки полупроводниковых диодов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.919-81.

Первый элемент – буква или цифра, характеризует используемый материал: Г(1) – германий (Ge); К(2) – кремний (Si); А(3) – галлий (Ga) и его соединения; И(4) – индий In и его соединения. Второй элемент – буква, характеризует функциональное назначение диода: Д – выпрямительный; В – варикап; И – туннельный и обращенный; С – стабилитрон и стабистор; Л – излучающий светодиод. Третий элемент – цифра, характеризует назначение диода и содержит информацию о специальных параметрах диода. Например, для диодов группы Д: 1 – выпрямительные маломощные (ток до 300 мА); 2 – выпрямительные средней мощности (ток до 10 А); 3 – диоды большой мощности (ток свыше 10 А); 4–9 – диоды импульсные с различным временем восстановления. Четвертый элемент (2–3 цифры) – порядковый номер разработки (для стабилитрона – напряжение стабилизации в десятых долях вольта). Пятый элемент – буква, характеризует группу диодов с различными параметрами.

Условные графические обозначения полупроводниковых диодов на схемах электрических принципиальных представлены на рис. 7.2. Выводы диода называются катод и анод. *Катод* – вывод прибора, через который ток вытекает во внешнюю цепь. *Анод* – вывод прибора, через который ток втекает в прибор из внешней цепи.



1 – общее обозначение (выпрямительный, импульсный, высокочастотный диод); 2 – стабилитрон; 3 – двуханодный стабилитрон; 4 – туннельный диод; 5 – обращенный диод; 6 – варикап; 7 – диод Шотки; 8 – светодиод; 9 – фотодиод

Рис. 7.2

Вольт-амперная характеристика, пробой и общие параметры диодов.

Зависимость тока, протекающего через диод, от величины и полярности приложенного к его выводам внешнего напряжения называется ВАХ диода:

$$I(U) = I_0(T) \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) = I_0(T) \left(e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1 \right), \quad (7.1)$$

где $\phi_T = kT/q$ – тепловой потенциал, равный 26 мВ при $T=300$ К; $I_0(T)$ – обратный ток насыщения, сильно зависящий от температуры. Уравнение (3.9) называют *теоретической, или идеализированной, ВАХ диода*. В нем не учтено *последовательное сопротивление потерь диода*, т.е. суммарное эквивалентное активное сопротивление кристалла, омических контактов и выводов диода r_{Π} .

С учетом этого сопротивления реальная ВАХ диода имеет вид

$$I(U) = I_0 \left(e^{\frac{q(U - r_{II})}{kT}} - 1 \right). \quad (7.2)$$

На рис. 7.3 изображены реальная ВАХ (сплошная линия) и теоретическая ВАХ (пунктирная линия). Из-за существенного различия значений прямого и обратного токов и напряжений прямые и обратные ветви ВАХ выполнены в различном масштабе. Прямая ветвь реальной ВАХ, как следует из (7.2), сдвинута в сторону больших значений прямых напряжений при $I_{пр} = \text{const}$. Различие между теоретической и реальной ВАХ в области обратных напряжений обусловлено неучтенной в (3.9) и (3.10) тепловой генерацией носителей заряда в обедненном слое. С ростом обратного напряжения $U_{обр}$ ширина δ , а значит, и объем обедненного слоя растет, что приводит к росту числа процессов термогенерации электронно-дырочных пар, которые полем обратновключенного перехода выносятся из области перехода, увеличивая обратный ток. Поэтому $I_{обр}$ не остается постоянным, а медленно возрастает с ростом $U_{обр}$. Более того, при достижении обратным напряжением некоторого критического значения, называемого *напряжением пробоя* $U_{проб}$, наблюдается резкий рост обратного тока. Данное явление называется *пробоем перехода* диода (см. рис. 7.6, кривая а).

Различают два основных вида пробоя: *электрический пробой* и *тепловой*. В свою очередь электрический пробой делится на лавинный и туннельный. *Лавинный пробой* характерен для диодов с широкими переходами, образованными областями с невысокой концентрацией легирующей примеси ($N < 10^{-17} \text{ см}^{-3}$). Если длина свободного пробега носителей заряда меньше ширины перехода, то при больших значениях обратного напряжения $U_{обр}$ (от 7 до 400 В) носители заряда приобретают кинетическую энергию, достаточную для развития лавинообразного процесса ионизации атомов полупроводника, что и вызывает резкий рост обратного тока при почти неизменном $U_{обр}$.

Туннельный пробой развивается в диодах с очень узкими переходами, образованными областями с высокой концентрацией легирующей примеси ($N > 10^{-18} \text{ см}^{-3}$). Туннельный пробой p-n-перехода обусловлен квантово-

механическим *туннельным эффектом*, когда из-за малой толщины энергетического потенциального барьера имеется высокая вероятность прохождения зарядов сквозь него без изменения энергии. При определенном обратном напряжении происходит туннельное проникновение электронов валентной зоны р-области на свободные энергетические уровни зоны проводимости n-области.

В планарных диодах (см. рис.7.4) электрический пробой происходит на участке перехода, выходящем на поверхность полупроводниковой структуры, так называемый *поверхностный пробой*. Это обусловлено наличием на поверхности n-базы диода положительного объемного заряда, который приводит к уменьшению толщины перехода вблизи поверхности и соответствующему уменьшению напряжения пробоя.

Тепловой пробой возникает вследствие перегрева электрического перехода протекающим через него обратным током при недостаточном теплоотводе. За счет термогенерации носителей в переходе возрастает обратный ток диода, и рост подводимой к диоду мощности $U_{обр}I_{обр}$ приводит к еще большему разогреву перехода. Если температура диода превысит допустимое значение, структура перехода претерпевает необратимые изменения, и диод выходит из строя. На участке теплового пробоя (см. рис. 7.3, кривая б) $U_{обр}$ уменьшается при возрастании $I_{обр}$.

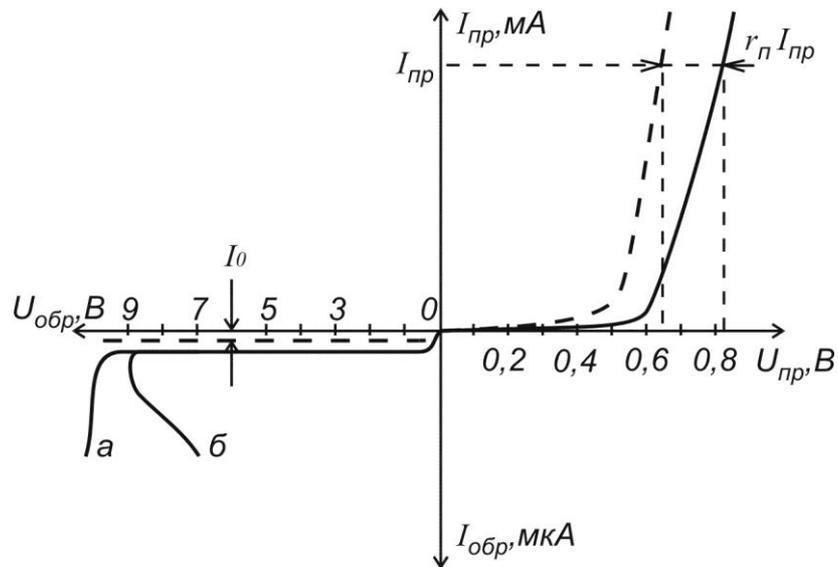


Рис. 7.3

На ВАХ диода существенно влияет температура окружающей среды (рис. 7.3). С ростом температуры ток I_0 возрастает по экспоненциальному закону $e^{-\Delta W/kT}$, где ΔW – ширина запрещенной зоны материала полупроводника. В инженерных расчетах полагают, что ток I_0 удваивается на каждые 10°C в германиевых диодах, а в кремниевых на каждые 7°C .

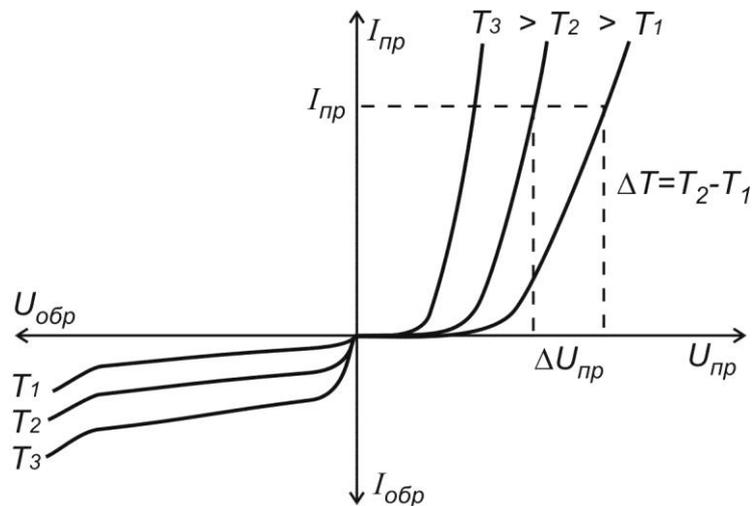


Рис. 7.4

С ростом температуры растет прямой ток диода при фиксированном напряжении $U_{пр}$ или уменьшается падение напряжения на диоде при фиксированном прямом токе $I_{пр}$. Влияние температуры на прямую ветвь ВАХ диода оценивают *температурным коэффициентом напряжения*

$T_{KH} = \Delta U_{пр} / \Delta T \Big|_{I_{пр} = \text{const}}$, численно равным изменению прямого напряжения на диоде при увеличении температуры на 1°C . При расчетах для большинства диодов принимают $T_{KH} = -2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

Диоды характеризуются рядом параметров, которые являются общими для всех типов диодов. К ним относятся:

рабочий диапазон температур перехода $T_{min} \dots T_{max}$;

максимально допустимый прямой ток $I_{пр max}$, при котором температура перехода достигает максимального значения T_{max} ;

максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр max}$, при котором не происходит пробоя p-n-перехода, обычно $U_{обр max} < 0,8 U_{проб}$;

прямая и обратная максимально допустимая мощность, рассеиваемая на диоде:

$$P_{ид max} = (T_{max} - T_0) / R_T ; \quad (7.3)$$

$$P_{iод max} = (T_{min} - T_0) / R_T , \quad (7.4)$$

где T_0 – температура окружающей среды; R_T – тепловое сопротивление перехода, характеризующее условия теплоотвода;

прямое и обратное статическое сопротивление диода (сопротивление постоянному току):

$$R_{пр} = U_{пр} / I_{пр} ; \quad R_{обр} = U_{обр} / I_{обр} ; \quad (7.5)$$

прямое и обратное дифференциальное сопротивление (сопротивление переменному току):

$$r_{пр} = \Delta U_{пр} / \Delta I_{пр} ; \quad r_{обр} = \Delta U_{обр} / \Delta I_{обр} . \quad (7.6)$$

Дифференциальное сопротивление диода значительно меньше статического.

Величину $K_B = I_{пр} / I_{обр} = e^{U_{пр} / U_T} \gg 1$ называют коэффициентом выпрямления (характеризует односторонний характер проводимости диода, т.к. $I_{пр} \gg I_{обр}$).

Способность диода накапливать электрические заряды отражается его емкостными параметрами. Существует два механизма накопления зарядов, которые описываются двумя емкостными параметрами.

Барьерная емкость отражает наличие объемного электрического заряда ионизированных атомов примеси в p-n-переходе, который можно рассматривать как плоский конденсатор. Расстояние между обкладками этого конденсатора определяется шириной p-n-перехода δ . Выражение для зависимости барьерной емкости от напряжения на переходе имеет вид

$$C_{\text{бар}}(U) = \varepsilon \frac{S}{\delta(U)} = \frac{C_0}{(1 + U/\phi_K)^\gamma}, \quad (7.7)$$

где S – площадь поперечного сечения перехода; $C_0 = S \sqrt{\frac{\varepsilon q}{2\phi_K} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$ – величина барьерной емкости при нулевом напряжении на переходе $U = 0$; $\gamma = 1/3 \dots 1/2$ – параметр, значение которого определяется профилем легирования перехода; U – обратное напряжение на переходе. Величина барьерной емкости составляет десятки – сотни пикофарад, поэтому ее действие проявляется практически только при обратном включении, когда переход закрыт и протекают малые обратные токи.

Диффузионная емкость отражает накопление электрического заряда неосновных неравновесных носителей в p- и n-областях при прямом включении перехода. Величина диффузионной емкости пропорциональна прямому току перехода:

$$C_{\text{диф}} = \frac{\tau_{\text{эф}} I_{\text{пр}}}{\phi_T} = \frac{\tau_{\text{эф}}}{r_{\text{пр}}}, \quad (7.8)$$

где $\tau_{\text{эф}}$ – эффективное время жизни неосновных неравновесных носителей. При прямом токе перехода 10 мА величина диффузионной емкости составляет десятки – сотни нанофарад. В случае несимметричного перехода накопление неравновесных носителей происходит преимущественно в базе диода.

Кроме общих параметров диоды характеризуются *специальными параметрами*, присущими только данному типу диодов.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока с частотой от 50 до 20 000 Гц в пульсирующий ток одного направления и широко используются в источниках питания радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. В качестве полупроводникового материала для таких диодов ранее использовали германий, в настоящее время – кремний и арсенид галлия. Принцип работы выпрямительных диодов основан на вентильном свойстве р-п-перехода. Выпрямительные диоды подразделяются на диоды малой, средней и большой мощности. Диоды малой мощности предназначены для выпрямления токов до 300 мА, средней и большой мощности – для выпрямления токов соответственно от 300 мА до 10 А и от 10 до 1000 А. Преимущества кремниевых диодов по сравнению с германиевыми: малые обратные токи; возможность использования при более высоких температурах окружающей среды и больших значениях обратных напряжений. Преимущество германиевых диодов – малое падение напряжения 0,3...0,6 В при протекании прямого тока (по сравнению с 0,8...1,2 В у кремниевых).

В качестве выпрямительных диодов используют плоскостные, сплавные, диффузионные и эпитаксиальные диоды, выполненные на основе несимметричных р-п-переходов. Барьерная емкость перехода из-за большой площади велика и ее значение достигает десятков пикофарад. Германиевые диоды могут быть использованы при температурах не более 70...80 °С, кремниевые – до 120...150 °С, арсенид-галлиевые – до 240...280 °С. Другим преимуществом диодов из арсенида галлия является значительно большая подвижность носителей, что позволяет их использовать на частотах до 100...500 кГц.

Максимальное обратное напряжение маломощных низкочастотных выпрямительных диодов лежит в пределах от нескольких десятков до 1200 В. Для более высокого напряжения промышленностью выпускаются выпрямительные столбы, использующие несколько последовательно соединенных диодов в одном корпусе. Обратные токи не превышают 300 мкА для германиевых диодов и 10 мкА – для кремниевых.

Мощные (силовые) диоды различаются по частотным свойствам и работают на частотах в диапазоне от десятков герц до десятков килогерц и изготавливаются преимущественно из кремния.

Работа при больших прямых токах и высоких обратных напряжениях связана с выделением значительной мощности в р-п-переходе. Поэтому в установках с диодами средней и большой мощности используются охладители – радиаторы с воздушным и жидкостным охлаждением. При воздушном охлаждении тепло отводится с помощью радиатора. При этом охлаждение может быть естественным (за счет конвекции воздуха) или принудительным (с использованием обдува корпуса прибора и радиатора с помощью вентилятора). При жидкостном охлаждении в радиатор по специальным каналам пропускается теплоотводящая жидкость (вода, антифриз, трансформаторное масло, синтетические диэлектрические жидкости).

К основным параметрам выпрямительных диодов относятся:

- максимально допустимый прямой ток $I_{пр\ max}$;
- прямое падение напряжения на диоде $U_{пр}$ (при $I_{пр\ max}$);
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\ max}$;
- обратный ток при заданном обратном напряжении $I_{обр}$ (при $U_{обр\ max}$);
- диапазон рабочих температур окружающей среды;
- коэффициент выпрямления K_v ;
- предельная частота выпрямления, соответствующая уменьшению коэффициента выпрямления в 2 раза.

На рис. 7.5 показана схема двухполупериодного выпрямителя – типовая схема включения выпрямительных диодов. Данное название обусловлено тем, что ток через нагрузку протекает в течение обоих полупериодов входного напряжения. Схема состоит из понижающего трансформатора T , диодного моста, в плечи которого включены четыре диода $VD1 - VD4$, и сглаживающего конденсатора C . Переменное напряжение подается в одну диагональ моста, а нагрузка подключена к другой. При действии положительной полуволны входного напряжения открыты диоды $VD2, VD3$, а при действии

отрицательной полуволны – VD1, VD4. Форма входного, выходного напряжения и тока нагрузки в данной схеме показана на рис. 3.9. Конденсатор в данной схеме обеспечивает сглаживание пульсирующего напряжения на нагрузке за счет заряда от источника в течение части периода и разряда через нагрузку в течение промежутка времени, равного практически половине периода входного напряжения $\Delta t_{\text{разр}} \approx T / 2 = 1 / (2 \cdot f)$. Емкость конденсатора, обеспечивающая амплитуду пульсаций напряжения на нагрузке $\Delta U_{\text{вых}}$ при максимальном токе нагрузки $I_{\text{н м}}$, определяется согласно выражению

$$C = I_{\text{н м}} / (2 \Delta U_{\text{вых}} f). \quad (7.9)$$

Максимальное значение обратного напряжения, которое прикладывается к одному диоду при действии отрицательной полуволны в данной схеме, практически равно амплитуде входного напряжения:

$$U_{\text{м обр}} \approx U_{\text{вх м}}. \quad (7.10)$$

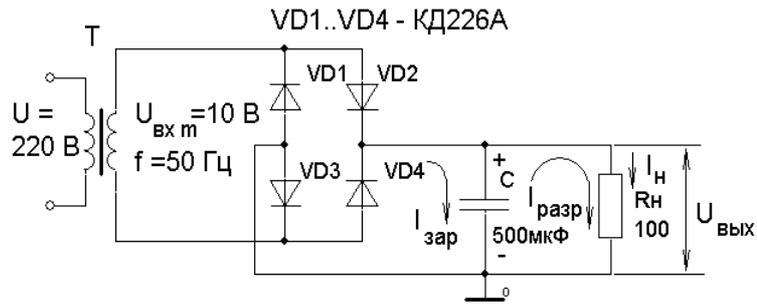


Рис. 7.5

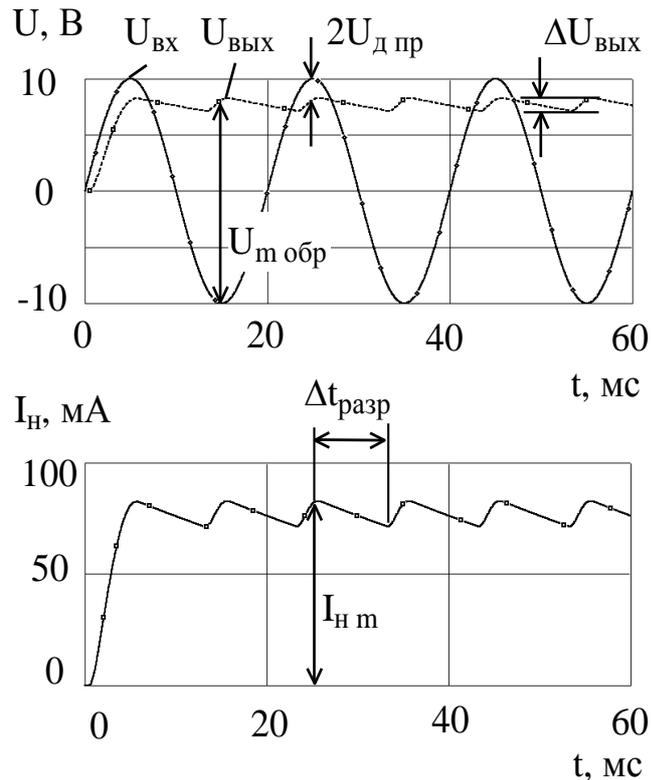


Рис. 7.6

Высокочастотные (детекторные) диоды предназначены для выпрямления электрических сигналов высокой частоты. Обозначаются и маркируются так же, как и выпрямительные низкой частоты. Используются в радиоприемной, телевизионной и другой аппаратуре (в детекторах и демодуляторах). Требование по величине $U_{обр\ max}$ и $I_{пр\ max}$ значительно ниже, чем в выпрямительных низкочастотных. В высокочастотных диодах стремятся получить минимальное значение собственной емкости, поскольку на достаточно высоких частотах реактивное сопротивление этой емкости имеет величину ниже, чем обратное сопротивление р-п-перехода диода, т.е. эффект выпрямления (детектирования) резко снижается. Для уменьшения площади р-п-перехода, а следовательно, и его

емкости используют точечную конструкцию диода. Барьерная емкость точечных диодов не превышает 1 пФ, а рабочая частота составляет 150 МГц и более.

Емкость диода складывается из емкости корпуса и емкости р-п-перехода ($C_d = C_k + C_{п}$). Уменьшение емкости корпуса C_k достигается применением корпусов специальной конструкции. С этой же целью высокочастотные диоды часто выполняются вообще без корпуса, в этом случае они используются как составная часть гибридной интегральной схемы или модуля, который размещается в герметичном корпусе.

Прямая ветвь ВАХ точечного диода практически не отличается от реальной ВАХ р-п-перехода, а обратная ветвь не имеет ярко выраженного участка насыщения, что объясняется процессами генерации носителей заряда в неоднородном поле точечного контакта, вызванной лавинным умножением.

Импульсные диоды предназначены для работы в импульсных и цифровых устройствах. Обозначаются так же, как и выпрямительные, имеют малую длительность переходных процессов. От выпрямительных диодов отличаются малыми емкостями р-п-перехода (доли пикофард) и характеризуются рядом параметров, определяющих переходные характеристики диода. Уменьшение емкостей достигается за счет уменьшения площади р-п-перехода, поэтому допустимые мощности рассеяния у них невелики (30...40 мВт).

При воздействии на диод коротких по времени прямоугольных импульсов напряжения или тока форма тока через диод или напряжения на нем будет отличаться от прямоугольной, что обусловлено инерционностью процессов накопления и рассасывания носителей в базе и перезарядом его барьерной емкости. При малых уровнях напряжения и тока длительность переходных процессов определяется барьерной емкостью, а при больших – диффузионной.

На рис. 7.6 показаны переходные процессы в диоде при высоких уровнях напряжения и тока. При подаче на диод прямого напряжения ток устанавливается не сразу, так как с течением времени происходит накопление инжектированных неосновных носителей в базе и снижение ее сопротивления.

Передний фронт импульса тока получается искаженным (см. рис. 7.6, а). Однако данный процесс оказывается гораздо короче, чем процессы при переключении диода с прямого напряжения на обратное, которые характеризуются временем обратного восстановления $t_{\text{вос}}$. При этом первоначально резко увеличивается величина обратного тока до $I_{\text{обр m}}$ вследствие интенсивного рассасывания неравновесных носителей базы с последующим его экспоненциальным уменьшением до стационарного значения, равного обратному току насыщения $I_0(T)$ в (3.9). При пропускании импульса прямого тока через диод в первый момент времени наблюдается выброс напряжения (см. рис. 7.6, б), что вызвано повышенным падением напряжения, пока инжектированные носители, накопившись в базе, не понизят ее сопротивление. Этот процесс описывается параметром диода, который называется *время установления прямого напряжения* $t_{\text{уст}}$. После выключения прямого тока на диоде остается некоторое напряжение $U_{\text{ост}}$, величина которого зависит от количества инжектированных носителей. *Остаточное напряжение* уменьшается по мере рекомбинации носителей.

Для уменьшения $t_{\text{вос}}$ необходимо уменьшить объем полупроводниковой структуры и увеличить скорость рекомбинации неосновных носителей, что достигается технологией изготовления импульсных диодов: введением в исходный материал нейтральных примесей, чаще всего золота (Au), для создания так называемых «ловушек» – центров рекомбинации.

Импульсные диоды характеризуются рядом специальных параметров:

- общая емкость диода C_d (десятиные доли – единицы пикофарад);
- максимальное импульсное прямое напряжение $U_{\text{пр max и}}$;
- максимально допустимый импульсный ток $I_{\text{пр max и}}$;
- время установления прямого напряжения $t_{\text{уст}}$ – интервал времени между началом протекания прямого тока через диод и моментом, когда прямое напряжение на диоде достигает 1,2 установившегося значения (доли наносекунд – доли микросекунд);

– время обратного восстановления диода $t_{\text{вос}}$ – время переключения диода с заданного прямого тока на заданное обратное напряжение от момента прохождения тока через нулевое значение до момента достижения обратным током заданного значения (доли наносекунд – доли микросекунд).

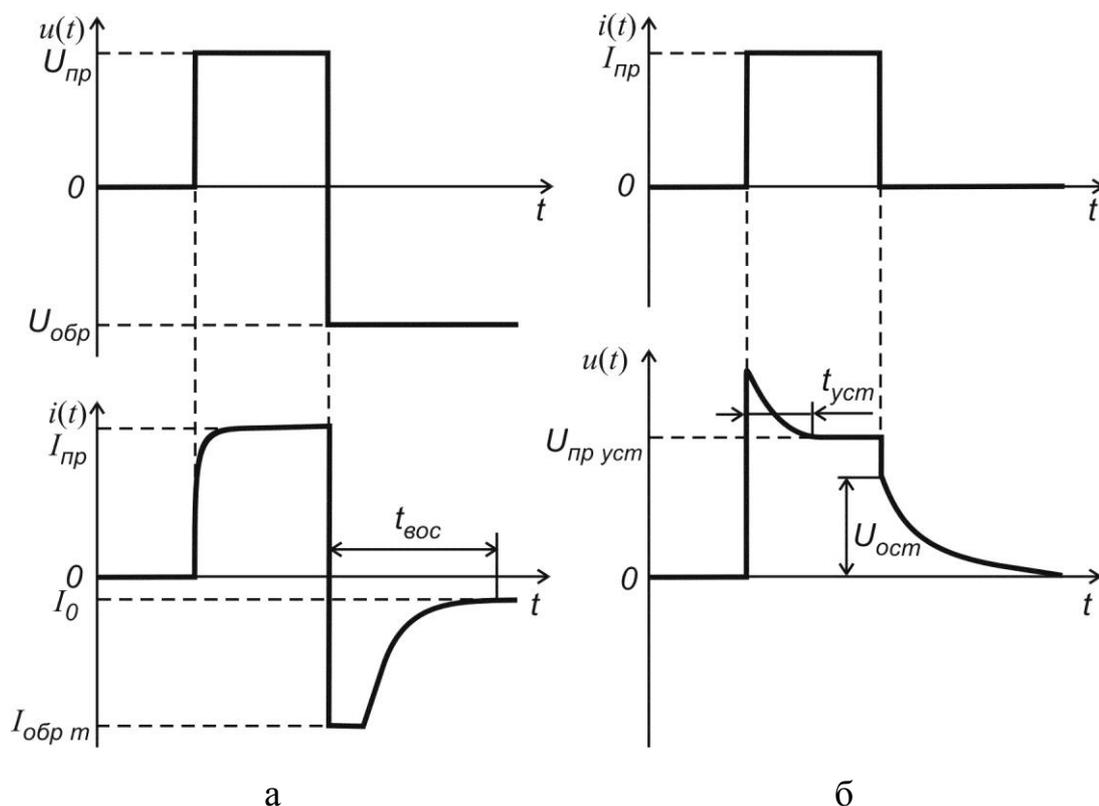


Рис. 7.6

Для уменьшения $t_{\text{вос}}$ применяют специальные разновидности импульсных диодов: *диоды с барьером Шотки* (ДБШ), *диоды с накоплением заряда* (ДНЗ). В ДБШ переход выполнен на основе выпрямляющего контакта металл-полупроводник, в котором работа выхода из металла выше, чем работа выхода из полупроводника. У этих диодов не затрачивается время на накопление и рассасывание зарядов в базе, их быстродействие зависит только от скорости процесса перезаряда барьерной емкости. Инжекция в таких диодах является односторонней, инжектируют электроны из полупроводника в металл, где они являются единственным типом носителей. По этой причине отсутствует накопление неосновных носителей в базе. Конструктивно ДБШ выполняются в виде пластины низкоомного кремния n-типа, на которую

нанесена высокоомная эпитаксиальная пленка с электропроводностью того же типа. На поверхность пленки вакуумным напылением нанесен слой металла. Инерционность ДБШ в основном определяется барьерной емкостью выпрямляющего контакта, которая может быть меньше 0,01 пФ.

В ДНЗ база изготавливается неравномерно легированной по длине. Концентрация примеси в базе по мере приближения к р-п-переходу уменьшается, поэтому неравномерной оказывается и концентрация основных носителей базы – электронов, если база имеет проводимость n-типа. За счет этого электроны диффундируют в сторону р-п-перехода, оставляя в глубине базы избыточный положительный заряд атомов донорной примеси, а вблизи перехода избыточный заряд электронов. Между этими зарядами возникает электрическое поле, направленное в сторону перехода. Под действием этого поля дырки, инжектированные в базу при прямом включении диода, концентрируются (накапливаются) в базе у границы перехода. При переключении диода с прямого на обратное направление эти дырки под действием поля внутри перехода быстро уходят из базы в эмиттер, и время восстановления обратного сопротивления уменьшается. Для изготовления таких диодов применяется меза- и эпитаксиальная технология.

Полупроводниковый стабилитрон – полупроводниковый диод, напряжение на котором сохраняется с определенной точностью при протекании через него тока в заданном диапазоне, и предназначенный для стабилизации напряжения. Принцип действия стабилитронов основан на использовании электрического вида пробоя р-п-перехода при обратном смещении. В качестве стабилитронов используются плоскостные кремниевые диоды.

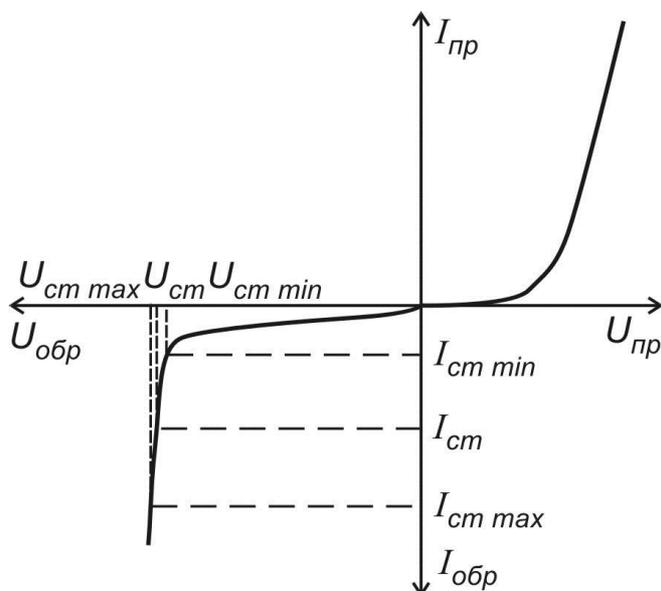


Рис. 7.7.

Как показано на рис. 7.7, обратная ветвь ВАХ имеет участок со слабой зависимостью напряжения от величины обратного тока (участок с электрическим пробоем р-п-перехода). При изменении тока стабилитрона $I_{ст}$ в диапазоне значений от $I_{ст min}$ до $I_{ст max}$ напряжение на стабилитроне незначительно изменяется в пределах от $U_{ст min}$ до $U_{ст max}$, что обуславливает небольшое значение дифференциального сопротивления стабилитрона:

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = \frac{U_{ст max} - U_{ст min}}{I_{ст max} - I_{ст min}}. \quad (7.11)$$

Напряжение стабилизации $U_{ст}$ обычно определяется среднеарифметическим значением минимального и максимального тока стабилитрона:

$$I_{ст} = (I_{ст min} + I_{ст max})/2. \quad (7.12)$$

Величина обратного напряжения, при котором начинает развиваться электрический пробой, в значительной степени зависит от удельного сопротивления исходного материала, определяемого концентрацией примеси. В стабилитронах с напряжением стабилизации менее 5 В преобладает туннельный пробой, от 5 до 7 В наблюдаются оба вида электрического пробоя – туннельный и лавинный, а выше 7 В преобладает лавинный пробой. При изменении температуры напряжение стабилизации $U_{ст}$ изменяется. Низковольтные и

высоковольтные стабилитроны имеют противоположный знак изменения напряжения стабилизации при увеличении температуры. При туннельном пробое с ростом температуры $U_{ст}$ уменьшается, а при лавинном – возрастает. В стабилитронах с напряжением стабилизации от 5 до 7 В влияние температуры незначительно, т.к. в переходе существуют оба вида пробоя.

Основными параметрами стабилитронов являются:

- напряжение стабилизации $U_{ст}$ – падение напряжения на стабилитроне при протекании заданного тока стабилизации;
- минимальный $I_{ст\ min}$ и максимальный $I_{ст\ max}$ токи стабилитрона в режиме стабилизации;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации

$TКН_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T} \cdot 100 \%, \left(\frac{\%}{^{\circ}C} \right)$ – отношение относительного изменения напряжения стабилизации, выраженного в процентах, к вызвавшему его изменению температуры;

– дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{ст}$, определяемое на участке пробоя;

– статическое сопротивление $R_0 = U_{ст} / I_{ст}$.

Полупроводниковые диоды, предназначенные для стабилизации напряжений менее 1 В с использованием прямой ветви ВАХ, называются *стабисторами*. Для изготовления стабисторов используется кремний с высокой концентрацией примеси либо селен.

Устройство, предназначенное для стабилизации постоянного напряжения, в котором используется стабилитрон, называется *параметрическим стабилизатором напряжения*, поскольку его характеристики полностью определяются параметрами стабилитрона. Принципиальная схема такого стабилизатора представлена на рис. 7.8. Нагрузка подключена параллельно стабилитрону, при этом напряжение на ней остается постоянным с определенной степенью точности. Ток стабилитрона, который задается гасящим или балластным резистором R_r , должен лежать в

диапазоне значений $I_{CT\ min} \dots I_{CT\ max}$. Требуемое сопротивление резистора R_{Γ} находится согласно выражению

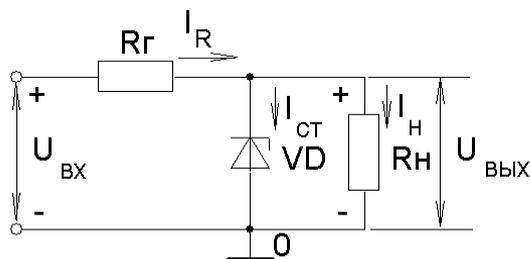


Рис. 7.8

$$R_{\Gamma} = \frac{U_{ВХ} - U_{ВЫХ}}{I_{CT} + I_H}, \quad (7.13)$$

где $U_{ВЫХ} = U_{CT}$, которое получено из уравнений, записанных по законам Кирхгофа для данной схемы.

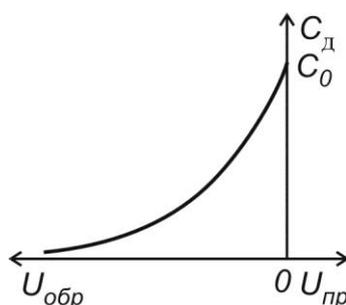


Рис. 7.13

Варикап – полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости емкости перехода от обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. Они делятся на подстроечные, или варикапы, и умножительные, или варакторы. Варикапы используются для изменения резонансной частоты колебательных контуров. Варакторы применяются для умножения частоты. График зависимости емкости варикапа от обратного напряжения, которая описывается выражением (7.14), показан на рис. 7.13.

Основными специальными параметрами варикапов являются:

– номинальная емкость C_d , измеренная при заданном обратном напряжении $U_{обр}$;

- коэффициент перекрытия по емкости $K_C = C_{д\ max}/C_{д\ min}$ – отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения;
- сопротивление потерь $r_{п}$ – суммарное активное сопротивление, включающее сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов;
- добротность $Q_B = X_C/r_{п}$ – отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к сопротивлению потерь;
- температурный коэффициент емкости $\alpha_C = \frac{\Delta C}{C\Delta T} \cdot 100\% \left(\frac{\%}{^{\circ}C} \right)$ – отношение относительного изменения емкости, выраженного в процентах, к вызывавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды.

Схема включения варикапа в колебательный контур показана на рис. 7.14. Обратное напряжение подается на варикап через высокоомный резистор R , предотвращающий шунтирование варикапа малым внутренним сопротивлением источника питания по переменному току. Разделительный конденсатор C_p устраняет шунтирование варикапа индуктивностью контура по постоянному току.

Кроме рассмотренных диодов выпускаются *туннельные диоды, диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды*, работающие в диапазоне сверхвысоких частот (0,3...300 ГГц), а также *фото- и излучательные диоды*, используемые в *фотоэлектрических и оптоэлектронных приборах* и в качестве *светоиндикаторных устройств*.

ТЕМА 8. БИПОЛЯРНЫЕ И ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ, ТИРИСТОРЫ

8.1. Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор, образованный двумя последовательно включенными взаимодействующими р-п-переходами и содержащий три или более вывода, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции носителей заряда. Процессы усиления в БТ объясняются возможностью управления большим током в

выходной цепи (коллектор или эмиттер) при небольших изменениях напряжения или тока во входной цепи (эмиттер- база).

В зависимости от порядка чередования областей полупроводника, различают транзисторы а) р-п-п-типа и б) п-р-п-типа (рис.8.1.)

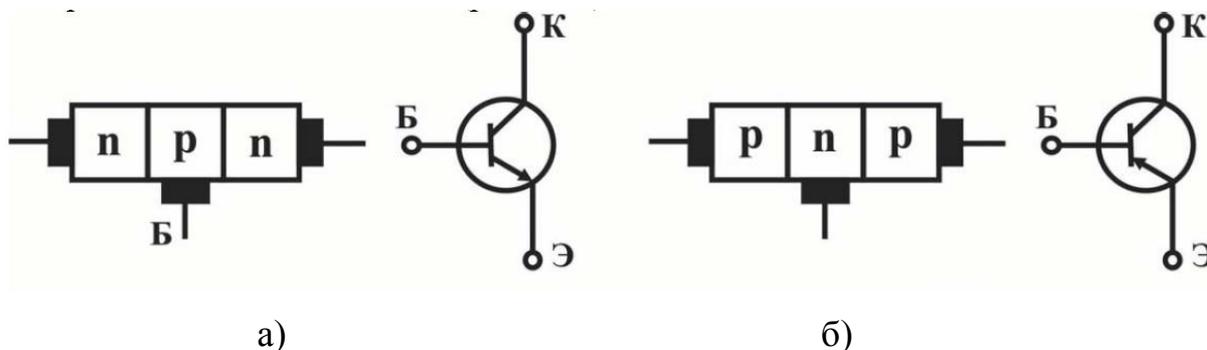


Рис.8.1.

Отличие между ними заключается в различной полярности источников внешних напряжений и в направлении протекания токов через электроды при одинаковом принципе работы. Эмиттером называется одна из крайних областей, которую легируют сильнее, что позволяет использовать ее в режиме инжекции. Промежуточную область называют базой а другую крайнюю область – коллектором. В область коллектора производится экстракция носителей заряда из базовой области. Электронно-дырочный переход между эмиттерной и базовой областями называют эмиттерным, а между коллекторной и базовой – коллекторным.

В зависимости от напряжения на переходах возможны следующие режимы работы транзистора:

активный режим – на эмиттерный переход подается прямое смещение , на коллекторный обратное (запирающее);

режим отсечки – на обоих переходах обратное напряжение;

режим насыщения – на обоих переходах прямое напряжение;

инверсный режим – обратный по отношению к активному, то есть коллекторный переход смещен в прямом направлении, эмиттерный – в обратном.

В зависимости от того, какой из выводов транзистора является общим для входной и выходной цепи, различают три схемы включения транзистора: с

общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). На рис. 4.2. показаны полярности внешних источников напряжения и направления токов транзистора, соответствующие активному режиму работы, для трех схем включения.

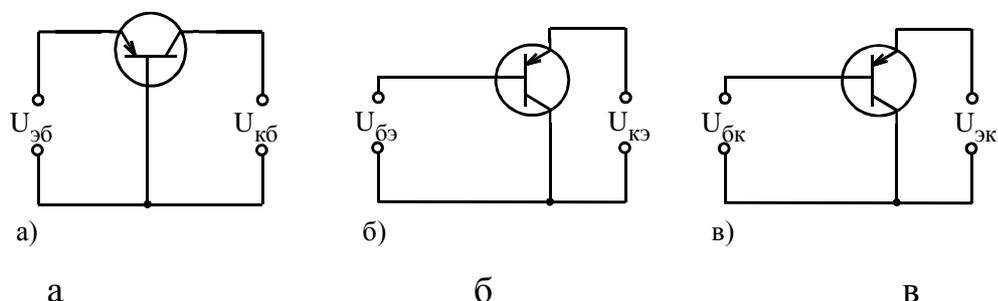


Рис. 8.2. Схемы включения биполярного транзистора (ОБ,ОЭ,ОК)

Основные функции биполярного транзистора могут быть реализованы только в активном режиме, поэтому ниже рассмотрим процессы формирования токов и управления ими в активном режиме для схемы с общей базой .

С ростом прямого смещения $U_{эб}$ на эмиттерном переходе происходит уменьшение его потенциального барьера, что вызывает инжекцию дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер.

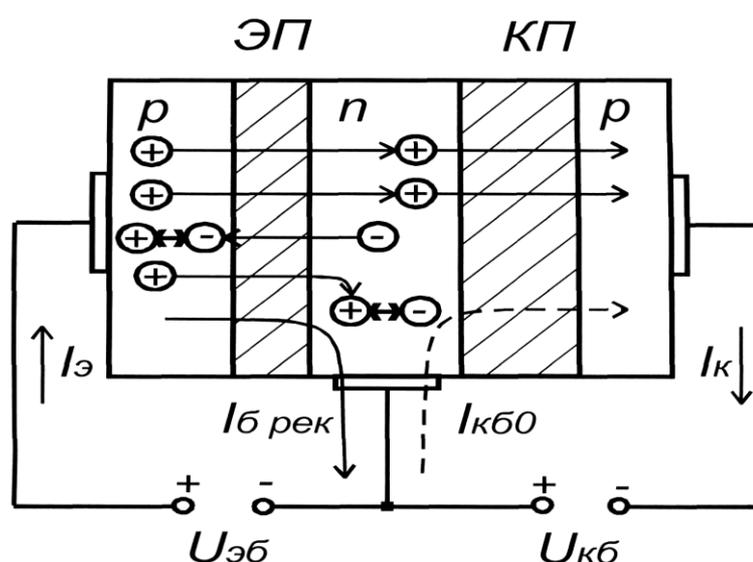


Рис.8.3. Внутренняя структура биполярного транзистора

При этом, как и ранее в полупроводниковых диодах, используется несимметричный р-п переход, при котором концентрация примеси в эмиттере много больше концентрации примеси в базе (концентрация основных носителей эмиттера много больше концентрации основных носителей базы). Это приводит к тому что инжекция дырок из эмиттера в базу преобладает над инжекцией электронов из базы в эмиттер. Ток инжекции имеет две составляющие: дырочную $I_{эр}$ и электронную $I_{эн}$. Процесс инжекции характеризуется коэффициентом инжекции (эффективностью эмиттерного перехода) $\gamma = I_{эр} / (I_{эр} + I_{эн})$, показывающим, какую долю составляет от общего тока эмиттера ток инжектированных в базу носителей.

В результате инжекции происходит диффузия дырок через базу к коллекторному переходу. Этот процесс усиливается тем, что дырки, подошедшие к обратносмещенному коллекторному переходу, попадают в его ускоряющее поле $U_{кб}$ и экстрагируются в коллектор, создавая управляемую составляющую тока коллектора $I_{к упр}$.

По мере продвижения по базе незначительная часть дырок рекомбинирует с собственными носителями базы – электронами, создавая рекомбинационную составляющую тока базы $I_{б рек}$. Коэффициент переноса неосновных носителей через базу характеризуется $\varepsilon = I_{кр} / I_{эр}$, где $I_{кр}$ – ток дырок, дошедших до коллекторного перехода в области базы.

При экстракции может также происходить ударная ионизация атомов полупроводника и лавинное умножение носителей заряда в коллекторном переходе, которое оценивается коэффициентом лавинного умножения $M = I_{к упр} / I_{кр}$. Произведение частичных коэффициентов передачи позволяет определить сквозной коэффициент передачи *по току в схеме с ОБ* (статический коэффициент передачи тока эмиттера) как $\alpha = \gamma \varepsilon M < 1$. Управляемая составляющая тока коллектора при этом равна $I_{к упр} = \gamma \varepsilon M I_{э}$.

Значения параметра α лежат в диапазоне 0,95...0,999.

Можно заметить, что в общем случае при малой ширине базы поле КП полностью формирует ток коллектора, то есть напряжение на коллекторном переходе при этом может отсутствовать. Однако в реальной схеме включения

БТ напряжение $U_{кэ}$ всегда имеется, что обусловлено включением нагрузки и необходимостью создания выходного тока в цепи коллектора.

Следовательно, кроме управляемого тока коллектора $I_{к\text{ упр}}$ через коллекторный переход всегда протекает обратный неуправляемый ток $I_{кб0}$, обусловленный экстракцией собственных неосновных носителей базы (дырок) и коллектора (электронов). Поэтому для полного тока коллектора справедливо выражение

$$I_{к} = \alpha I_{э} + I_{кб0} \quad (8.1)$$

Обратный неуправляемый ток сильно зависит от температуры, поэтому $I_{кб0}$ называют также тепловым током. $I_{кб0}$ совпадает по направлению с управляемым током коллектора $I_{к\text{ упр}}$, а в цепи базы $I_{кб0}$ противоположен току рекомбинации, поэтому полный ток базы определяется разностью $I_{б} = I_{б\text{ рек}} - I_{кб0}$.

Величина $I_{кб0}$ для германиевых транзисторов составляет десятки микроампер, а для кремниевых транзисторов – сотни наноампер, Поэтому можно считать, что $I_{к} \approx \alpha I_{э}$.

Для БТ можно записать так называемое внутреннее уравнение транзистора, то есть выражение, связывающее токи всех трех выводов БТ:

$$I_{э} = I_{к} + I_{б}, \quad (8.2)$$

Выражение, связывающее выходной $I_{к}$ и входной ток $I_{б}$ транзистора, включенного по схеме с ОЭ, можно получить, подставив (4.2) в (4.1):

$$I_{к} = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{б} + \frac{I_{кб0}}{1-\alpha} = \beta I_{б} + (\beta + 1) I_{кб0} = \beta I_{б} + I_{кэ0}. \quad (8.3)$$

Параметр $\beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1$ называют *статическим коэффициентом передачи по току в схеме с ОЭ* (статический коэффициент передачи тока базы). Ток $I_{кэ0} = I_{кб0}(\beta + 1)$ называют *начальным током* транзистора.

Коэффициент β принимает значения, лежащие в диапазоне десятки – сотни раз. Очевидно, что величина β характеризует способность транзистора усиливать малый по величине ток базы и это усиление будет тем больше, чем больше α . Величина α также будет расти при уменьшении потерь в базе и

ширины базы, что позволит также повысить крутизну управления БТ при подаче небольшого сигнала во входную цепь БТ (эмиттер-база).

В активном режиме работы токи коллектора и эмиттера БТ практически равны, а незначительный ток базы равен их разности.

Это приводит к тому, что в схеме с ОБ отсутствует усиление по току ($\alpha < 1$), а в схеме с ОЭ величина β имеет большое значение (50-100).

Усиление входного сигнала по напряжению и мощности возможно получить в обеих рассмотренных схемах включения (ОБ и ОЭ). Поскольку ток коллектора формируется без участия U_k , величина коллекторного тока практически не зависит от напряжения на коллекторном переходе, поэтому дифференциальное сопротивление коллекторного перехода $r_k = \frac{dU_{кб}}{dI_k}$ очень велико (переход включен в обратном направлении).

В связи с этим в цепь коллектора можно включать нагрузку с большим сопротивлением R_H , что практически не изменит коллекторный ток. В то же время дифференциальное сопротивление прямовключенного эмиттерного перехода очень мало: $r_э = \frac{dU_{эб}}{dI_э} \ll r_k$ и $r_э \ll R_H$.

Можно увидеть, что изменение входного (эмиттерного) тока на величину $\Delta I_э$ практически приводит к такому же изменению коллекторного тока $\Delta I_k \approx \Delta I_э$. При этом изменение потребляемой мощности в цепи эмиттера $\Delta P_{вх} = \Delta I_э^2 r_э$ значительно меньше изменения мощности в выходной цепи $\Delta P_{вых} = \Delta I_k^2 R_H \approx \Delta I_э^2 R_H$. Это означает, что транзистор способен управлять большой мощностью в коллекторной цепи при небольших затратах мощности в эмиттерной цепи. Коэффициент усиления по мощности определяется выражением

$$K_P = \frac{\Delta P_{вых}}{\Delta P_{вх}} \approx \frac{R_H}{r_э} \gg 1 \quad (8.4)$$

Аналогичные выводы можно получить и для схемы с ОЭ, которая является универсальной (то есть усиливает и по току и по напряжению

и по мощности). Для схемы включения с ОК можно определить соотношение выходного тока эмиттера и входного тока базы как

$$K_i = I_3/I_6 = (I_k + I_6)/I_6 = (1 + \beta). \quad (8.5)$$

Из схемы рис. , эквивалентная схема которой соответствует схеме с ОК, можно увидеть, что выходное напряжение всегда меньше входного, то есть схема включения БТ с ОК не позволяет получить усиление по напряжению, но, очевидно, позволяет получить усиление по мощности, так как $K_i = (1 + \beta)$.

Статические ВАХ отражают зависимости между постоянными входными и выходными токами и напряжениями транзистора. Для любой схемы включения транзистора можно получить четыре семейства статических ВАХ: *входные* $U_{ВХ} = f(I_{ВХ})|_{U_{ВЫХ} = \text{const}}$, *выходные* $I_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ})|_{I_{ВХ} = \text{const}}$, *прямой передачи по току* $I_{ВЫХ} = f(I_{ВХ})|_{U_{ВЫХ} = \text{const}}$ и *обратной связи по напряжению* $U_{ВХ} = f(U_{ВЫХ})|_{I_{ВХ} = \text{const}}$. В таком варианте ВАХ мы анализируем зависимость параметров транзистора от входного тока $U_{\text{вх}}, I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$, так как параметры биполярного транзистора в рабочем режиме зависят от величины тока через прямосмещенный переход БТ. В то же время в выходной цепи определяющей является зависимость параметров от напряжения на обратносмещенном переходе, то есть $U_{\text{вх}}, I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$.

На рис. 8.3. и рис 8.4.. приведены графики семейств статических ВАХ транзистора, имеющего р-п-р-структуру, для включения с ОБ.

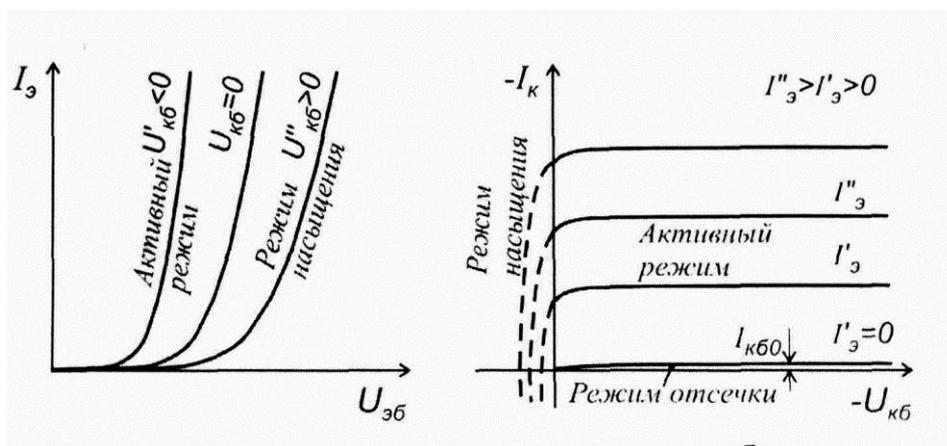


Рис. 8.4. Входные и выходные статические ВАХ р-п-р-транзистора с ОБ.

Входные характеристики представляют собой известные характеристики прямого смещенного р-п перехода. Выходные характеристики позволяют оценить поведение транзистора в различных режимах работы в соответствии с определением режимов.

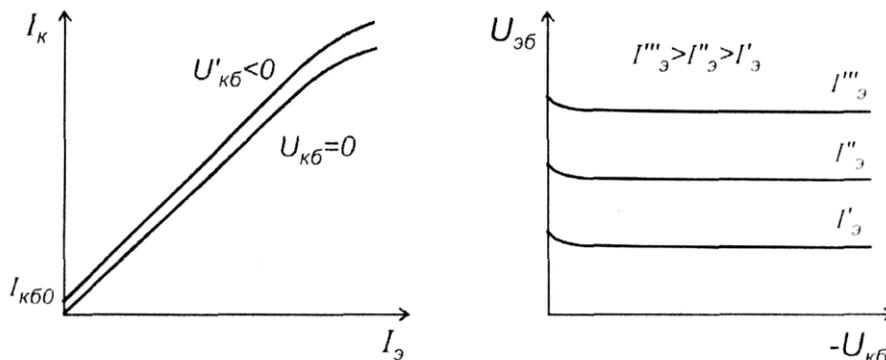


Рис.8.5. Характеристики прямой передачи и обратной связи БТ с ОБ

Характеристики прямой передачи БТ являются линейными в рабочей области входных токов в соответствии с уравнением $I_k = \alpha I_3 + I_{кб0}$.

Поведение характеристик обратной связи объясняется эффектом модуляции ширины базы в области небольших значений $U_{кб}$.

Для схемы включения БТ с ОЭ поведение входных характеристик (рис. 8.6.) объясняется так же как и для схемы с ОБ. На выходных характеристиках требует пояснения отличное от схемы с ОБ расположение области режима насыщения

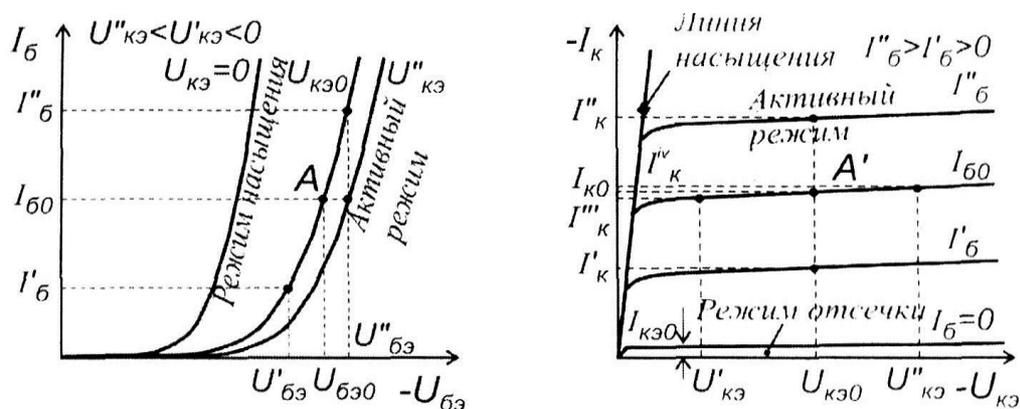


Рис.8.6. Входные и выходные характеристики БТ с ОЭ

В частности в схеме с ОЭ насыщение БТ наступает при выполнении условия $U_{кэ} < U_{бэ}$. В этом случае полярность напряжения на коллекторном

переходе соответствует прямому смещению независимо от типа транзистора (р-р-р или п-р-п.). На рис. также показана возможность определения параметров транзистора через приращения токов и напряжений в заданной рабочей точке БТ.

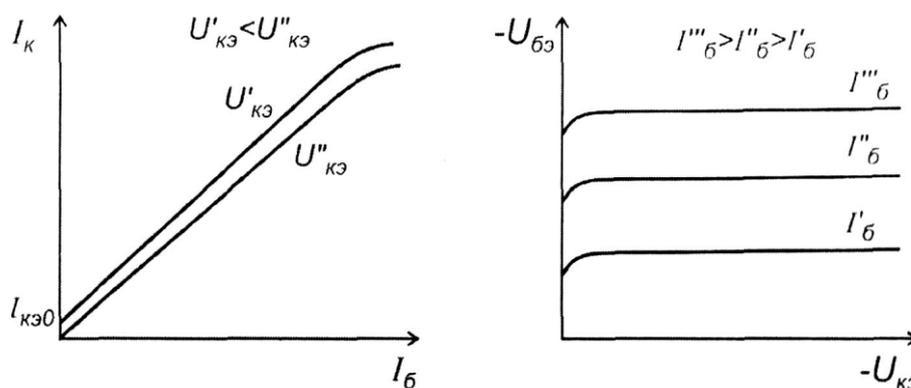


Рис.8.7. Характеристики прямой передачи и обратной связи БТ с ОЭ

Системы параметров Z, Y, H.

Транзистор в активном режиме работы описывается различными системами дифференциальных параметров, которые рассматриваются как линейные, а сам транзистор является в этом случае линейным четырехполюсником (8.8.).

Комплексные амплитуды тока и напряжения во входной цепи четырехполюсника обозначают I_1 и U_1 . Два других вывода являются выходными, соответствующие им ток и напряжение обозначают I_2 и U_2 .

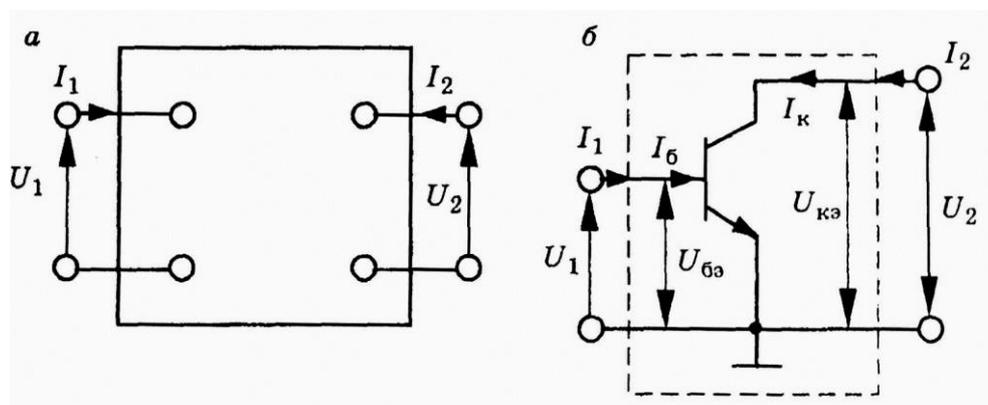


Рис.8.8. Представление транзистора как линейного четырехполюсника

Взаимосвязь между входными и выходными напряжениями и токами линейного четырехполюсника выражается различными системами параметров, в частности наиболее часто используются три системы : Z-; Y-; и H- параметры.

В системе Z–параметров напряжения на входе и выходе четырехполюсника зависят от токов

$$\begin{cases} U_1 = Z_{11}I_{11} + Z_{12}I_2, \\ U_2 = Z_{21}I_{21} + Z_{22}I_2, \end{cases}$$

Схема замещения БТ для системы Z- параметров приведена на рис.8.9.

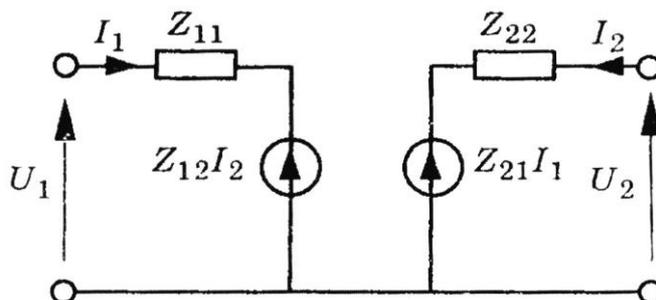


Рис.8.9.

В этом случае сами параметры можно записать как:

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} \text{ – входное сопротивление транзистора;} \quad (8.6)$$

$$Z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{I_1=0} \text{ – сопротивление обратной связи транзистора;} \quad (8.7)$$

$$Z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \Big|_{I_2=0} \text{ – сопротивление прямой передачи БТ;} \quad (8.8)$$

$$Z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{I_1=0} \text{ – выходное сопротивление.} \quad (8.9)$$

Для определения Z–параметров необходимо создать режим холостого хода (ХХ) во входной и выходной цепях. Осуществить режим холостого хода во входной цепи транзистора не представляет большого труда, так как сопротивление открытого эмиттерного перехода мало, тогда как выходная цепь четырехполюсника имеет большое сопротивление (коллекторный переход закрыт), поэтому осуществить режим холостого хода здесь затруднительно. К недостаткам Z–параметров можно отнести также низкочастотный диапазон их применения

В системе Y-параметров токи на входе и выходе четырехполюсника

зависят от напряжений

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\ I_2 &= Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 \end{aligned} \quad (8.9)$$

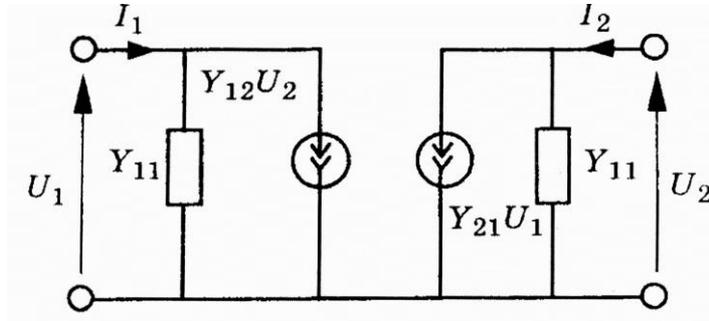


Рис.8.10. Эквивалентная схема транзистора с использованием Y-параметров

Схема замещения транзистора с использованием Y-параметров (рис.8.10.), получена на основании уравнения (8.9). Генератор тока $Y_{12}U_2$ отражает наличие обратной связи в транзисторе, а генератор $Y_{21}U_1$ – влияние входного напряжения на выходной ток.

В этом случае можно определить параметры, как :

$$Y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \Big|_{U_2=0} \text{ – входная проводимость;} \quad (8.10)$$

$$Y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{U_1=0} \text{ – проводимость обратной передачи;} \quad (8.11)$$

$$Y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \Big|_{U_2=0} \text{ – проводимость прямой передачи;} \quad (8.12)$$

$$Y_{22} = \frac{I_2}{U_2} \Big|_{U_1=0} \text{ – выходная проводимость.} \quad (8.13)$$

Y-параметры имеют размерность проводимости и определяются в режиме короткого замыкания (КЗ) на входе и выходе транзистора.

Режим короткого замыкания легко осуществляется в выходной цепи транзистора, включением емкости параллельно. На входе трудно осуществить режим короткого замыкания из-за низкого входного сопротивления транзистора.

Достоинством системы Y -параметров является хорошее описание высокочастотных свойств транзистора, поскольку режим короткого замыкания на высоких частотах реализуется более просто. Эта система широко используется в расчетах усилителей и генераторов ВЧ диапазона, а Y -параметры ВЧ транзисторов приведены в справочниках.

Система H -параметров вводится как система, у которой независимыми являются $I_{вх}$ и $U_{вых}$, а зависимыми $I_{вых}$ и $U_{вх}$.

$$U_{вх} = h_{11}I_{вх} + h_{12}U_{вых}; \quad (8.14)$$

$$I_{вых} = h_{21}I_{вх} + h_{22}U_{вых}. \quad (8.15)$$

Эквивалентная схема транзистора, описанная системой H -параметров приведена на рис.8.11.

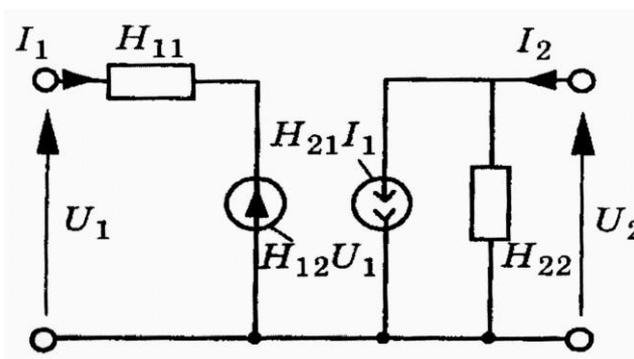


Рис.8.11.

Физический смысл H -параметров можно определить из условий к.з. на выходе и х.х. на входе,

$$h_{11} = \left. \frac{U_{вх}}{I_{вх}} \right|_{U_{вых}=0} \quad - \text{входное сопротивление}; \quad (8.16)$$

$$h_{12} = \left. \frac{U_{вх}}{U_{вых}} \right|_{I_{вх}=\text{const}} \quad - \text{коэффициент обратной связи по напряжению}; \quad (8.17)$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_{вых}}{I_{вх}} \right|_{U_{вых}=0} \quad - \text{коэффициент передачи по току}; \quad (8.18)$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_{вых}}{U_{вых}} \right|_{I_{вх}=\text{const}} \quad - \text{выходная проводимость}. \quad (8.19)$$

Преимущество Н–параметров состоит в удобстве их экспериментального определения в режимах близких к режимам работы транзисторов в практических схемах. Реализация режимов холостого хода на входе и короткого замыкания на выходе не изменяет выбранного режима работы по постоянному току.

Однако в записанном выше виде система является статической и для практического использования ее необходимо переписать не для постоянных напряжений и токов, а для их изменений в рабочей точке БТ.

В этом случае система h-параметров позволяет связать между собой амплитудные (действующие) значения переменных составляющих входных и выходных токов и напряжений.

Для расчета h-параметров удобно использовать семейства входных и выходных характеристик БТ. Рассмотрим порядок графоаналитического метода расчета h-параметров БТ с ОЭ. Для определения дифференциальных параметров $h_{11э}$ и $h_{12э}$ в заданной рабочей точке А ($U_{бэ0}$, $I_{б0}$, $U_{кэ0}$) на линейном участке семейства входных характеристик необходимо выполнить построения, как показано на рис.4.6.а Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{бэ}=\text{const}} = \left. \frac{U_{бэ}'' - U_{бэ}'}{I_{б}'' - I_{б}'} \right|_{U_{бэ}=\text{const}}, \quad (8.20)$$

$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б}=\text{const}} = \left. \frac{U_{бэ}'' - U_{бэ0}}{U_{кэ}'' - U_{кэ}'} \right|_{I_{б}=\text{const}}. \quad (8.21)$$

Параметры $h_{21э}$ и $h_{22э}$ определяются по семейству выходных характеристик. **Обратите внимание на различие в обозначении статического коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ $h_{21э}$ и дифференциального параметра $h_{21э}$.** В окрестности точки А' ($I_{к0}$, $U_{кэ0}$, $I_{б0}$), соответствующей точке А на семействе входных характеристик, выполняют построения, как показано на рис. 4.6, б. Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_э} \right|_{U_{кэ}=\text{const}} = \left. \frac{I_K'' - I_K'}{I_э'' - I_э'} \right|_{U_{кэ}=\text{const}}, \quad (8.22)$$

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_э=\text{const}} = \left. \frac{I_K^{iv} - I_K^{iii}}{U_{кэ}'' - U_{кэ}'} \right|_{I_э=\text{const}}.$$

(8.23)

Аналогично определяются h-параметры для транзистора с ОБ.

Физические T-образные эквивалентные схемы замещения БТ часто используются для анализа малосигнальных транзисторных усилителей.

Для включения БТ с ОБ и ОЭ эквивалентные схемы представлены на рис. 8.12. и рис. 8.13. соответственно.

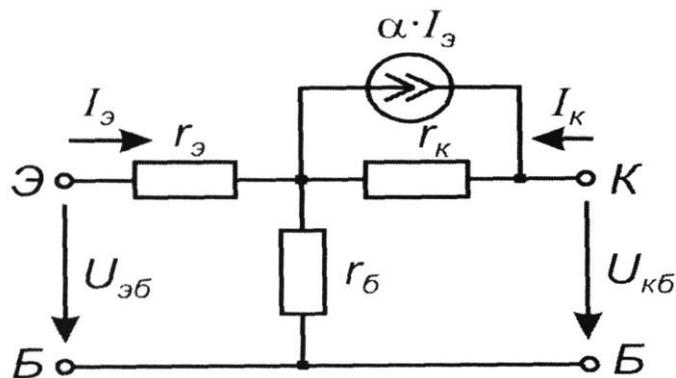


Рис. 8.12. Эквивалентная схема БТ в схеме включения с ОБ

Параметры эквивалентных схем маломощных БТ обычно принимают следующие типовые значения: *дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода* $r_э$ – единицы – десятки ом; *объемное сопротивление базы* $r_б$ – сотни ом – единицы килоом; *выходное сопротивление в схеме с ОБ* $r_к$ – сотни килоом – единицы мегаом; *выходное сопротивление в схеме с ОЭ* $r_к^* = r_к / (h_{21э} + 1)$ – десятки – сотни

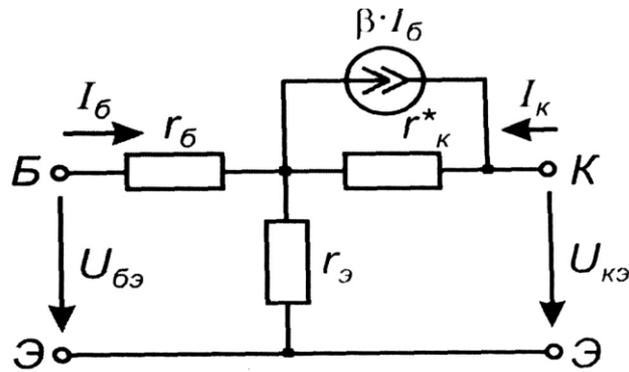


Рис.8.13. Эквивалентная схема БТ в схеме включения с ОЭ

Значения параметров могут быть найдены с использованием известных h -параметров.

$$\text{с ОБ: } r_{\text{б}} = \frac{h_{12\text{б}}}{h_{22\text{б}}}, \quad r_{\text{к}} = \frac{1}{h_{22\text{б}}}, \quad \alpha = -h_{21\text{б}}, \quad r_{\text{э}} = h_{11\text{б}} - (1 - h_{21\text{б}})r_{\text{б}}; \quad (8.24)$$

$$\text{с ОЭ: } r_{\text{э}} = \frac{h_{12\text{э}}}{h_{22\text{э}}}, \quad r_{\text{к}}^* = \frac{1}{h_{22\text{э}}}, \quad \beta = h_{21\text{э}}, \quad r_{\text{б}} = h_{11\text{э}} - (1 + h_{21\text{э}})r_{\text{э}}. \quad (8.25)$$

Коэффициенты обратной связи по напряжению $h_{12\text{э}}$ для обеих схем включения БТ имеют очень малую величину, поэтому при определении h -параметров точность вычисления некоторых параметров с использованием статических ВАХ оказывается низкой. В связи с этим при расчете параметров эквивалентной схемы целесообразно использовать выражение для легко определяемого сопротивления эмиттерного перехода

$$r_{\text{э}} = \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{\text{э}0}} \quad (8.26)$$

где $\varphi_{\text{T}} = kT/q$ – тепловой потенциал, равный 26 мВ при $T=300$ К; $I_{\text{э}0}$ – ток эмиттера БТ в рабочей точке. Связанное с ним объемное сопротивление базы БТ также целесообразно рассчитать согласно выражению

$$r_{\text{б}} = (h_{11\text{б}} - r_{\text{э}})/(1 + h_{21\text{б}}). \quad (8.27)$$

Температурные свойства биполярного транзистора могут быть рассмотрены из следующих соображений:

1) имеется зависимость тока неосновных носителей $I_{кбо}$ от температуры (этот ток удваивается при изменении температуры на каждые $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ у германиевых транзисторов и на каждые $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ у кремниевых;

2) напряжение эмиттер-база с увеличением температуры уменьшается (примерная скорость этого уменьшения $\Delta U_{бэ} / \Delta T \approx - 2,5\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$);

3) коэффициент передачи тока базы β (h_{21}) с повышением температуры увеличивается.

Самое ощутимое влияние на работу транзистора при повышении температуры оказывает ток $I_{кбо}$. За счет этого тока может произойти тепловой пробой коллекторного перехода.

Температурные свойства транзистора в схеме с ОБ лучше, чем в схеме с ОЭ. Можно определить, что при изменении температуры, например, с $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ у германиевого транзистора в схеме с ОБ произойдет увеличение тока $I_{кбо}$ в 1)-20 раз раз, то есть ток $I_{кбо}$ (от начального значения 5-30 мкА) равен увеличится до величины 100-300 мкА, что незначительно увеличит ток коллектора, среднее значение которого 10-50 мА.

В схеме на транзисторе с ОЭ картина иная, так как начальный ток коллектора $I_{кэо}$ будет в $(\beta+1)$ раз больше тока $I_{кбо}$, то есть у того же транзистора, что использовался в схеме с ОБ, при изменении температуры на те же $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ произойдет увеличение тока неосновных носителей $I_{кэо}$ до 10-20 мА, а коллекторный ток при этом изменится не менее чем в два раза, что значительно повлияет на режим транзистора и на его основные характеристики.

В общем случае влияние температуры на БТ проявляется также в смещении входных характеристик при изменении температуры, что приводит к смещению рабочей точки на характеристиках БТ и появлению искажений в усиливаемом сигнале.

Частотные свойства биполярного транзистора можно оценить, исходя прежде всего из двух основных причин:

1) влияние диффузионной и барьерной емкостей эмиттерного и коллекторного переходов;

2) появление фазового сдвига между переменными составляющими тока эмиттера и коллектора. Период подводимых колебаний становится соизмеримым со временем пролета носителей, в базе происходит накопление объемного заряда, за счет которого затруднена инжекция носителей в базу из эмиттера, так как на рассасывание заряда требуется определенное время. Коэффициент передачи тока эмиттера уменьшается и становится комплексной величиной.

Для характеристики частотных свойств транзистора вводятся параметры:

предельная частота транзистора $f_{гр}$ – это такая частота, на которой статический коэффициент передачи тока эмиттера α уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с « α », измеренном на частоте 1000Гц;

граничная частота транзистора $f_{гр}$ – это такая частота, на которой модуль коэффициента передачи тока базы становится равным единице. На любой частоте в диапазоне $0,1f_{гр} < f < f_{гр}$ модуль коэффициента передачи тока базы изменяется в два раза при изменении частоты в два раза;

максимальная частота генерации – наибольшая частота, при которой транзистор способен работать в схеме автогенератора при оптимальной обратной связи. Приблизительно эта частота соответствует выражению

$$f_{мак} \approx 200 \sqrt{f_{гр} / \tau_k}, \quad (8.28)$$

где $f_{гр}$ – граничная частота в МГц; $\tau_k = r'_b C_k$ – постоянная времени цепи обратной связи, определяющая устойчивость усилительного каскада к самовозбуждению; r'_b – распределенное омическое сопротивление базовой области; C_k – емкость коллекторного перехода.

Максимально допустимые параметры БТ. Для обеспечения надежной работы аппаратуры режимы работы транзисторов должны выбираться таким образом, чтобы ток и напряжение не выходили за пределы области допустимых режимов, которая определяется следующими параметрами: максимально допустимый постоянный ток коллектора $I_{кмак}$; максимально допустимое постоянное обратное напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэмак}$; максимально

допустимое постоянное обратное напряжение эмиттер–база $U_{эб\max}$; максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора $P_{к\max} = I_{к} U_{кэ}$. Обычно в справочнике приводятся значения этих параметров для температуры корпуса $T_{к1}$, при которой обеспечивается максимальная мощность рассеивания. При увеличении температуры выше $T_{к1}$ рассеиваемая мощность рассчитывается по формуле

$$P_{\max} = (T_{п} - T_{к}) / R_{ТПК}, \quad (8.29)$$

где $T_{п}$ – температура перехода; $T_{к}$ – температура корпуса; $R_{ТПК}$ – тепловое сопротивление переход–корпус.

Классификация и система обозначений биполярных транзисторов.

По мощности, рассеиваемой коллектором, транзисторы бывают: малой мощности $P_{к\max} \leq 0,3$ Вт; средней мощности $0,3$ Вт $< P_{к\max} \leq 1,5$ Вт; большой мощности $P_{к\max} > 1,5$ Вт.

По частотному диапазону в зависимости от граничной или максимальной рабочей частоты транзисторы делятся на низкочастотные $f_{гр} \leq 3$ МГц; средней частоты 3 МГц $< f_{гр} \leq 30$ МГц; высокочастотные 30 МГц $< f_{гр} \leq 300$ МГц; сверхвысокочастотные $f_{гр} > 300$ МГц.

Для маркировки биполярных транзисторов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.038-77. Обозначение биполярных транзисторов состоит из шести или семи элементов.

Первый элемент – буква русского алфавита или цифра, указывающая исходный материал: Г(1) – германий, К(2) – кремний, А(3) – арсенид галлия. Второй элемент – буква, указывающая на тип транзистора: Т – биполярный, П – полевой. Третий элемент – цифра, указывающая на частотные свойства и рассеиваемую мощность транзистора (табл. 4.1). Четвертый, пятый, (шестой) элементы – цифры, указывающие порядковый номер разработки. Шестой (седьмой) элемент – буква русского алфавита, условно определяющая классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии.

Примеры обозначения транзисторов: **КТ315А** – кремниевый БТ, малой мощности, высокой частоты, номер разработки 15, группа А; **КТ806Б** – кремниевый БТ, большой мощности, средней частоты, номер разработки 06, группа Б; **ГТ108А** – германиевый БТ, малой мощности, низкой частоты, номер разработки 08, группа А; **КТ3126Б** – кремниевый БТ, малой мощности, высокой частоты, номер разработки 126, группа Б.

Работа биполярного транзистора с нагрузкой. Рабочим режимом транзистора принято называть его работу под нагрузкой. При подключении нагрузки для транзистора в выходную цепь усилителя (цепь коллектора в схемах ОБ и ОЭ или цепь эмиттера в схеме с ОК) возможно использование транзистора как в усилительном, так и ключевом режимах.

В последнем случае (как правило схема с ОЭ) входной сигнал, т.е. переключающий импульс, подается непосредственно в цепь базы транзистора без дополнительного смещения.

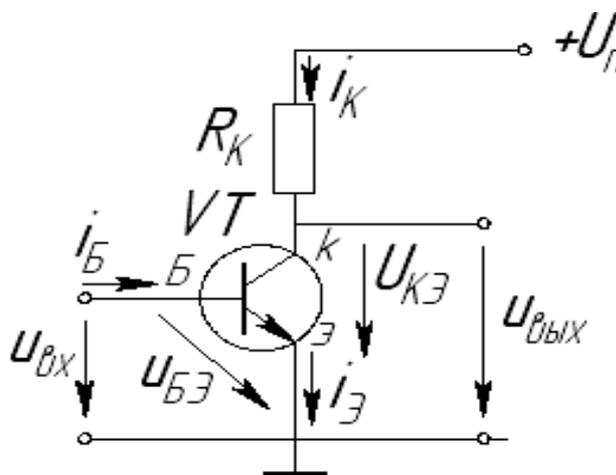


Рис.8.14. Схема включения БТ с нагрузкой с ОЭ

В режиме переключения при минимальном напряжении на входе ($U_{вх} = 0$) транзистор закрыт и находится в режиме отсечки, а при максимальном входном напряжении $U_{вх} \geq U_{пор} \sim 0,4-0,5$ В – транзистор открыт и находится в режиме насыщения.

В усилительном каскаде при отсутствии входного сигнала должны быть установлены постоянные значения токов и напряжений, которые определяют **статический режим работы (режим по постоянному току или режим покоя) транзистора**. Значения этих постоянных токов и напряжений определяются

напряжениями источника питания и сопротивлениями смещения (элементами схемы усилителя) во входной и выходной цепях активного элемента. Соответствующая режиму покоя точка на ВАХ транзистора называется **рабочей точкой**.

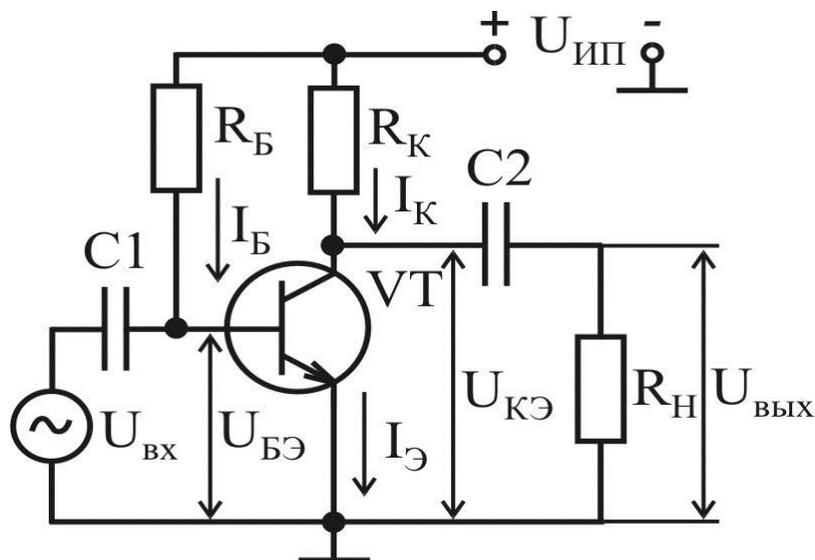


Рис.8.15. Схема включения БТ с ОЭ с нагрузкой в качестве усилителя

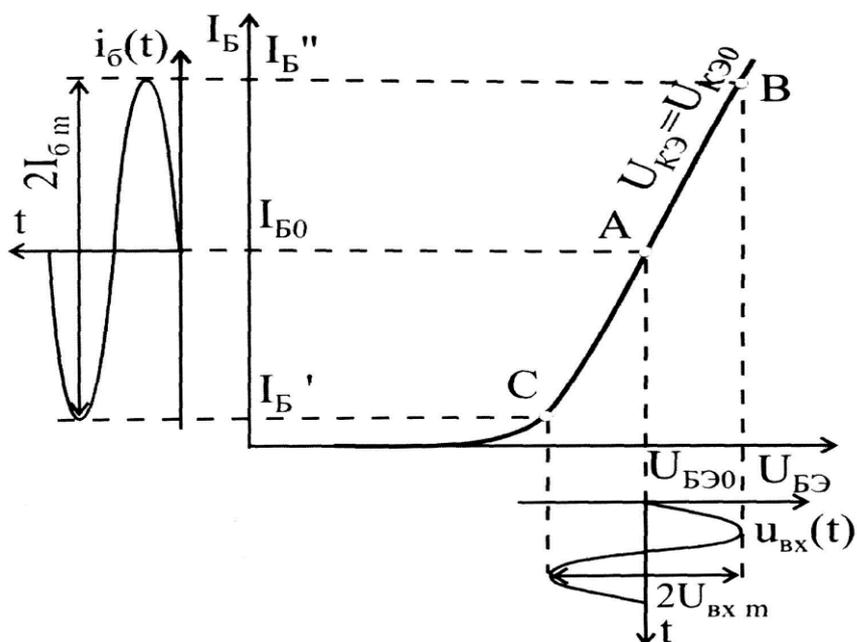


Рис. 8.16. Входная характеристики усилителя на БТ в схеме с ОЭ и вид сигнала в рабочей точке.

Положение рабочей точки выбирается с помощью внешних элементов схемы исходя из требуемого режима работы активного элемента. В

простейшем варианте усилителя величины тока и напряжения в базовой цепи может задаваться аналогично цепи коллектора (рис.8.16.). Для эффективной работы транзистора в наиболее распространенном малосигнальном режиме работы положение рабочей точки должно выбираться в центре линейной части входной характеристики транзистора (рис.8.17).

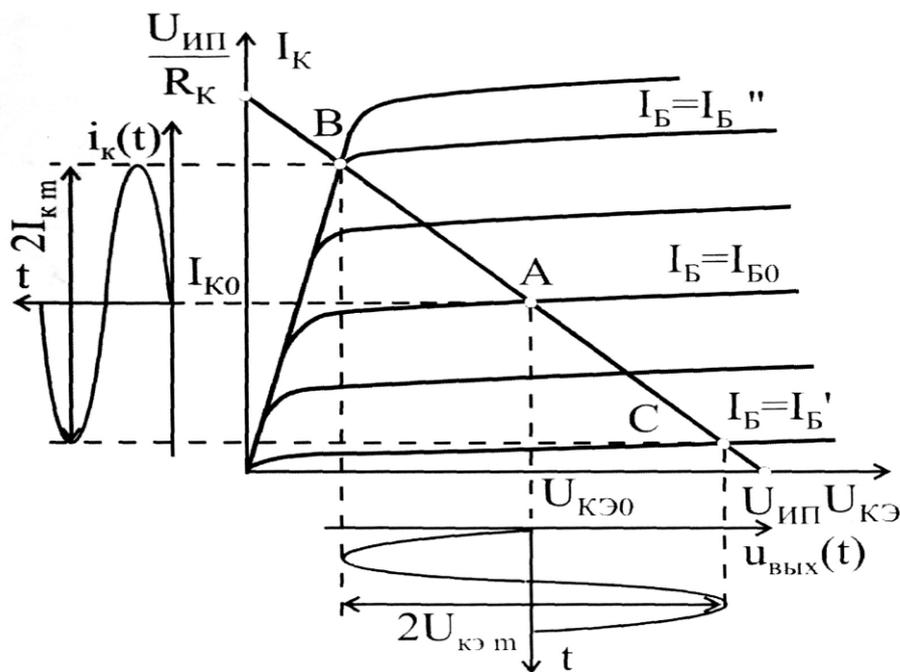


Рис.8.17. Нагрузочная прямая на выходных характеристиках БТ в схеме с ОЭ

На рис. 8.17. представлено семейство выходных ВАХ транзистора, на котором показано положение рабочей точки, соответствующей активному режиму работы БТ. Из рис 8.17. можно увидеть, что изменения тока во входной цепи транзистора в пределах от I_B' до I_B'' усиливаясь транзистором, в выходной цепи, в соответствии с нагрузочной прямой, вызывают гораздо большие изменения тока и напряжения.

Рабочая точка в выходной цепи лежит на пересечении характеристики, соответствующей току базы для схемы рис 8.20.

$$I_B = I_{B0} \approx U_{ИП} / R_B, \quad (8.30)$$

и нагрузочной прямой, которая задается уравнением

$$I_K = (U_{ИП} - U_{КЭ}) / R_K. \quad (8.31)$$

Нагрузочная прямая строится по двум точкам, одна из которых лежит на оси абсцисс ($U_{КЭ} = U_{ИП}$), а другая – на оси ординат ($I_{К} = U_{ИП}/R_{К}$). Точка А определяет постоянные составляющие коллекторного тока $I_{К0}$ и напряжения $U_{КЭ0}$. На семействе входных характеристик соответствующая рабочая точка находится на пересечении прямой $I_{Б} = I_{Б0}$ и характеристики, соответствующей напряжению $U_{КЭ} = U_{КЭ0}$.

Пусть на входе действует переменное гармоническое напряжение с низкой частотой и малой амплитудой $U_{вх м}$. При этом мгновенные значения напряжения и тока будут изменяться около среднего значения, определяемого рабочей точкой. Это изменение будет происходить в пределах линейной части входной характеристики (рис.8.20) и в пределах отрезка нагрузочной прямой на выходных характеристиках, который ограничен предельными значениями входного тока $I_{Б} = I_{Б}'' = I_{Б0} + I_{Бм}$, $I_{Б} = I_{Б}' = I_{Б0} - I_{Бм}$.

Поскольку амплитуды входных и выходных токов и напряжений усилителя связаны соотношениями $U_{вх м} = I_{бм} h_{1 лэ}$, если $R_{б} \gg h_{1 лэ}$, и $U_{вых м} = I_{км} R_{К}$, если $R_{н} \gg R_{К}$, то коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{вых м} / U_{вх м} = I_{км} R_{К} / I_{бм} h_{1 лэ} = h_{2 лэ} R_{К} / h_{1 лэ}, \quad (8.32)$$

а коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = \frac{U_{вых м} I_{км}}{U_{вх м} I_{бм}} = \frac{U_{вых м}^2 h_{1 лэ}}{R_{К} U_{вх м}^2} = \frac{I_{км}^2 R_{К}}{I_{бм}^2 h_{1 лэ}} = h_{2 лэ}^2 \frac{R_{К}}{h_{1 лэ}}. \quad (8.33)$$

8.2. Полевые транзисторы

Полевыми (униполярными) транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых электрический ток создается основными носителями заряда под действием продольного электрического поля, а управление током (модуляция) осуществляется поперечным электрическим полем, создаваемым на управляющем электроде.

Область полупроводникового прибора, по которой протекает управляемый ток, называется каналом. Электрод, через который носители

заряда втекают в канал, называется истоком, а электрод, через который они вытекают из канала, называется стоком. Электрод, используемый для управления площадью поперечного сечения канала (током канала), называется затвором. Затвор должен быть электрически изолирован от канала. В зависимости от способа изоляции различают: ПТ с управляющим р-п-переходом; ПТ с изолированным затвором или транзисторы металл – диэлектрик – полупроводник (МДП-транзисторы). В настоящее время широко применяются полевые транзисторы с барьером Шотки (ПТШ), в которых в качестве управляющего перехода используется барьер Шотки. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов, использующие свойства гетероперехода, работают в диапазоне СВЧ.

Структура полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа приведена на рис.8.18. На подложке из р-кремния создается тонкий слой полупроводника n-типа, выполняющий функции канала, т.е. токопроводящей области, сопротивление которой регулируется электрическим полем..

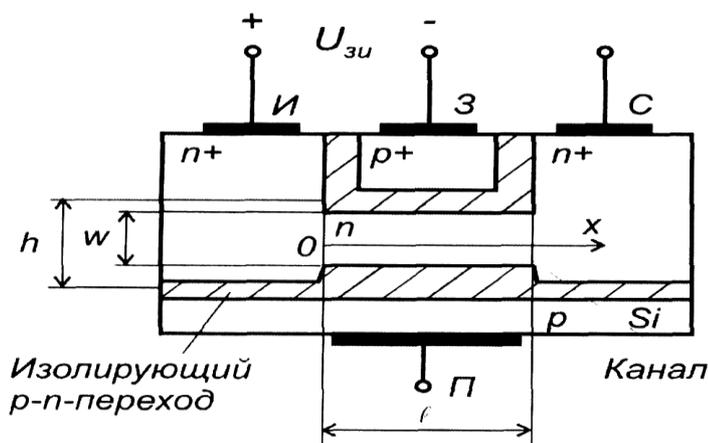


Рис.8.18. Устройство ПТ с управляющим р-п-переходом

Нижний р-п-переход изолирует канал от подложки и задает начальную толщину канала. Обычно выводы истока и подложки соединяют. Принцип действия ПТ с управляющим р-п-переходом основан на увеличении сопротивления активного слоя (канала) путем расширения р-п-перехода при подаче на него обратного напряжения. Для эффективного управления сопротивлением канала полупроводник, образующий область затвора

легирован сильнее (p^+), чем области канала (n), при этом расширение обедненного слоя происходит в сторону канала. Наиболее характерной чертой полевых транзисторов является высокое входное сопротивление, т.к. ток затвора мал, поэтому они управляются напряжением. слоями.

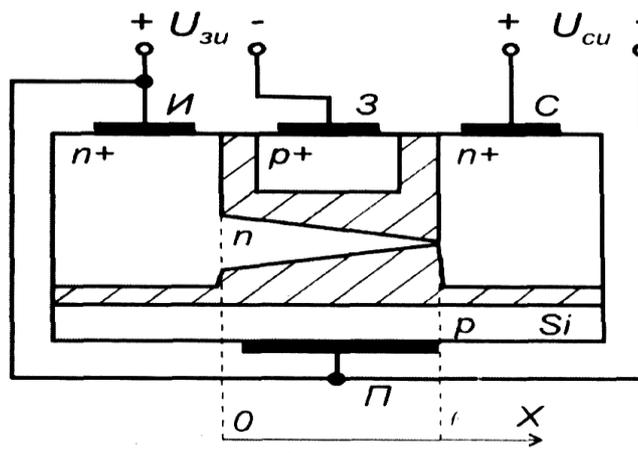


Рис.8.19. ПТ с управляющим р-п- переходом при $U_{зи} = U_{отс}$.

При $U_{зи} = 0$ сопротивление канала минимально $R_{к0} = \rho l/hw$, где ρ – удельное сопротивление полупроводника канала; l , w – длина и ширина канала соответственно, h – расстояние между металлургическими границами n -слоя канала. Чем больше обратное напряжение на затворе $U_{зи}$, тем шире p - n -переходы, тоньше канал и выше его сопротивление. При некотором напряжении на затворе, называемом напряжением отсечки $U_{зи\ отс}$, канал полностью перекрывается обедненными. Сопротивление канала становится очень большим и реально достигает значений десятки – сотни мегаом.

При подаче на сток положительного напряжения $U_{си}$ в канале возникает ток I_c , и напряжение в любом сечении канала $U_{ки}(x)$, измеренное относительно истока, является функцией расстояния до истока x за счет конечного значения удельного сопротивления канала. Поэтому и напряжение между любым сечением канала и затвором $U_{кз}(x)$ является функцией расстояния до истока – x . Минимальным является напряжение $U_{кз}(x)$ при $x = 0$ $U_{кз}(0) = U_{из} = -U_{зи}$, а максимальным $U_{кз}(x)$ при $x = l$ $U_{кз}(l) = U_{сз} = U_{си} + U_{из}$. Причем для управляющего перехода эти напряжения являются запирающими, поэтому ширина перехода возрастает от истока к стоку, а ширина канала уменьшается.

При некотором напряжении сток – исток, называемом *напряжением насыщения* $U_{си} = U_{си\text{ нас}}$, канал вблизи стока сужается до минимальной толщины (см. рис. 8.20). Сопротивление канала при этом $R_{к\text{ нас}} \neq \infty$ больше начального $R_{к0}$. Под действием напряжения насыщения через канал протекает ток максимальной величины $I_{с\text{ max}} = U_{си\text{ нас}}/R_{к\text{ нас}}$.

Вольт амперные характеристики ВАХ ПТ: выходные (стоковые) – $I_c = f(U_{си})|_{U_{зи}=\text{const}}$ и характеристики передачи (сток-затворные) – $I_c = f(U_{зи})|_{U_{си}=\text{const}}$ приведены на рис.8.20

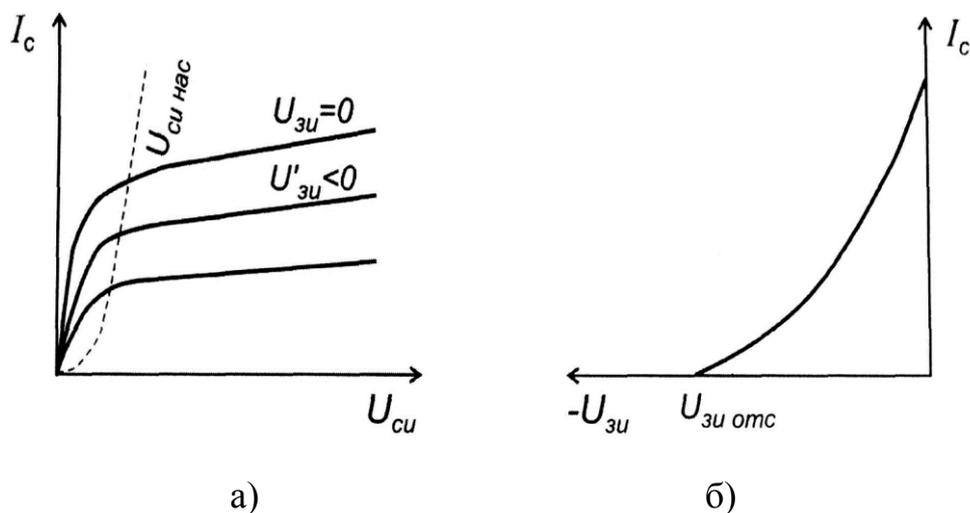


Рис.8.20. Вольт амперные характеристики ПТ: а) выходные (стоковые) – и б) характеристики передачи (сток-затворные)

Транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы). У полевых транзисторов с изолированным затвором между металлическим затвором и областью полупроводника находится слой диэлектрика – двуокись кремния SiO_2 . Это отражено и в их названии. Полевые транзисторы с изолированным затвором называются МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) или МОП (металл-окисел-полупроводник). Существуют МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналом.

В основе действия МДП-транзистора лежит эффект поля, представляющий собой изменение величины и типа электропроводности полупроводника вблизи его границы с диэлектриком под действием приложенного напряжения.

Рассмотрим МДП-структуру, изображенную на рис. 8.21. и содержащую подложку с проводимостью р-типа.

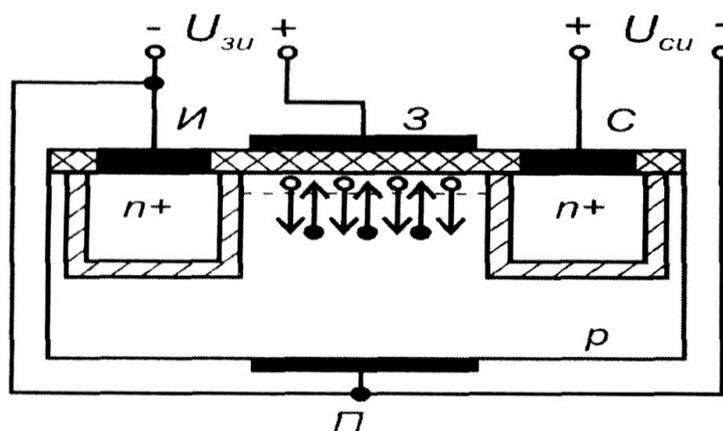


Рис.8.21. МДП транзистор с индуцированным каналом.

В МДП-транзисторе с индуцированным каналом n-типа (см. рис. 8.21.) при напряжении на затворе $U_{зи} = 0$ канал отсутствует и при подаче $U_{си} > 0$ ток стока будет равен нулю. Механизм образования канала состоит в том, что при подаче на затвор положительного напряжения дырки переносятся полем с поверхности в глубь полупроводника и в области под затвором образуется слой с уменьшенной их концентрацией

При некотором напряжении затвора, называемом пороговым $U_{зи\ пор}$, у поверхности полупроводника р-типа концентрация электронов превышает концентрацию дырок, т.е. появляется тонкий слой полупроводника с электропроводностью n-типа и происходит *инверсия электропроводности полупроводника*. Изменяя напряжения на затворе, можно изменять концентрацию электронов в канале, а значит, и его сопротивление. Если увеличивать положительное напряжение на затворе, концентрация электронов в канале увеличивается, то есть происходит обогащение канала электронами. На рис 8.22. показаны основные ВАХ ПТ: выходные (стоковые) – $I_c = f(U_{си})|_{U_{зи}=\text{const}}$ и характеристики управления (передачи) (сток-затворные) – $I_c = f(U_{зи})|_{U_{си}=\text{const}}$

. Поведение характеристик полностью соответствует физике процессов формирования тока в канале.

В справочниках обычно в качестве порогового приводится значение $U_{зи}$, при котором ток стока $I_c = 10$ мкА. При $U_{зи} > U_{зи\ пор}$ в МДП-транзисторах с каналом n-типа увеличение напряжения на затворе приводит к уменьшению сопротивления канала за счет обогащения его электронами, ток стока при этом увеличивается.

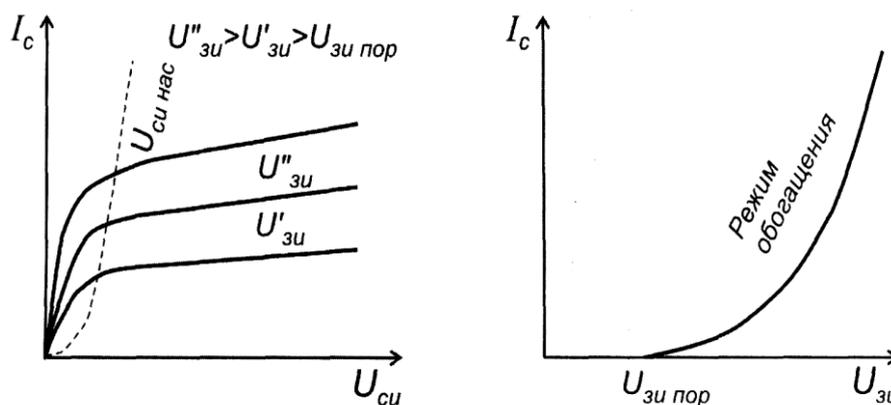


Рис. 8.22. ВАХ МДП транзистора с индуцированным каналом

В МДП-транзисторе со встроенным каналом n-типа, структура которого приведена на рис.8.23., уже при отсутствии внешних напряжений имеется канал, соединяющий области истока и стока. Поэтому при $U_{зи} = 0$ и $U_{си} > 0$ протекает ток стока. При увеличении положительного напряжения на затворе область канала обогащается электронами и ток стока возрастает.

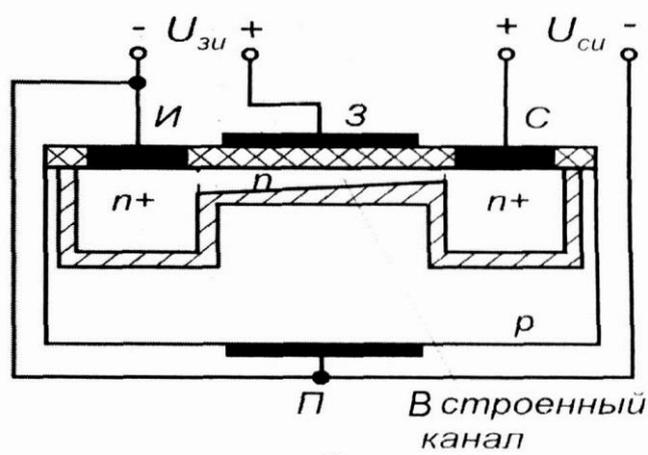


Рис. 8.23. МДП транзистор со встроенным каналом.

При увеличении отрицательного напряжения на затворе канал обедняется, (режим обеднения) и ток стока уменьшается. На рис. 8.23. показаны статические характеристики транзистора со встроенным каналом.

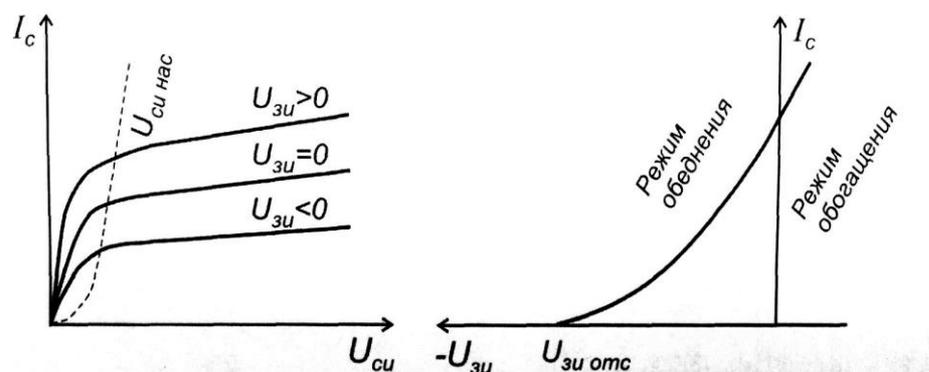


Рис 8.23. Статические характеристики МДП транзистора со встроенным каналом.

Полевые транзисторы включаются по схемам с общим затвором (ОЗ) (рис. 8.24 а), общим истоком (ОИ) (рис.8.24а, б), общим стоком (ОС) (рис. 8.24, в). Наиболее часто используется схема включения с ОИ.

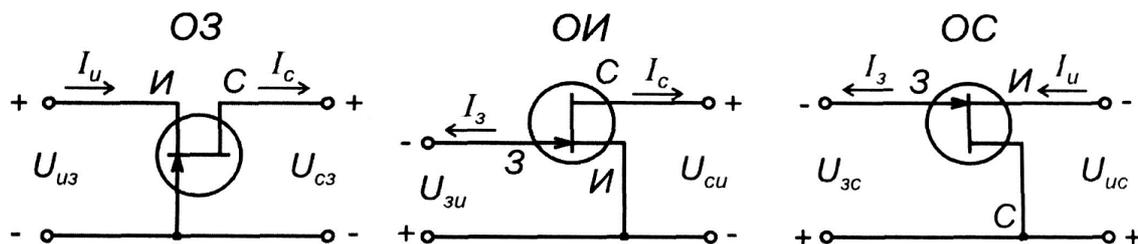


Рис. 8.24. схемы включения полевых транзисторов

Дифференциальные параметры полевых транзисторов. Основными дифференциальными параметрами полевых транзисторов являются: крутизна $S = dI_c/dU_{зи}|_{U_{си}=\text{const}}$; внутреннее (дифференциальное) сопротивление $R_i = dU_{си}/dI_{и}|_{U_{зи}=\text{const}}$; коэффициент усиления по напряжению $\mu = dU_{си}/dU_{зи}|_{I_c=\text{const}}$.

Все три параметра связаны выражением $\mu = SR_i$. Пример определения параметров транзисторов по статическим характеристикам показан на рис.8.25.

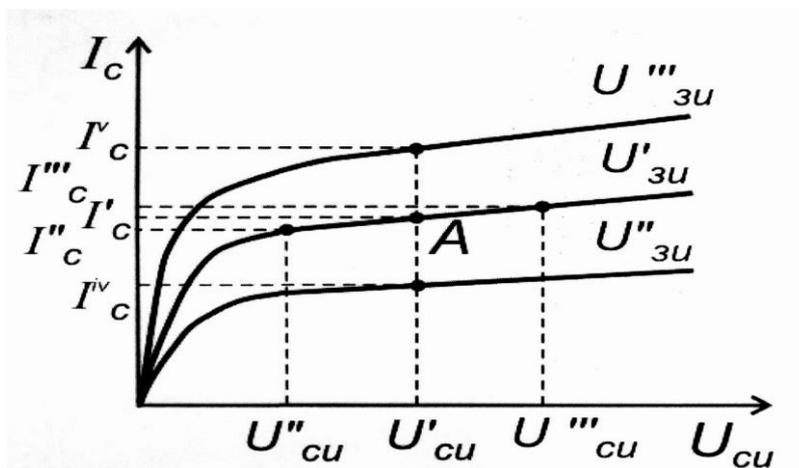


Рис.8.25. определение параметров полевых транзисторов

Для рабочей точки А (U'_{ci} , I'_c , U'_{zi}) крутизна и дифференциальное сопротивление определяются следующими выражениями:

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{zi}} \right|_{U_{ci}=U'_{ci}} = \left. \frac{I^v_c - I^{iv}_c}{U'''_{zi} - U''_{zi}} \right|_{U_{ci}=U'_{ci}} ; \quad (8.34)$$

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{ci}}{\Delta I_c} \right|_{U_{zi}=U'_{zi}} = \left. \frac{U'''_{ci} - U''_{ci}}{I'''_c - I'_c} \right|_{U_{zi}=U'_{zi}} . \quad (8.35)$$

В настоящее время широкое распространение получили ПТШ, выполненные из арсенида галлия и работающие на частотах до 30 ГГц, которые используются в маломощных усилителях СВЧ, усилителях мощности и генераторах.

Инженерные модели полевых транзисторов

В реальном транзисторе области канала и затвора представляют собой распределенную RC-цепь, поэтому полная эквивалентная схема транзистора предполагает использование модели с распределенными параметрами. Такой расчет сложен, поэтому для анализа процессов в транзисторе используют эквивалентные схемы с сосредоточенными параметрами (рис.8.26).

В схемах использованы обозначения: $S^*(w)$ – действующая крутизна транзистора; $C_{зи}$, $C_{зс}$, $R_{зи}$, $R_{зс}$ – соответственно емкости и сопротивления обратносмещенного перехода; $r_{зи}$ и $r_{зс}$ – омические сопротивления области затвора; r_{ci} – дифференциальное сопротивление канала (его нередко называют

внутренним сопротивлением); r_c – сопротивление области стока; $r_{и}$ – сопротивление области истока.

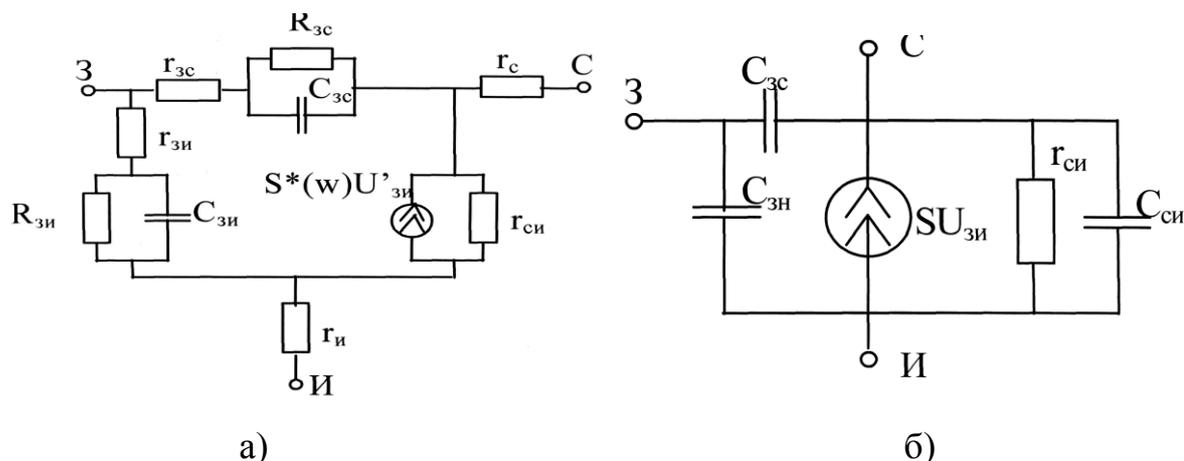


Рис. 8.26. Полная – а) и упрощенная – б) эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим р-п переходом.

На схемах рис.8.26. не учтены индуктивности выводов полевого транзистора (ПТ), влияние которых проявляется в диапазоне частот свыше 300 МГц.

Упрощение эквивалентной схемы произведено с учетом некоторых практических соображений. Например, сопротивления $R_{зи}$, $R_{зс}$ имеют очень большие величины 10^8-10^{10} Ом, и в большинстве случаев их можно не учитывать. Влияние омических сопротивлений области затвора $r_{зи}$ и $r_{зс}$ (их величина не превышает 10–20 Ом) незначительно вплоть до предельной частоты генерации. Влияние дифференциального сопротивления канала на усилительные и частотные свойства ПТ в рабочем диапазоне частот (до $0,7 f_T$) может также не учитываться. Для современных ПТ граничная частота крутизны превышает предельную частоту генерации транзистора в 2–5 раз, поэтому в диапазоне до $0,7 f_T$ зависимость крутизны ПТ от частоты может не учитываться: граничная частота крутизны определяется как частота, на которой модуль крутизны уменьшается в $\sqrt{2}$ по сравнению с его максимальным значением.

В упрощенной схеме ПТ крутизна S – реальная величина, измеренная в статическом режиме. Эта схема широко используется разработчиками электронной аппаратуры для инженерных расчетов усилителей на ПТ.

Полевой МОП-транзистор с изолированным затвором. В МОП-транзисторах необходимо учитывать активное влияние подложки, которое в эквивалентной схеме для МОП-транзистора можно отразить в виде генератора тока. В реальных дискретных и интегральных схемах подложку обычно соединяют с истоком и тогда генератор тока можно исключить из схемы. Кроме того, сопротивления участков затвор–исток и затвор–сток в МОП-транзисторе учитывают сопротивление диэлектрика в области затвора. Входное сопротивление ПТ со стороны затвора составляет не менее 10^{14} – 10^{17} Ом, поэтому с этими сопротивлениями практически можно не считаться. Поэтому в данной работе будет дана только упрощенная эквивалентная схема МОП-транзистора (рис.8.27.) используемая в типовых инженерных расчетах усилителей.

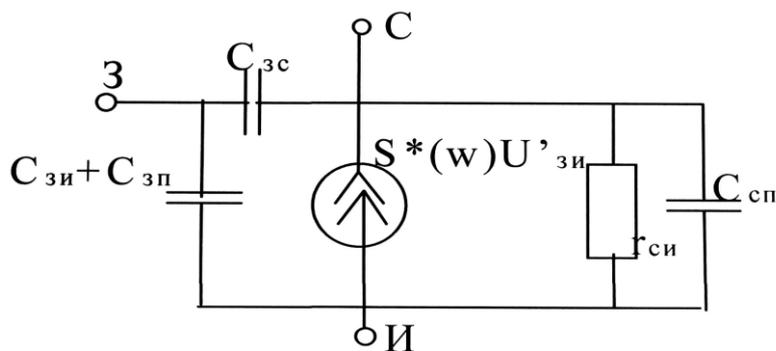


Рис.8.27. Упрощенная эквивалентная схема МОП-транзистора.

Крутизна по затвору в этой схеме предполагается не зависящей от частоты. Кроме того, в схеме отсутствует сопротивление участка «подложка–сток» ($R_{пс}$), но оно так велико по сравнению с сопротивлением канала ($r_{си}$), что с его шунтирующим действием можно не считаться.

ТЕМА 9. СТРУКТУРЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Твердотельная интегральная микросхема – это законченный функциональный электронный узел, элементы которого конструктивно не разделены и изготавливаются в едином технологическом процессе, в объеме и на поверхности полупроводникового кристалла.

Процесс создания полупроводниковой микросхемы сводится к формированию в приповерхностном слое полупроводниковой пластины элементов (транзисторов, диодов, резисторов) и к последующему их объединению в функциональную схему пленочными проводниками по поверхности пластины (межсоединения).

Для характеристики типа применяемых в ИМС транзисторов, а также технологических методов их изготовления пользуются понятием структура ИМС. В общем случае структура ИМС определяет последовательность слоев в составе микросхемы по нормали к поверхности кристалла, различающихся материалами, толщиной и электрофизическими свойствами. Так, в практике производства ИМС используют структуры на биполярных транзисторах (в частности, диффузионно-планарные, эпитаксиально-планарные и др.) на МДП-приборах, структуры И²Л и т. д. Заданная структура ИМС позволяет установить состав и последовательность технологических методов обработки пластины и определить технологические режимы для каждого метода.

9.1. Основные виды структур ИМС

На рис. 9.1 представлен фрагмент ИМС с диффузионно-планарной структурой, включающий биполярный транзистор и резистор. Для одновременного формирования транзистора и резистора необходимо, чтобы р-область резистора и изолирующая его п-область имели глубину и электрофизические свойства, одинаковые с областями соответственно базы и коллектора транзистора. Аналогичное соответствие должно обеспечиваться для всех элементов, входящих в состав ИМС. Оно является главным признаком и непременным условием применения интегральной технологии и позволяет минимизировать число технологических операций, составляющих цикл обработки.

Таким образом, интегральная технология представляет собой

совокупность методов обработки, позволяющую при наличии структурного подобия (технологической совместимости) различных элементов ИМС формировать их одновременно в едином технологическом процессе.

Важно отметить, что выпускаемые в составе той или иной серии ИМС различного функционального назначения имеют единую структуру и, следовательно, единую базовую технологию. Для базовой технологии характерны не только определенная технологическая последовательность обработки и определенный комплект оборудования, но и постоянная, отработанная настройка оборудования, т. е. жесткие технологические режимы. Последнее является существенным для экономичности и эффективности процесса производства ИМС.

Очевидно, что базовая технология не зависит от размеров элементов в плане, их взаимного расположения и рисунка межсоединений. Все эти свойства конкретной ИМС определяются в процессе топологического проектирования, а обеспечиваются фотолитографией — процессом избирательного травления поверхностных слоев с применением защитной фотомаски.

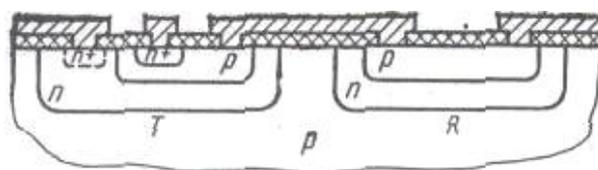


Рис. 9.1. Фрагмент ИМС с диффузионно-планарной структурой:

Т — транзистор; R — резистор

Топология микросхемы — чертеж, определяющий форму, размеры и взаимное расположение элементов и соединений ИМС в плоскости, параллельной плоскости кристалла. Поскольку элементы и соединения формируются путем последовательного отдельных слоев (коллекторный слой, базовый слой и т. д.), различают общую и послойную топологию (рис. 9.2 в соответствии с рис. 9.1). По чертежу базового слоя, например, может быть разработан чертеж фотошаблона, с помощью которого создают окисную маску для избирательной диффузии примеси р-типа.

При заданном наборе элементов топология ИМС (точнее, рисунок

межсоединений) определяет ее функциональные свойства. Можно представить себе кристалл, содержащий некоторый универсальный набор элементов (очевидно, с некоторой избыточностью) и сплошной слой металлизации. Такие кристаллы в составе общей пластины могут быть «доработаны» по желанию заказчика до конкретных функциональных ИМС в зависимости от рисунка межсоединений, выполненного с помощью соответствующего фотошаблона. Описанная универсальная пластина-заготовка, получившая название базового кристалла, позволяет обеспечить экономичность производства ИМС более узкого, специального применения, выпускаемых в небольших количествах.

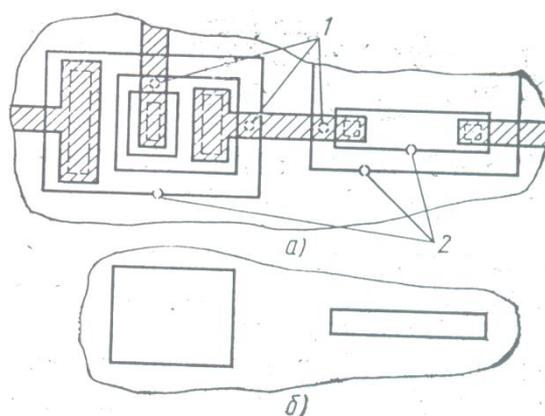


Рис. 9.2. Фрагменты общей (а) и послойной (базового слоя) (б) топологии ИМС:

- 1 — дефекты, возникшие на этапе металлизации;
- 2 — дефекты, возникшие на этапе диффузии примеси

9.2 Гибридные и совмещенные интегральные микросхемы

Применение полупроводниковых интегральных микросхем, однако, ограничено рядом причин. Одна из них заключается в том, что производство полупроводниковых ИМС оказывается целесообразным лишь в крупносерийном и массовом производстве, когда становятся экономически оправданными значительные затраты на подготовку производства (главным образом на проектирование и изготовление комплекта фотошаблонов). Другая причина лежит в ряде ограничений на параметры элементов и ИМС в целом: невысокая точность диффузионных резисторов ($\pm 10\%$) и отсутствие возможности их подгонки, невозможность получать конденсаторы достаточно

больших емкостей, температурные ограничения, ограничения по мощности и др.

Наряду с полупроводниковыми ИМС поэтому разрабатывают и выпускают комбинированные гибридные интегральные микросхемы. Технологической основой таких ИМС являются процессы нанесения резисторов, конденсаторов, проводников и контактов в виде пленок соответствующих материалов на диэлектрическую пассивную подложку. Поскольку активные элементы - транзисторы, диоды - не могут быть изготовлены по пленочной технологии, их изготавливают по известной полупроводниковой технологии, а затем монтируют на общей подложке (рис. 9.3).

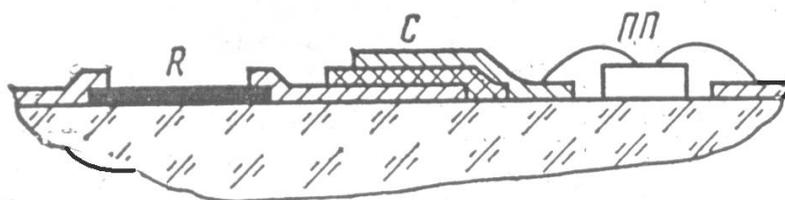


Рис. 9.3. Фрагмент гибридной ИМС:

R — резистор, С — конденсатор, ПП — кристалл полупроводникового прибора

Гибридная пленочная интегральная микросхема — ИМС, которая наряду с пленочными элементами, полученными с помощью интегральной технологии, содержит компоненты, имеющие самостоятельное конструктивное оформление. В зависимости от метода нанесения пленочных элементов на подложку различают тонкопленочные (напыление в вакууме) и толстопленочные (трафаретная печать) гибридные ИМС.

Гибридные ИМС имеют худшие технические показатели (размеры, массу, быстродействие, надежность), чем полупроводниковые ИМС. В то же время они позволяют реализовать широкий класс функциональных электронных схем, являясь при этом экономически целесообразными в условиях серийного и даже мелкосерийного производства. Последнее объясняется менее жесткими требованиями к фотошаблонам и трафаретам, с помощью которых формируют

пленочные элементы, а также применением менее дорогостоящего оборудования. В составе пленочных ИМС возможно получить резисторы с точностью $\pm 5\%$, конденсаторы $\pm 10\%$, а с применением подгонки — до десятых долей процента. Гибридно-пленочная технология позволяет реализовать практически любые функциональные схемы.

Стремление расширить область применения полупроводниковых ИМС привело к созданию другого типа комбинированных микросхем (рис. 4). При их изготовлении полупроводниковую технологию совмещают с тонкопленочной технологией для создания некоторых пассивных элементов, к которым предъявляются повышенные требования по точности и температурной стабильности.

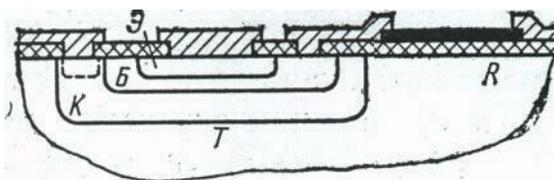


Рис. 9.4. Фрагмент совмещенной ИМС:

Т — транзистор, R — пленочный резистор.

Совмещенная интегральная микросхема — это комбинированная интегральная полупроводниковая микросхема, в которой некоторые элементы (обычно пассивные) наносят на поверхность пластины (кристалла) методами пленочной технологии.

9.3. Степень интеграции

Известно, что полупроводниковые интегральные микросхемы по сравнению с аналогичными печатными схемами с навесными элементами имеют лучшие технико-экономические показатели: размеры и массу, надежность, быстродействие, стоимость. Известно также, что эти показатели улучшаются с повышением функциональной сложности ИМС, т. е. с увеличением числа элементов, полученных с помощью интегральной технологии, с возрастанием степени интеграции.

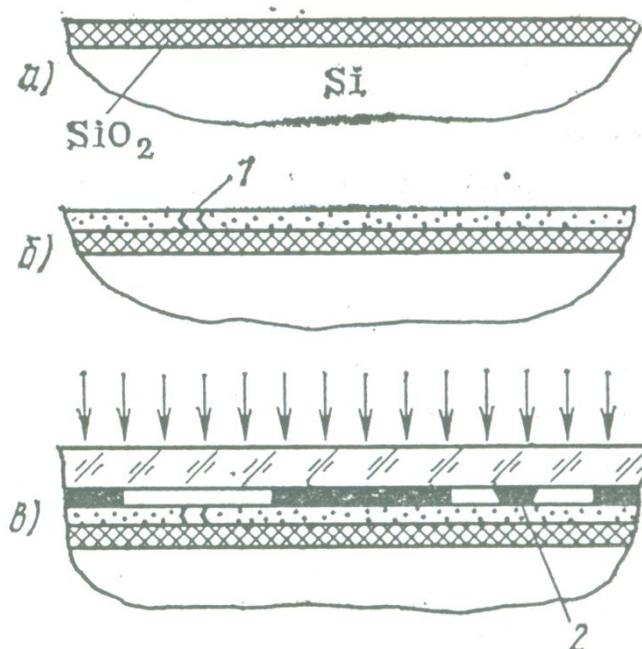
Степень интеграции — это показатель степени сложности ИМС,

характеризуемой числом элементов, полученных с помощью интегральной технологии на общем кристалле. Для характеристики степени интеграции используют показатель $K=\lg N$, где N — число элементов ИМС. В зависимости от значения K условно различают ИМС малой степени интеграции, средней степени интеграции, большие интегральные схемы (БИС) и сверхбольшие (СБИС).

Повышение степени интеграции ИМС является, таким образом, важнейшей задачей микроэлектроники, в значительной мере определяющей основные тенденции схмотехнических и конструкторско-технологических разработок.

9.4 Факторы, ограничивающие степень интеграции

Среди факторов, ограничивающих степень интеграции, важное место занимает технологический фактор. В полупроводниковой интегральной микросхеме нельзя заменить или даже исправить дефектный элемент. При наличии хотя бы одного дефектного элемента ИМС целиком бракуется. Плотность дефектов в свою очередь -определяется качеством технологического процесса и прежде всего процесса фотолитографии.



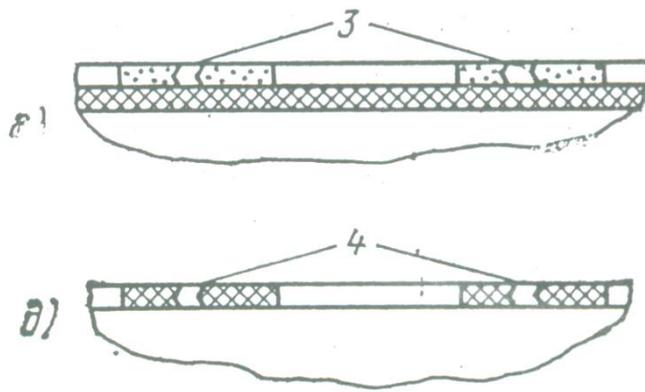


Рис. 9.5. Формирование окисной маски:

- а — окисление поверхности пластины;
 б — нанесение фотослоя (1 — «прокол» в фотослое);
 в — экспонирование через фотошаблон (2 — непрозрачный дефект на фотошаблоне); г — проявление и образование фотомаски (3 — «проколы» в фотомаске); д — травление окисла и снятие фотомаски (4 — «проколы» в окисной маске)

Качество защиты пластины окисной пленкой, с помощью которой избирательно вводят примеси для получения р- и n-областей (рис. 9.5), зависит от ее однородности, сплошности. При наличии в слое окисной маски микроотверстий («проколов») примесь проникает через них, образуя в полупроводнике незапланированные легированные микро-области, которые (в зависимости от их расположения) могут вывести соответствующий элемент из строя.

Причинами образования «проколов» могут явиться неоднородности в светочувствительном слое (частицы пыли, пузырьки и т. п.), а также дефекты в рисунке фотошаблона («проколы» на непрозрачных участках рисунка или светонепроницаемые точечные дефекты на прозрачных участках). Элемент (а следовательно, и вся схема) выходит из строя при попадании дефекта в некоторую критическую зону. Например, в процессе эмиттерной диффузии примесей через проколы в окисной маске могут образоваться высоколегированные микрообласти n+-типа. Такие области, если они приходятся на граничную зону коллекторных и базовых областей, приводят к возникновению токов утечки через переход и пробой перехода (дефекты 2, см. рис. 9.2). Проколы в окисной маске, образующиеся при вытравливании в

окисном слое окон под металлические контакты, приводят на этапе металлизации пластины к образованию паразитных контактов (дефекты 1, см. рис. 9.2) и к коротким замыканиям областей эмиттер — база, база — коллектор, резистор—изолирующая область и т. д.

Таким образом, для конкретной ИМС на каждом этапе обработки можно говорить о некоторой критической площади, обуславливающей вероятность выхода из строя интегральной микросхемы. Если обозначить $S_{кр}$ критическую площадь кристалла ИМС, просуммированную по всем циклам фотолитографической обработки, d — среднее число проколов на единицу площади, а распределение числа проколов, приходящихся на кристалл ИМС, принять пуассоновским, то вероятность получения годного кристалла ИМС после всех операций обработки:

$$P = e^{-S_{кр}d} \quad (9.1)$$

Из соотношения (9.1) прежде всего следует, что повышение степени интеграции уменьшает вероятность выхода годных ИМС, если площади элементов и качество процесса фотолитографии остаются на неизменном уровне. Таким образом, повышение степени интеграции ИМС должно сопровождаться уменьшением площади элементов и совершенствованием процесса формирования защитных фотомасок. Высокое качество фотомаски предполагает прежде всего отсутствие в фотослое пылевидных частиц, газовых (воздушных) включений, остатков растворителя, а также высокое качество фотошаблонов (низкую плотность дефектов). В свою очередь, при изготовлении фотошаблонов также используются фотомаски, к которым предъявляются еще более жесткие требования.

Для повышения качества фотолитографических процессов в производственных помещениях создают обеспыленную атмосферу, а для производственного персонала устанавливают определенные правила производственной гигиены.

С другой стороны, из выражения (9.1) видно, что повышение степени интеграции при неизменном качестве технологического процесса возможно за счет уменьшения площади, занимаемой элементами ИМС, и, следовательно,

площади критических зон. К этому же результату приводит и сокращение числа циклов фотолитографии. Этот второй путь реализуется разработкой новых типов структур либо с уменьшенной площадью, либо таких, для производства которых требуется меньшее число фотолитографических циклов обработки (либо то и другое одновременно).

На рис. 9.6 представлены структуры ИМС (на примере инвертора). Сокращение площади структуры S в случае КМДП достигнуто заменой коллекторного резистора дополняющим (нагрузочным) МДП-транзистором, а в случае И²Л — многоколлекторным биполярным транзистором, причем благодаря применению n - p - n - и p - n - p -транзисторов достигается совмещение отдельных областей переключающего транзистора и транзистора-инжектора. Во всех трех случаях сохраняется свойство универсальности структур: каждая из них пригодна для построения широкого класса функциональных электронных устройств.

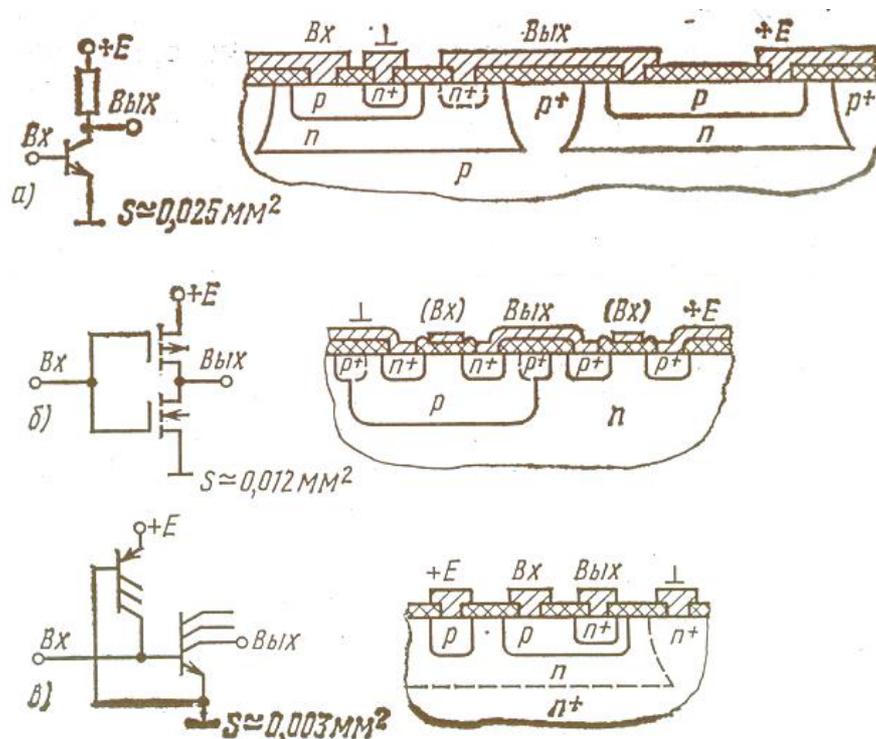


Рис. 9.6. Реализация инвертора с помощью различных структур:

- а — эпитаксиально-планарной с питанием через резистор;
- б — КМДП-структуры;
- в — с инжекционным питанием (И²Л)

Для создания устройств более узкого функционального класса могут быть использованы специальные структуры, позволяющие достичь высокой степени интеграции ИМС. Примером могут служить структуры на приборах с зарядовой связью (ПЗС), на которых могут быть построены сдвиговые регистры, запоминаящие устройства и некоторые логические элементы.

9.5. Причины ограничивающие минимальные размеры интегральных микросхем

Для выбранной структуры ИМС минимальные размеры элементов ИМС в целом зависят от возможностей фотолитографического процесса, которые характеризуются тремя основными параметрами: 1) минимальным размером элемента, надежно воспроизводимым на полупроводниковой пластине, которым оценивается разрешающая способность процесса; 2) предельными отклонениями размеров элементов рисунка одного топологического слоя от номинальных; 3) предельным смещением рисунка одного топологического слоя относительно предыдущего (например, базового слоя относительно коллекторного, эмиттерного относительно базового и т. д.). Все эти параметры имеют характер технологических ограничений и учитываются при определении размеров областей в плане, т. е. при топологическом расчете. Основной тенденцией развития литографических процессов является повышение разрешающей способности этапа экспонирования рисунка.

Важнейшей причиной, ограничивающей минимальные размеры элементов при экспонировании через фотошаблон, является дифракция света. Поэтому стремятся использовать излучения с более короткими, чем световые, длинами волн (электронные, рентгеновские). В связи с этим все большее развитие получают электроно- и рентгенолитография.

Для реализации высоких потенциальных возможностей, заложенных в электроно и рентгенолитографии, "необходимы и более совершенные методы травления, с тем чтобы уменьшить разброс в размерах элементов на полупроводниковой пластине. Применение химических растворов для избирательного травления, например окиси кремния, становится неприемлемым из-за бокового подтравливания, размеры которого нестабильны

по площади пластины. Здесь перспективным является распыление ионной бомбардировкой при наличии защитной маски (вакуум-плазменное травление).

Наконец, для уменьшения погрешности совмещения топологических слоев ИМС требуются методы и средства совмещения шаблонов с подложкой, обладающие повышенной точностью, а также специальные приемы структурно-топологического проектирования, позволяющие достичь эффекта самосовмещения. Технологически самосовмещение достигается за счет естественных физико-химических механизмов, для чего необходимо расширять круг технологических методов обработки (осаждение из газовой фазы, электролитическое окисление и наращивание, ионное легирование и т. п.).

Повышение качества маскирующих пленок, разработка структур малой площади, совершенствование процессов литографии — все это прямой, естественный путь повышения степени интеграции ИМС. Он отражает непрерывный эволюционный процесс совершенствования производства ИМС, постепенного накопления условий и возможностей для повышения степени интеграции.

9.6. Микросборка оптоэлектронные ИМС

Требования разработки сложных функциональных устройств в миниатюрном исполнении опережают возможности интегральной технологии и заставляют прибегать к компромиссным конструктивно технологическим решениям. Одно из таких решений — объединение ряда кристаллов ИМС средней степени интеграции с помощью пленочных межсоединений на общей диэлектрической подложке и в общем корпусе [создание так называемой микросборки (рис. 9.7)].

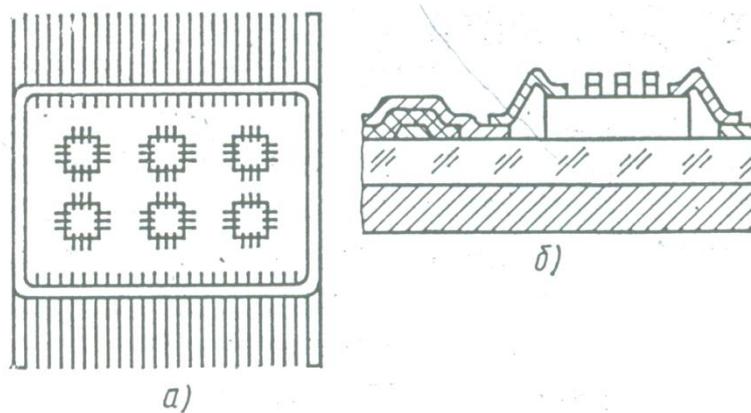


Рис. 9.7. Микросборка цифрового устройства:

- а — общий вид (со снятой крышкой);
- б — кристалл ИМС и участок межсоединений.

В общем случае микросборка представляет собой изделие типа большой гибридной интегральной микросхемы, включающее элементы, компоненты и (или) интегральные микросхемы (корпусные и безкорпусные). Микросборки позволяют в малых размерах реализовать устройства со сложными функциями. Их разрабатывают и изготавливают применительно к конкретной радиоэлектронной аппаратуре с целью улучшения показателей ее миниатюризации. Типовой элемент замены (ТЭЗ) современных ЭВМ обычно выполняют на основе многослойной печатной платы (МПП) и набора ИМС в индивидуальных корпусах. Освобождая кристаллы ИМС от корпусов и заменяя печатный монтаж пленочными микросоединениями, получают микросборку, выполняющую функции ТЭЗ, но обладающую малыми размерами и массой. Этот пример иллюстрирует общую тенденцию в развитии конструкций ЭВА, сопровождающую процесс повышения степени интеграции ИМС (передачу ей функций ТЭЗ, передачу ТЭЗ функций панели или блока и т. д., в том числе замену печатными платами трудоемкого проводного монтажа) и состоящую в проникновении ИМС на все более высокие уровни функциональной иерархии ЭВА. Это объективно приводит к повышению технологичности конструкций ЭВА.

Использование микросборок дает возможность преодолеть и еще одно противоречие, порождаемое требованием повышения степени интеграции, а именно: сужение области применения функционально сложных ИМС,

увеличение их номенклатуры и связанные с этим трудности стандартизации. Поскольку микросборка представляет собой набор кристаллов ИМС средней степени интеграции, производство которых обособлено от производства собственно микросборок, появляется возможность изготавливать микросборки по единой типовой технологии независимо от состава кристаллов ИМС и функционального назначения микросборки.

Высокий процент выхода годных БИС может быть достигнут за счет элементной избыточности. При проектировании топологии функциональную схему БИС расчленяют на ряд составных функциональных частей (ячеек), каждую из которых дублируют в пределах кристалла БИС несколько раз, образуя группы. После формирования структур создают первый уровень межсоединений и периферийных контактов в пределах каждой ячейки. В результате контроля на функционирование определяют дефектные ячейки.

Второй уровень межсоединений (а при необходимости и третий) объединяет группы ячеек в общую систему, причем дефектные и неиспользуемые годные ячейки отключают от общей схемы путем разрыва проводников с помощью лазера или фотолитографии.

Микросборки и метод элементной избыточности — это компромиссное решение задачи повышения степени интеграции, так как оба метода основаны на использовании экономически целесообразной степени интеграции ячеек — составных частей БИС. В первом случае дефектные ячейки-кристаллы отбраковываются на ранних стадиях процесса и не пропускаются на сборку, во втором — сохраняются в составе кристалла, увеличивая его площадь. Однако во втором случае обеспечиваются более высокие быстродействие и надежность.

Конструкторско-технологические возможности для повышения степени интеграции ИМС далеко не исчерпаны. Однако уменьшение размеров элементов требует и снижения потребляемой ими мощности, что влечет за собой снижение быстродействия, помехоустойчивости, надежности. Уменьшение объемов, занимаемых элементами, приводит к тому, что флуктуации электрофизических свойств полупроводникового материала в

полупроводниковых) и новых методах их обработки. Подобно тому, как основой микроэлектроники в начале ее развития был опыт производства полупроводниковых приборов, в функциональной микроэлектронике используется весь арсенал технологических методов и средств современной микроэлектроники.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

Практические работы выполняются по индивидуальному графику. График выполнения практических работ формируется преподавателем в начале каждого семестра и представляется студентам на первом аудиторном занятии практикума. Выполнение практических работ предполагает значительную самостоятельную работу как на этапе предварительной подготовки к работе, так и при выполнении работы, оформлении отчета и подготовки к «защите» работы.

2.1 Подготовка к выполнению практических работ

Подготовка к практической работе осуществляется студентом *до аудиторных занятий*, в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 3.3).

Студент обязан приходить на занятие подготовленным. Наличие «заготовки» к лабораторной работе является обязательным условием допуска студента к выполнению практической работы.

Студенты, не имеющие подготовки, к выполнению практической работы не допускаются.

2.2 Выполнение практической работы

На выполнение каждой практической работы отводится 3 часа аудиторного времени, в это время включается: получение допуска к работе, выполнение необходимых измерений и «защита» работы выполненной на предыдущем занятии.

Перед выполнением работы преподаватель проверяет степень подготовленности каждого студента. Для этого студент должен предоставить «заготовку» отчета в индивидуальном журнале ответить на следующие вопросы:

– Какова цель экспериментальной задачи? Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?

– Каков принцип работы экспериментальной установки? Перечислите основные этапы эксперимента.

Получив допуск к выполнению практической работы, студент должен ознакомиться с измерительными приборами, используемыми в процессе выполнения работы, получить у лаборанта необходимое дополнительное оборудование, подготовить оборудование к проведению эксперимента согласно методическому руководству. После чего предъявить подготовленное к работе оборудование для проверки лаборанту или преподавателю. Только после получения разрешения от преподавателя или лаборанта можно приступать к выполнению измерений.

При выполнении работы следует соблюдать правила техники безопасности, обращаться с приборами и оборудованием следует бережно и аккуратно, применять приборы только в соответствии с их назначением.

Выполнив все измерения, выключить установку, предъявить преподавателю результаты измерений для проверки. Если при записи результатов или в ходе эксперимента была допущена ошибка, опыт повторяется вновь. Если результаты удовлетворительны, преподавателем делается отметка о выполнении студентом лабораторной работы (ставится подпись и дата в отчете студента).

Отчеты без подписи преподавателя в дальнейшем к «защите» не принимаются.

После подписи результатов преподавателем, студенту необходимо привести лабораторную установку в исходное состояние, сдать лаборанту выданное дополнительное оборудование и привести в порядок рабочее место.

2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» практической работы

Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы осуществляется студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 3.3).

После оформления отчета студент готовится к «защите» лабораторной работы, изучая теоретические основы данной темы, ориентируясь на

контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях. Для получения зачета по практической работе студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и «защищает» его в ходе последующего собеседования.

2.4 Наименование предлагаемых к выполнению практических работ и методические указания к ним

Практическая работа №1. Исследование электрических свойств проводниковых материалов

Цель работы: Изучение зависимости удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры, определение среднего температурного коэффициента удельного сопротивления исследуемых проводниковых материалов.

Основные теоретические положения

Электропроводность характеризует перенос электрических зарядов в веществе под действием внешнего электрического поля. В изотропном теле (жидком, твердом или газообразном), при приложении к нему разности потенциалов U [В] создается однородное электрическое поле: $E = U / l$ [В/м], где l [м] – расстояние между точками приложения U . В результате через него начнет протекать электрический ток, совпадающий по направлению с полем E , плотность которого j [А/м²]. Зависимость плотности тока, протекающего при приложении электрического поля, описывается выражением: $j = \sigma E$, где σ [См/м] – удельная электропроводность. Обратная ей величина $\rho = 1 / \sigma$ [Ом·м] называется удельным электрическим сопротивлением.

К проводникам относят материалы, удельное электрическое сопротивление которых в нормальных условиях лежит в диапазоне $\rho = 10^8 \dots 10^{-5}$ Ом·м. Основными электрическими характеристиками проводниковых материалов являются:

1. Удельное электрическое сопротивление ρ ;
2. Температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ ;

Наилучшими проводниками электрического тока являются металлы.

В основе классической электронной теории металлов, развитой Друде и Лоренцем, лежит представление об электронном газе, состоящем из свободных

(коллективизированных) электронов. Электронному газу приписываются свойства идеального газа, т.е. движение электронов подчиняется законам классической статистики.

Если считать, что атомы в металле ионизированы однократно, то концентрация свободных электронов будет равна концентрации атомов и может быть рассчитана по формуле:

$$n = \frac{d}{A} N_A \text{ [м}^{-3}\text{]}, \quad (1.1)$$

где d [г/м³] – плотность материала, A [г/моль] – атомная масса, $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ [моль⁻¹] – число Авогадро.

Средний промежуток времени между последовательными столкновениями электрона является средним временем свободного пробега (τ). Все время, пока электрон свободен, он может ускоряться электрическим полем. Это ускорение увеличивает скорость, которой электрон уже обладает. При следующем столкновении электрон отдает решетке избыток импульса, который он получил со времени последнего столкновения, и изменяет траекторию своего движения, т.е. рассеивается. Средние свободные пробеги электронов (L) в кристалле ограничиваются этими столкновениями.

Приложение внешнего напряжения приводит к увлечению электронов в направлении действующих сил поля, т.е. электроны получают некоторую добавочную (дрейфовую) скорость направленного движения, благодаря чему и возникает электрический ток. Плотность тока в проводнике определяется выражением:

$$j = qn\langle v \rangle \quad (1.2)$$

где v - средняя скорость направленного движения носителей заряда, $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ [Кл] – заряд электрона;

$$\langle v \rangle = a \cdot \langle \tau \rangle = \frac{F}{m} \langle \tau \rangle = \frac{qE \langle \tau \rangle}{m} \quad (1.3)$$

где a – ускорение электрона, F – сила, действующая на электрон со стороны электрического поля, τ [с] – среднее время свободного пробега электрона между двумя столкновениями, $m = 9.109 \cdot 10^{-31}$ [кг] – масса электрона.

При подстановке скорости дрейфа в выражение, получим равенство:

$$j = \frac{q^2 n E \langle \tau \rangle}{m} = \sigma E \quad (1.4)$$

т.е. плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля, а это и есть аналитическое выражение закона Ома.

Дрейфовую скорость в единичном электрическом поле определяют термином подвижность:

$$\mu = \frac{\langle v \rangle}{E} = \frac{q \langle \tau \rangle}{m} \text{ [м}^2\text{/(В·с)]} \quad (1.5)$$

Сопоставляя выражения (1.2) и (1.3) приходим к следующей зависимости удельной проводимости от подвижности: $\sigma = qn\mu$.

Подвижность носителей заряда пропорциональна среднему свободному пробегу и определяется частично природой механизма, ограничивающего средний свободный пробег, т.е. рассеянием. Вообще классическая модель наглядна и дает правильную зависимость, выражаемую законом Ома. Однако она не приводит к правильным количественным результатам, т.е. имеются расхождения с экспериментом. Квантовая физика позволяет устранить эти расхождения. Прежде всего, необходимо учитывать различие в поведении микрочастиц и обычных макрочастиц.

При квантово-механическом подходе учитываются волновые свойства электронов, и подвижность электронов связывают с их рассеянием. К числу наиболее важных источников рассеяния электронов относятся: решеточные рассеяния, или рассеяния на колебаниях решетки; рассеяние на примеси – как на заряженной, так и на нейтральной, то есть рассеяние на точечных дефектах; рассеяние на линейных дефектах – дислокациях; рассеяние на двумерных нерегулярностях решетки.

Для чистых металлов зависимость $\sigma(T)$ в основном определяется рассеянием электронов на колебаниях решетки. При подходе к задаче о рассеянии электронов колебаниями решетки вводится в рассмотрение фононный газ, и механизм

рассеяния сводится к взаимодействию электронного газа с фононным. Фононы появляются как результат квантования колебаний решетки.

Средняя кинетическая энергия свободных электронов, согласно статистике Ферми, практически не зависит от температуры и однозначно определяется плотностью электронного газа, то есть:

$$W_k = \frac{h^2}{40\sigma m} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.6)$$

где $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ [Дж·с] – постоянная Планка.

Электропроводность σ выражается в виде:

$$\sigma = 2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{q^2 n^{\frac{2}{3}}}{h} \langle L \rangle \quad (1.7)$$

где L [м] – средняя длина свободного пробега электронов. То есть зависимость электропроводности от температуры определяется только температурной зависимостью длины свободного пробега L (ибо концентрация свободных электронов n от T практически не зависит). Однако следует отметить, что и эта теория является лишь приближением.

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один кельвин называется температурным коэффициентом удельного сопротивления:

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (1.8)$$

Если зависимость $\rho(T)$ линейная, то

$$\alpha_p = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 (T_2 - T_1)} \quad (1.9)$$

На практике при расчете α_p часто пользуются следующей формулой:

$$\alpha_p = \alpha_R + \alpha_l,$$

где α_R – температурный коэффициент сопротивления резистора из данного материала ;

α_l – температурный коэффициент линейного расширения материала.

У чистых металлов $\alpha_p \gg \alpha_l$, поэтому для них $\alpha_p \approx \alpha_R$. Однако для термостабильных металлических сплавов такое приближение оказывается несправедливым.

Причинами рассеяния электронных волн в металле могут быть не только тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки, но и статические дефекты структуры, которые также нарушают периодичность потенциального поля решетки кристалла. Рассеяние на дефектах структуры, к которым, в основном, относятся примесные атомы, не зависит от температуры. Примеси всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнений, либо в виде легирующего элемента в сплавах.

В технике широко применяются металлические сплавы. Распределение атомов разных сортов по узлам кристаллической решетки вызывает значительное нарушение периодического потенциала решетки, что приводит к сильному рассеянию электронов и, следовательно, к значительно большим величинам сопротивления сплавов по сравнению с чистыми металлами.

Порядок выполнения работы

Измерить сопротивление образцов металлов (меди, никеля), сплавов (константана, манганина, нихрома), экспериментальные данные занести в табл. 1.

Таблица 1.1

Наименование материала	Сопротивление проволочных проводников R, Ом	Длина проводника l, м	Диаметр проводника d, мм	Площадь поперечного сечения S, м ²	ρ , Ом·м
1. Нихром		1,0	0,30		
2. Манганин		1,0	0,14		
3. Константан		1,0	0,11		
4. Медь		1,0	0,23		
5. Никель		1,0	0,28		

Для изучения зависимости сопротивления проводников от температуры необходимо включить в сеть термокамеру и провести измерения сопротивления образцов при температурах 20, 40, 50, 60, 70, 80 °С . Полученные данные занести в табл. 3. Построить отдельно для никеля и сплавов графики зависимости сопротивления от температуры $R = f(T)$.

Таблица 1.2

Положение переключателя	Наименование материала	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Измеренное сопротивление $R, \text{Ом}$	$\alpha_R, 1/^\circ\text{C}$	$\alpha_\rho, 1/^\circ\text{C}$
1	нихром				
2	манганин				
5	никель				

Последовательность расчета

Вычислив площадь поперечного сечения проволочных проводников S , находят их удельное сопротивление $\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$, по формуле

$$\rho = R \frac{S}{l} . \quad (1.10)$$

Для пленочных образцов (табл. 2) удельное поверхностное сопротивление $\rho_S, \text{Ом}$, рассчитывается по формуле

$$\rho_S = R \frac{b}{l} . \quad (1.11)$$

Температурный коэффициент сопротивления проводников $\alpha_R, 1/^\circ\text{C}$, для интервала температур (20÷ 80) °С определяют из выражения

$$\alpha_R = \frac{1}{R_0} \frac{R - R_0}{T - T_0} , \quad (1.12)$$

где R_0 – значение сопротивления при температуре T_0 ($T_0 = 20^\circ\text{C}$);
 R – значение сопротивления при температуре T ($T = 80^\circ\text{C}$).

Рассчитать температурный коэффициент удельного сопротивления α_p по формуле (2). Значения α_i принять равными: для меди – $16,7 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; для никеля – $12,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; для манганина и нихрома – $16,4 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Содержание отчета

1. Цель исследований.
2. Таблицы с результатами определения удельного сопротивления проводников при $T=20^\circ\text{C}$.
3. Таблица с результатами определения сопротивления никеля и сплавов в зависимости от температуры.
4. Графики зависимости $R = f(T)$ (отдельно для металла, отдельно для сплавов).
5. Выводы по работе, объясняющие различное поведение сопротивления металлов и сплавов в зависимости от температуры.

Практическая работа №2. Исследование электрических свойств полупроводниковых материалов

Цель работы: Изучение электро-физических свойств полупроводниковых материалов.

Основные теоретические положения

Различают собственную (γ_i) электропроводность, когда полупроводник не имеет примесей (рис. 2.1, *a*), примесную (γ_n) *n* - типа, когда в него введена донорная примесь (рис. 2.1, *б*); примесную (γ_p) *p* - типа, когда в полупроводник введена акцепторная примесь (рис. 2.1, *в*).

Электропроводность любого материала определяется формулой

$$\gamma = q \cdot N \cdot u, \quad (2.1)$$

где N – количество носителей заряда, u – подвижность носителей заряда, q – заряд электрона.

На рис. 2.1. приведены энергетические диаграммы собственного полупроводника (*a*), полупроводника с донорной примесью (*б*) и с акцепторной примесью (*в*).

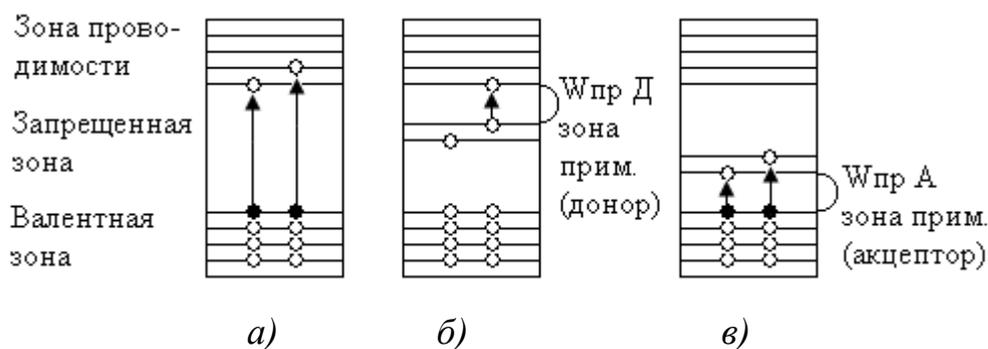


Рис. 2.1. Энергетические диаграммы полупроводниковых материалов

Собственная проводимость (γ_i) осуществляется двумя типами носителей – электронами (n), которые переходят из валентной заполненной зоны в зону проводимости (рис. 2.1.), оставляя свободное место (дырку) в валентной зоне, и дырками (p), которые, заполняясь ниже лежащими электронами валентной зоны, перемещаются в ней. Таким образом, в переносе зарядов участвуют и электроны и дырки, причем в равных количествах. Подвижность электронов (u_n) больше, чем подвижность дырок (u_p), так как электроны непосредственно переносят заряд, а дырки такой же заряд передают эстафетно, двигаясь в противоположную сторону движения электронов. Формула для собственной электропроводности γ_i полупроводников имеет вид:

$$\gamma_i = q \cdot n \cdot u_n + q \cdot p \cdot u_p \quad (2.2)$$

Электропроводность γ_i состоит из двух составляющих: электронной и дырочной; т.к. количество $n = p$, а $u_n > u_p$, собственная проводимость γ_i имеет преобладание электронной составляющей и носит электронный характер. Перепишем формулу

$$\gamma_i = q \cdot n_i \cdot (u_n + u_p), \quad (2.3)$$

где n_i – концентрация собственных носителей заряда.

Примесная проводимость n - типа (γ_n) возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой больше, чем валентность полупроводника. Например, для четырехвалентного кремния – Si донорной примесью является пятивалентный мышьяк – As. Доноры располагаются в запрещенной зоне ближе к зоне проводимости. Для того, чтобы атом донора отдал

свой электрон в зону проводимости, требуется очень малая энергия – $W_{пр Д}$ (рис.2.1, б). Например, ширина запрещенной зоны кремния – 1,12 эВ, а энергия активации донорной примеси (As) равна всего – 0,025 эВ. Атом мышьяка, отдавший свой электрон в зону проводимости, превращается в положительно заряженный ион, который хотя и имеет заряд, но закреплен в кристаллической решетке и в электропроводности не участвует.

Перенос зарядов происходит только за счет электронов

$$\gamma_n = q \cdot n \cdot u_n. \quad (2.4)$$

Поэтому характер проводимости электронный; n - типа.

Примесная проводимость p – типа (γ_p) возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой меньше валентности основного полупроводника. Например, если в кремний ввести трехвалентный алюминий (Al), он является акцепторной примесью для Si. Акцепторы располагаются в запрещенной зоне ближе к зоне валентной. Их энергия активации также значительно меньше запрещенной зоны кремния (рис. 2.1, в), $W_{пр А} \approx 0,027$ эВ. При такой энергии, полученной извне, акцептор захватывает электрон из валентной зоны, превращаясь при этом в отрицательно заряженный ион, а в валентной зоне начинается эстафетное перемещение электронов, т.е. будет иметь место дырочная проводимость

$$\gamma_p = q \cdot n \cdot u_p. \quad (2.5)$$

Зависимость концентрации носителей заряда от температуры выражается зависимостью:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}, \quad (2.6)$$

где N_t – количество носителей заряда при данной температуре T, m^{-3} ;

N_0 – количество носителей при нормальных условиях ($T_{комн.}$), m^{-3} ;

W_t – термическая энергия активации носителей, Вт; для примесных полупроводников $W_t = W_{пр}$, для собственных – $W_t = W_{д}$, $W_{д}$ – запрещенная зона;

K – постоянная Больцмана ($K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град);

T – абсолютная температура.

Подвижность носителей изменяется пропорционально температуре

$$u_i \approx T^{\pm 3/2}, \quad (2.7)$$

где u_i – подвижность носителей заряда при температуре T , $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Видим, что основное влияние на поведение электропроводности с изменением температуры оказывает концентрация носителей заряда.

Таким образом, электропроводность полупроводника от температуры изменяется экспоненциально

$$\gamma_i = A \cdot e^{-\frac{W_i}{2kT}}, \quad (2.8)$$

где A – постоянная, представляющая собой электропроводность полупроводника при экстремальных условиях; это электропроводность, например, при $T = 0 \text{ К}$.

Порядок выполнения работы

Для расчета предлагаются полупроводниковый материал: собственный полупроводник и примесный полупроводник на его основе. Собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике при комнатной температуре равна n_i ; подвижность электронов - μ_n ; подвижность дырок - μ_p , удельное сопротивление примесного полупроводника равно ρ .

Определить:

- отношение полного тока, протекающего через полупроводник I , к току, обусловленному электронной составляющей I_n , а также к току, обусловленному дырочной составляющей I_p , в собственном полупроводнике;
- концентрацию электронов и дырок в примесном полупроводнике;
- отношение полного тока, протекающего через полупроводник, к току, обусловленному электронной составляющей, а также к току, обусловленному дырочной составляющей, в примесном полупроводнике.

Исходные данные для конкретных вариантов задачи 1 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 2.1

	Предпоследняя цифра шифра					
	1 и 9	2 и 8	3 и 7	4 и 6	5	0
Полупроводниковый материал	n-Si	p-Si	n-Ge	p-Ge	n-GaAs	p-GaAs
$\mu_n, \text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	0,14		0,39		0,95	
$\mu_p, \text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	0,05		0,19		0,045	
$n_i, \text{м}^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{16}$		$2,5 \cdot 10^{19}$		$6,6 \cdot 10^{12}$	

Таблица 2.2

	Полупроводниковый материал					
	n-Si	p-Si	n-Ge	p-Ge	n-GaAs	p-GaAs
Последняя цифра шифра	удельное сопротивление $\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$					
1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^0$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^0$
2	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$
3	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
4	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
5	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
6	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
7	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$
8	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
9	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
0	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$

Последовательность расчета

Поскольку в полупроводнике электрический ток переносится носителями заряда двух типов (электронами и дырками), полный ток представляет собой сумму двух токов: тока, обусловленного электронами (электронная составляющая) и тока, обусловленного дырками (дырочная составляющая):

$$I = I_n + I_p . \quad (2.1)$$

Тогда отношение полного тока, протекающего через полупроводник, к току, обусловленному электронной составляющей, можно записать как

$$\frac{I}{I_n} = 1 + \frac{I_p}{I_n} , \quad (2.2)$$

или, заменяя отношение токов отношением соответствующих электропроводностей

$$\frac{I}{I_n} = 1 + \frac{\gamma_p}{\gamma_n} , \quad (2.3)$$

где γ_n и γ_p - вклад электронной и дырочной составляющей в электропроводность, соответственно.

Применительно к собственному полупроводнику, где концентрации электронов и дырок равны ($n_i = p_i$) с учетом соотношения $\gamma = e \cdot n \cdot \mu$, получим:

$$\frac{I}{I_n} = 1 + \frac{e p_i \mu_p}{e n_i \mu_n} = 1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \quad (2.4)$$

$$\frac{I}{I_p} = 1 + \frac{e n_i \mu_n}{e p_i \mu_p} = 1 + \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (2.5)$$

Для примесных полупроводников, в которых концентрации электронов и дырок отличаются на несколько порядков, вкладом неосновных носителей в электропроводность можно пренебречь. Тогда для полупроводника n-типа

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \gamma_n + \gamma_p \approx \gamma_n = e n_n \mu_n , \quad (2.6)$$

откуда $n_n \approx \frac{1}{e \mu_n \rho}$, а для полупроводника p-типа $p_p \approx \frac{1}{e \mu_p \rho}$.

Концентрации неосновных носителей заряда: дырок в материале n-типа (p_n) и электронов в материале p-типа (n_p) рассчитываются из соотношений:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \quad (2.7)$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \quad (2.8)$$

Применительно к примесному полупроводнику n-типа искомые соотношения токов принимают вид:

$$\frac{I}{I_n} = 1 + \frac{e p_n \mu_p}{e n_n \mu_n} = 1 + \frac{p_n \mu_p}{n_n \mu_n} \quad (2.9)$$

$$\frac{I}{I_p} = 1 + \frac{n_n \mu_n}{p_n \mu_p}, \quad (2.10)$$

а для полупроводника р-типа

$$\frac{I}{I_p} = 1 + \frac{e n_p \mu_n}{e p_p \mu_p} = 1 + \frac{n_p \mu_n}{p_p \mu_p} \quad (2.11)$$

$$\frac{I}{I_n} = 1 + \frac{p_p \mu_p}{n_p \mu_n} \quad (2.12)$$

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчеты отношения полного тока, протекающего через полупроводник I , к току, обусловленному электронной составляющей I_n , а также к току, обусловленному дырочной составляющей I_p , в собственном полупроводнике.
3. Расчеты концентрации электронов и дырок в примесном полупроводнике;
4. Расчеты отношения полного тока, протекающего через полупроводник, к току, обусловленному электронной составляющей, а также к току, обусловленному дырочной составляющей, в примесном полупроводнике.
5. Выводы по работе, объясняющие различное поведение сопротивления металлов и сплавов в зависимости от температуры.

Практическая работа №3. Исследование катушек индуктивности

Цель работы: ознакомиться с методами анализа цепей, содержащих катушку индуктивности; получить практические навыки экспериментального исследования её параметров, на основе которых определить параметры последовательной схемы замещения и выявить влияние сердечника на параметры индуктивной катушки.

Основные теоретические положения

Электротехнические устройства синусоидального (переменного) тока широко используются в бортовых системах электроснабжения, электромеханических приводах самолетов и вертолетов, промышленной электронике, контрольно-

измерительной технике, устройствах автоматики, бытовой технике и т. д. Для наглядного и компактного отображения связей между отдельными элементами источника электропитания и потребителя вся совокупность взаимосвязанных устройств представляется в виде принципиальной электрической схемы. Для анализа режима работы (технических характеристик) электрических систем необходимо перейти от её принципиальной схемы к эквивалентной схеме замещения. Элементами схем замещения являются идеализированные элементы-источники ЭДС или тока (активные элементы), резистивные, индуктивные и ёмкостные элементы (пассивные элементы, параметрами которых являются значения R, L, C). Комбинируя число и способ их включения, можно с необходимой для практических целей полнотой учесть особенности анализируемой электромеханической системы. Таким образом, идеализированные резистивные, индуктивные и ёмкостные элементы являются составными элементами цепей изменяющегося тока, понимание особенностей которых позволяет глубже изучить электромеханические системы летательных аппаратов.

Электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии (механическую, тепловую, электромагнитную и др.). Эффективность преобразования в схемах замещения электромеханических систем характеризуется активной мгновенной мощностью $p(t)$, которая зависит от величины сопротивления R и от тока $i(t)$, то есть $p(t) = u(t) \cdot i(t) = Ri^2(t)$. Мгновенная мощность в цепях синусоидального тока – изменяющаяся величина и поэтому эффективность преобразования электрической энергии принято характеризовать средней за период T мощностью

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt}. \quad (3.1)$$

Средняя за период мощность может быть определена через действующие значения тока I и напряжения U_R на резистивном элементе

$$P = RI^2 = \frac{U_R^2}{R} \quad (3.2)$$

(ток $i(t)$ и напряжение $u(t)$ в этом случае совпадают по фазе, то есть $\varphi = 0$) или через действующие значения тока I , напряжения U и угла сдвига фаз φ между напряжением и током для всего участка цепи:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (3.3)$$

В схеме с последовательно соединёнными элементами величина «активного» (пропорционального эффективности преобразования электрической энергии) сопротивления (его эквивалентная схема замещения – резистор) может быть рассчитана по формуле:

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad (3.4)$$

где P, I – активная мощность и ток в схеме, измеренные ваттметром и амперметром. Результат вычислений по формуле (2) может не совпадать с величиной $R_{\text{э}}$, измеренной на постоянном токе, так как R (2) зависит от частоты тока. С увеличением частоты величина R увеличивается вследствие вытеснения тока из глубины проводника к его поверхности. Плотность тока в поверхностных слоях проводника увеличивается, что эквивалентно уменьшению его сечения, поэтому R с увеличением частоты тока увеличивается и, следовательно, $R_{\text{э}} = \frac{U}{I} < R$, здесь $U(t)$ и $I(t) = \text{const}$.

Вокруг любого проводника с током i существует магнитное поле. Нормальная работа некоторых электротехнических устройств изменяющегося тока основана на взаимодействии сильных магнитных полей (например, трансформаторы, электродвигатели, некоторые измерительные приборы). Свойство элементов цепи создавать магнитное поле характеризуют идеализированным элементом – индуктивностью L , отражающей связь между потокосцеплением ψ данного элемента цепи и током i , проходящим через него, то есть $\psi = Li$.

В цепях с переменным током всякое изменение тока в индуктивном элементе вызывает изменение его потокосцепления ψ и сопровождается наведением ЭДС e_L . Эта ЭДС уравновешивает приложенное к индуктивному элементу напряжение u_L :

$$u_L = -e_L = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}. \quad (3.5)$$

В случае если ток синусоидален

$$i_L(t) = I_m \sin \omega t, \quad (3.6)$$

напряжение на индуктивном элементе опережает по фазе ток на 90° :

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = X_L I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{mL} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad I_m = I \sqrt{2}, \quad U_m = U \sqrt{2}, \quad (3.7)$$

где $I_m, I[A]$ - амплитудные и действующие значения тока соответственно;

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота, рад/с;

$f = \frac{1}{T}$ - частота тока, Гц;

T - период, с;

$X_L = \omega L$ - индуктивное сопротивление, Ом;

U_m, U - амплитудное и действующее значения напряжения соответственно ($U_m = U \sqrt{2}$).

Некоторые электротехнические устройства способны накапливать энергию в электрическом поле, и, следовательно, их технические характеристики зависят от свойств электрического поля. Свойство устройства накапливать энергию характеризуется емкостным параметром C , являющимся коэффициентом пропорциональности между зарядом q и напряжением на выходах емкостного элемента $u_C(t)$:

$$q(t) = C u_C(t) = \int_0^t i_C(t) dt, \quad (3.8)$$

откуда видно, что ток емкостного элемента зависит от скорости изменения $u_C(t)$:

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}. \quad (3.9)$$

При синусоидальном напряжении

$$u_C(t) = U_{mC} \sin \omega t, \quad (3.10)$$

ток $i_C(t)$ опережает по фазе напряжение на 90° :

$$i_c(t) = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_{mC} \cos \omega t = \frac{U_{mC}}{X_C} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (3.11)$$

где U_{mC} - амплитуда напряжения на емкостном элементе;

$x_C = \frac{1}{\omega C}$ - емкостное сопротивление.

Схема замещения электротехнического устройства, принцип действия которого основан на взаимодействии магнитных полей (следовательно, содержащих катушки индуктивности) должна содержать как минимум два идеальных элемента – идеальный индуктивный элемент, характеризующий способность устройства создавать магнитное поле, и идеальный резистивный элемент, отражающий эффективность преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Эти элементы могут быть соединены последовательно или параллельно. Обычно схему замещения катушки представляют в виде последовательно соединённых резистивного R и индуктивного L идеальных элементов (рис. 1).

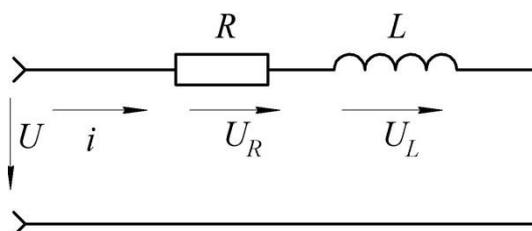


Рис. 3.1. Схема замещения индуктивной катушки

Для анализа технических показателей электромеханических систем летательных аппаратов (коэффициента полезного действия, мощности, габаритно-массовых показателей, нагрузочных характеристик и т. д.) используются эквивалентные схемы замещения, в отдельных элементах которых токи и напряжения вычисляются с помощью законов Кирхгофа. Так, для устройств, эквивалентная схема замещения которых представлена последовательно соединёнными идеальными резистивными и индуктивными элементами, при заданном $i(t) = I_m \sin \omega t$ напряжения $u_R(t)$ и $u_L(t)$ определяются относительно просто:

$$u_r(t) = Ri(t) = RI_m \sin \omega t = U_{mR} \sin \omega t ,$$

$$u_L(t) = X_L i(t) = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{mL} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

а напряжение на входе схемы

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) = U_{mR} \sin \omega t + U_{mL} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{mR} \sin \omega t + U_{mL} \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где $U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + U_{mL}^2}$; $\varphi = \arctg \frac{U_{mL}}{U_{mR}} = \arctg \frac{\omega L I_m}{R I_m} = \arctg \frac{\omega L}{R}$.

Для иллюстрации изложенного представим полученные соотношения в виде векторных диаграмм. Построение начинают с вектора тока, являющегося общим для всех элементов схемы R, L и источника $u(t)$. При изображении синусоидальных напряжений на резистивном и индуктивном элементах в виде векторов учтём, что u_R и i совпадают по фазе (при построении вектор напряжения параллелен вектору тока), а для индуктивного напряжения опережает вектор тока на 90° . Для замкнутого контура в соответствии со вторым законом Кирхгофа сумма векторов напряжений $\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L$ иллюстрируется векторной диаграммой (рис. 2), полученной последовательным построением суммы векторов.

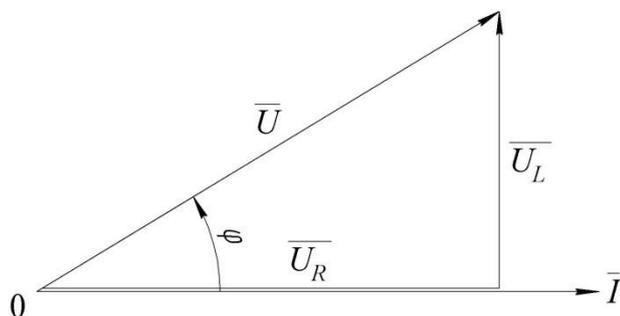


Рис. 3.2. Векторная диаграмма для последовательной схемы замещения

Векторная диаграмма является многоугольным треугольником, для которого справедливы соотношения:

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2 = (R^2 + X_L^2)I^2 = Z^2 I^2, \quad \varphi = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{U_L}{U_R}, \quad (3.12)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ - полное сопротивление цепи, которое, как это видно из (7), может быть вычислено и по измеренным значениям тока и входного напряжения, то есть

$Z = \frac{U}{I}$, а также из треугольника сопротивлений или из треугольника мощностей.

Если каждую из сторон полученного треугольника напряжений поделить на ток, получим треугольник сопротивлений цепи, приведённый на рис.3, где $R = Z \cos \varphi$;

$X_L = Z \sin \varphi$; $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ - активное, реактивное и полное сопротивления цепи.

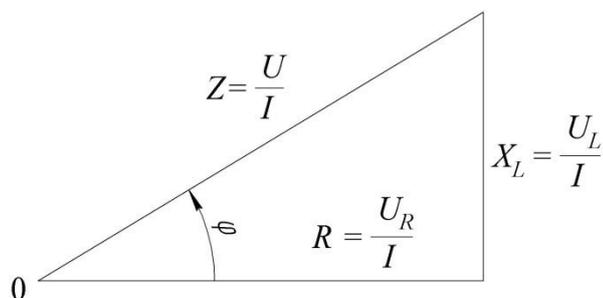


Рис. 3.3. Треугольник сопротивлений для индуктивной катушки

Треугольник мощностей получается умножением сторон треугольника напряжений на ток или сторон треугольника сопротивлений на I^2 (рис. 4), где $S = UI = I^2 \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}$; $P = UI \cos \varphi = I^2 R$; $Q = UI \sin \varphi = I^2 X_L$ - полная, активная и реактивная мощности соответственно.

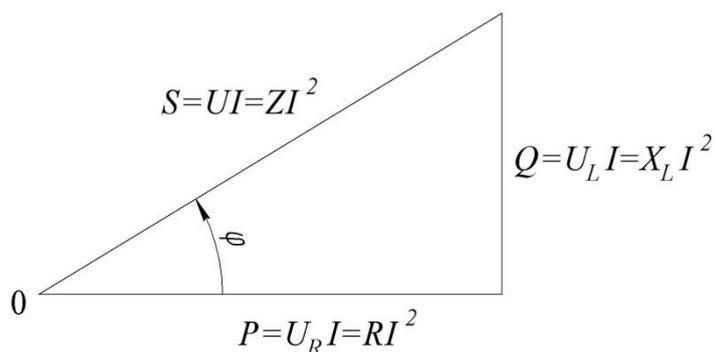


Рис. 3.4. Треугольник мощностей, S - полная мощность (ВА); Q - реактивная мощность (ВАр); P - активная мощность (Вт)

Для определения индуктивного сопротивления, в частности из треугольника мощностей, получим

$$X_L = \frac{Q}{I^2},$$

учитывая, что $Q^2 = (UI)^2 - P^2$, X_L можно найти также по формуле

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \sqrt{Z^2 - R^2},$$

где $Q = U_L I$ - реактивная индуктивная мощность (ВАр). Среднее значение

$Q_L = \frac{1}{T} \int_0^T P_L(t) dt = 0$, то есть синусоидальный ток в идеальном индуктивном элементе не

совершает работы. Величину X_L , а также и другие неизвестные величины, можно вычислить и из треугольника сопротивлений, например, величина индуктивности

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f}.$$

Введение сердечника в катушку индуктивности изменяет её параметры. Перемагничивание сердечника и вихревые токи, возникающие в нём, обуславливают изменение как активного (увеличивается), так и реактивного сопротивления, которое увеличивается, если материал сердечника ферромагнитный, в противном случае - уменьшается. Пользуясь экспериментальными данными, это изменение параметров катушки легко определяется, что и позволяет построить эквивалентную схему замещения катушки с сердечником.

Порядок выполнения работы

1. Измерить омическое сопротивление катушки методом вольтметра – амперметра, для чего:

а) подключить исследуемую цепь к источнику постоянного напряжения (переключатели указаны на схеме стенда);

б) измерить напряжение на выходах катушки при трех значениях тока (изменяется путём переключения R_p). Результаты измерений записать в табл.1;

в) вычислить среднеарифметическое значение омического сопротивления R_{ω} по результатам трех опытов.

Таблица 3.1

№ эксп.	U	I	R_{Σ}
1			
2			
3			

2. Экспериментально исследовать параметры индуктивной катушки без сердечника и для различных сердечников, для этой цели:

а) подключить исследуемую цепь к источнику переменного напряжения;

б) измерить мощность, ток и напряжения на участках цепи, для чего вольтметр последовательно подключить к гнездам X2-X3, X2-X1, X3-X1. Результаты измерений записать в таблицу 2;

в) изменить сопротивление регулировочного резистора R_p и измерить величины, указанные в п.2,б;

Таблица 3.2

№ эксп.	U	U_R	U_K	P	I
1					
2					
3					

г) изменить сопротивление регулировочного резистора R_p (третье положение переключателя R_p) и измерить величины, указанные в п. 2, б;

д) ввести один из сердечников и повторить измерения по п. 2, б.

Вычислить полные сопротивления цепи $Z = \frac{U}{I}$ и катушки $Z_K = \frac{U_K}{I}$, активное сопротивление цепи $R = R_K + R_p = \frac{P}{I^2}$ и катушки $R_K = R - R_p$, реактивное сопротивление

$X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$, а также $Q = I^2 X_L$, $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z}$, $\cos \varphi_K = \frac{P - I^2 R_p}{U_K I} = \frac{R_K}{Z_K}$ и другие величины,

указанные в табл.3. Результаты вычислений записать в табл.3. Вносимые сопротивления вычисляются по опытам с сердечником и без сердечника.

Таблица 3.3

№ эксп.	R_p	R_k	$R = R_p + R_k$	X_L	Z_k	Z	L	φ_k	φ	$\underline{Z} = Ze^{j\varphi}$	$\underline{Z} = R + jX_L$
1											
2											
3											

Содержание отчета

1. Перечень применяемых приборов с указанием пределов измерений, системы, класса точности.
2. Электрическая схема экспериментальной установки.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Таблица с результатами вычислений активного, индуктивного и полного сопротивлений катушки, а также регулировочного резистора.
5. Расчётные формулы.
6. Векторные диаграммы для опытов, указанных преподавателем.
7. Определение коэффициента мощности $\cos \varphi$ цепи и индуктивности катушки $\cos \varphi_k$ по векторным диаграммам напряжений.
8. Схемы замещения индуктивной катушки без сердечника и с одним из сердечников. Вносимые сердечником сопротивления выделить на схеме в виде отдельного резистора $R_{\text{вн}}$ и идеальной индуктивности $L_{\text{ид}}$.

Практическая работа №4 Изучение измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Цель работы: Изучение принципа действия и конструкции трансформаторов тока и напряжения, выявить их достоинства и недостатки, а также научиться производить расчеты в зависимости применения.

Основные теоретические положения

Для уменьшения или увеличения переменных токов и напряжений в строго определенное число раз с сохранением их фазы широкое распространение получили измерительные трансформаторы тока и напряжения. Они применяются для расширения пределов измерения приборов и для гальванического разделения частей измерительной цепи. Трансформатор тока является преобразователем тока в ток, а трансформатор напряжения - преобразователем напряжения в напряжение.

Измерительный трансформатор принято характеризовать коэффициентом трансформации, понимая под номинальным коэффициентом трансформации трансформатора тока

$$K_{I_n} = I_{1n} / I_{2n} \quad (4.1)$$

а для трансформатора напряжения

$$K_{U_n} = U_{1n} / U_{2n} \quad (4.2)$$

Номинальные коэффициенты трансформации указываются на щитках трансформаторов в виде отношений токов или напряжений.

Действительные коэффициенты трансформации соответственно равны

$$K_I = I_1 / I_2 \quad \text{и} \quad K_U = U_1 / U_2 \quad (4.3)$$

Векторы первичного и вторичного токов (напряжений) отличаются от своих идеальных значений не только по модулю, но и по фазе. Точность трансформатора характеризуется не только погрешностью тока (напряжения), но и угловой (фазовой) погрешностью. Угловой погрешностью d называется угол в минутах между вектором первичного тока (напряжения) и повернутым на 180° вектором вторичного тока (напряжения).

Под комплексным коэффициентом трансформации трансформатора понимают отношение

$$\dot{K}_I = \dot{I}_1 / \dot{I}_2 \quad \text{и} \quad \dot{K}_U = \dot{U}_1 / \dot{U}_2 \quad (4.4)$$

а комплексные погрешности трансформатора тока и напряжения соответственно равны

$$\dot{\lambda}_I = \frac{-\dot{I}_2 \cdot K_{I*} - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} = f_1 + j\delta_1 \quad (4.5)$$

$$\dot{\lambda}_U = \frac{-\dot{U}_2 \cdot K_{U*} - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = f_U + j\delta_U \quad (4.6)$$

где f_1 и f_2 - погрешность тока и погрешность напряжения; d_1 и d_2 - угловые погрешности трансформаторов тока и напряжения соответственно.

4.2 Погрешности трансформаторов

Погрешности трансформаторов определяются конструктивными параметрами, характеристиками сердечника, а также значением и характером нагрузки, включенной во вторичные обмотки, и выражаются следующими формулами:

а) для трансформатора тока

$$\dot{\lambda}_I = j \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_M}{\omega \cdot w_2^2} \quad (4.7)$$

$$f_I = -\frac{R_2 \cdot X_M + X_2 \cdot R_M}{\omega \cdot w_2^2} \quad (4.8)$$

$$\delta_I = \frac{R_2 \cdot R_M - X_2 \cdot X_M}{\omega \cdot w_2^2} \quad (4.9)$$

где $\dot{Z}_M = R_M + jX_M$ - комплексное магнитное сопротивление магнитопровода;

$\dot{Z}_2 = R_2 + jX_2$ - комплексное сопротивление вторичной цепи трансформатора;

w_2 - число вторичных витков;

ω - круговая частота.

б) для трансформатора напряжения

$$\dot{\lambda}_U = -\dot{Z}'_K \cdot \dot{Y}'_{НАГ} - \dot{Z}_{K1} \cdot \dot{Y}_X \quad (4.10)$$

$$f_U = -(\mathcal{G}_{НАГ} \cdot R'_X + b_{НАГ} \cdot X'_X) - (\mathcal{G}_X \cdot R_{K1} + b_X \cdot X_{K1}) \quad (4.11)$$

$$\delta_U = -(\mathcal{G}_{НАГ} \cdot X'_X - b_{НАГ} \cdot R'_X) - (\mathcal{G}_X \cdot X_{K1} - b_X \cdot R_{K1}) \quad (4.12)$$

где $\dot{Y}'_{НАГ} = 1/\dot{Z}'_{НАГ} = \mathcal{G}_{НАГ} - jb_{НАГ}$ - проводимость нагрузки, приведенная к первичной

обмотке:
$$\dot{Y}'_{НАГ} = \dot{Y}_{НАГ} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 ;$$

$\dot{Z}_K = R_{K1} + jX_{K1}$ - комплексное сопротивление первичной обмотки;

$\dot{Y}_X = 1/\dot{Z}_X = g_X - jb_X$ - проводимость холостого хода;

$\dot{Z}'_X = \dot{Z}_{K1} + \dot{Z}'_{K2} \cdot \dot{Z}_{K1} + \dot{Z}_{K2} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = R'_X + jX'_X$ - сопротивление короткого замыкания трансформатора, приведенное к первичной обмотке;

$\dot{Z}'_{K2} = \dot{Z}_{K2} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$ - сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной обмотке.

Для уменьшения погрешностей тока и напряжения трансформаторов тока и напряжения соответственно применяют витковую коррекцию. Для этого уменьшают числа вторичных витков у трансформатора тока и первичных витков у трансформатора напряжения. При наличии витковой коррекции погрешность тока и погрешность напряжения определяется по следующим формулам:

$$f_1 = -\frac{R_2 \cdot X_M + X_2 \cdot R_M}{\omega \cdot w_2^2} - \Delta \quad (4.13)$$

где

$$\Delta = \frac{\frac{w_2}{w_1} - K_{In}}{K_{In}} < 0 \quad (4.14)$$

$$f_U = \Delta - (g_{НАГ} \cdot R'_X + b_{НАГ} \cdot X'_X + g_X \cdot R_{K1} + b_X \cdot X_{K1}) \quad (4.15)$$

$$\Delta = \frac{K_{Un} \cdot w_2 - w_1}{w_1} > 0 \quad (4.16)$$

4.3 Задание

Решить задач по варианту, предложенному преподавателем.

Таблица 4.1

№ Варианта	№ Задачи	K_{In}	I_2, A	I_H, A	$f_1, \%$
1	1	100/5	2	3	- 0,2
2	1	100/5	3	4	- 0,3
3	1	100/5	5	6	- 0,4

4	1	100/5	6	7	- 0,6
		K_{I_H}	f	w_1	w_2
1	2	100/5	40	11	200
2	2	100/5	50	12	201
3	2	100/5	70	13	202
4	2	100/5	80	14	203
		K_{Γ_H}	w_1	w_2	f_{U_x}
1	3	6000/100	11350	200	0.2
2	3	6000/100	11360	210	0.3
3	3	6000/100	11330	180	0.5
4	3	6000/100	11320	170	0.6
		K_{I_H}	w_1	w_2	I_H
1	4	100/5	5	190	2
2	4	100/5	15	195	3
3	4	100/5	20	205	4
4	4	100/5	25	210	6
		K_{I_H}	I_1	R_0	
1	5	100/5	95	0.05	
2	5	100/5	105	0.01	
3	5	100/5	110	0.15	
4	5	100/5	90	0.25	
		w_0	w_1	w_2	I_1
1	6	900	10	10	2
2	6	950	15	15	3
3	6	1050	25	25	4
4	6	1100	30	30	6

Задача 1. Определите возможные пределы первичного тока, если показание в нормальных

условиях амперметра класса 1,5, включенного во вторичную обмотку трансформатора тока с $K_{I_H}=100/5$, равно $I_2=4$ А. Амперметр имеет верхний предел измерения $I_H = 5$ А, а погрешность тока трансформатора тока составляет $f_1 = - 0,5 \%$.

Решение:

Первичный ток с учетом погрешностей амперметра и трансформатора тока может быть определен по формуле

$$I_1 = I_2 \cdot K_{I_H} \cdot (1 + f_1) \cdot (1 \pm \delta) \approx I_2 \cdot K_{I_H} \cdot (1 + f_1 \pm \delta) \quad (4.17)$$

где I_2 - показания амперметра;

K_{I_n} - номинальный коэффициент трансформации;

I_I - погрешность тока трансформатора;

d - наибольшая относительная погрешность измерения тока амперметром.

Наибольшая относительная погрешность измерения тока амперметром d определяется по формуле

$$\delta = \frac{\Delta I_2}{I_2} = \frac{\gamma \cdot I_H}{100 \cdot I_2} = \frac{1,5 \cdot 5}{100 \cdot 4} = 0,019 \quad (4.18)$$

где g - приведенная погрешность амперметра.

Следовательно,

$$I_1 = \frac{4 \cdot 100}{5} \cdot (1 - 0,005 \pm 0,19), \quad (4.19)$$

то есть $78,1 \leq I_1 \leq 81,1$ А.

Задача 2. Определите комплексное магнитное сопротивление магнитопровода трансформатора тока с витковой коррекцией при следующих условиях: $f=60$ Гц, $K_{I_n} = 100/5$, $w_2 = 10$, $w_1=199$, сопротивление вторичной обмотки $Z_H = (0,1 + j0,1)$ Ом, сопротивление нагрузки $Z_H = (0,48 + j0,36)$ Ом, погрешности трансформатора: $f_I = -0,02$ % и $d_I = 20$.

Решение:

Погрешность коэффициента трансформации компенсированного трансформатора определяется по формуле

$$f_1' = f - \Delta \quad (4.20)$$

где f_I - погрешность коэффициента трансформации без коррекции.

$$\Delta = \frac{w_2 / w_1 - K_{I_n}}{K_{I_n}} = \frac{199 / 10 - 20}{20} = -0,005 \quad (4.21)$$

Тогда

$$f_I = f_I' + \Delta = 0,0002 - 0,005 = -0,0048. \quad (4.22)$$

Комплексное магнитное сопротивление магнитопровода находим по формуле

$$\dot{Z}_M = \frac{\lambda \cdot \omega \cdot w_2^2}{jZ_2} \quad (4.23)$$

где

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_{K2} + \dot{Z}_H = 0,1 + j0,1 + 0,48 + j0,36 = (0,58 + j0,46) \text{ Ом} \quad (4.24)$$

Тогда

$$\dot{Z}_M = \frac{(-0,48 + j0,0291 \cdot 20) \cdot 314 \cdot 199^2}{j(0,58 + j0,46)} = (10,4 + j12,2) \cdot 10^4 \text{ А/Вб} \quad (4.25)$$

Задача 3. Определите сопротивление короткого замыкания трансформатора напряжения, приведенное к первичной обмотке, если при $K_{Гн} = 6000/100$, $w_1 = 11340$, $w_2 = 190$ погрешности равны: при холостом ходе $f_{Ux} = 0,4 \%$, $d_{Ux} = 10$; при нагрузке $Z_H = 1000 \text{ Ом}$, $\cos j = 0,866$, $f_U = 0,2 \%$, $d_U = 18$.

Решение:

Погрешности компенсированного трансформатора при нагрузке и при холостом ходе равны

$$\dot{\lambda}_U = f_U + j\delta_U = \Delta - \frac{\dot{Z}'_K}{\dot{Z}'_{НАГ}} - \frac{\dot{Z}_{K1}}{Z_X} \quad (4.26)$$

$$\dot{\lambda}_{Ux} = f_{Ux} + j\delta_{Ux} = \Delta - \frac{\dot{Z}_{K1}}{Z_X} \quad (4.27)$$

Следовательно

$$-\frac{\dot{Z}_{K1}}{Z_X} = f_{Ux} + j\delta_{Ux} - \Delta \quad (4.28)$$

Тогда

$$f_U + j\delta_U = -\frac{Z'_K}{Z'_{НАГ}} + f_{Ux} + j\delta_{Ux} \quad (4.29)$$

Отсюда

$$-\frac{Z'_K}{Z'_{НАГ}} = (f_U - f_{Ux}) + j(\delta_U - \delta_{Ux}) \quad (4.30)$$

и

$$\begin{aligned} Z'_K &= Z'_{НАГ} \cdot [(f_{Ux} - f_U) + j(\delta_{Ux} - \delta_U)] = \dot{Z}'_{НАГ} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 \cdot [(f_{Ux} - f_U) + j(\delta_{Ux} - \delta_U)] = \\ &= (866 + j500) \cdot \left(\frac{11340}{190}\right)^2 \cdot [0,004 - 0,002 + j(10 - 18) \cdot 2,91 \cdot 10^{-4}] = (10,2 - j3,5) \text{ кОм}. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Задача 4. Номинальный коэффициент трансформации некомпенсированного трансформатора тока $K_{I_n} = 100/5$. Числа витков: $w_1 = 10, w_2 = 200$. Активное и реактивное (рассеяния) сопротивления вторичной обмотки $Z_{K2} = 0,1 + j0,1$ Ом, сопротивление нагрузки $Z_H = 0,32 + j0,24$ Ом.

Определите комплексное магнитное сопротивление магнитопровода при токе в нагрузке, равном 5 А, если известно, что $f = 50$ Гц, а погрешности трансформатора в рассматриваемом режиме равны соответственно $f_I = 0,5\%$ и $d_I = 10$.

Решение:

Полное сопротивление вторичной цепи

$$\dot{Z}_2 = Z_{K2} + Z_H = 0,1 + j0,1 + 0,32 + j0,24 = (0,42 + j0,34) \text{ Ом} \quad (4.32)$$

Комплексная погрешность трансформатора тока равна

$$\dot{\lambda}_I = -0,005 + j0,0029 \quad (4.33)$$

Погрешности трансформатора связаны с его параметрами соотношением

$$\dot{\lambda}_I = j \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_M}{\omega \cdot w_2^2} \quad (4.34)$$

Отсюда

$$\dot{Z}_M = \frac{\dot{\lambda}_I \cdot \omega \cdot w_2^2}{j \dot{Z}_2} = \frac{(-0,005 + j0,0029) \cdot 314 \cdot 200^2}{j \cdot (0,42 + j0,34)} = (12,5 + j4,76) \cdot 10^4 \text{ А/Вб} \quad (4.35)$$

Задача 5. Коэффициент трансформации трансформатора тока $K_{I_n} = 100/5$. Первичный ток $I_1 = 100$ А. Комплексная погрешность трансформатора $\dot{\lambda}_I = 0,003 + j0,004$. Образцовое сопротивление $R_0 = 0,02$ Ом. Ток в сравниваемом устройстве СУ равен нулю. При каких значениях R_2 и C_2 схема, показанная на рисунке 1, будет уравновешена?

Решение:

Вторичный ток равен

$$I_2 = \frac{I_1}{K_{I_n}} \cdot (1 + \dot{\lambda}_I) = -\frac{100}{200} \cdot (1 - 0,003 + j0,004) = -(4,98 + j0,002) = I_2' + jI_2'' \quad (4.36)$$

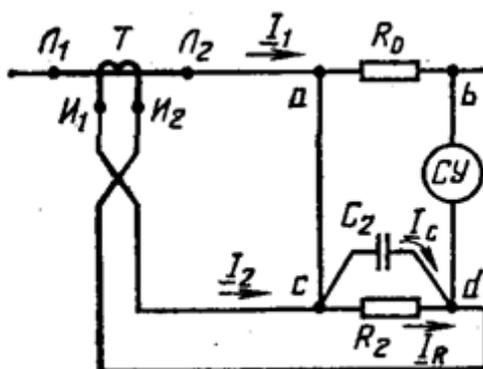


Рис.4.1. Схема к задаче №5

Для того чтобы схема была уравновешена, т. е. $U_{ab} = U_{ca}$, необходимо, чтобы активная и реактивная составляющие тока \dot{I}_2 были равны токам I_R и I_C .

Отсюда

$$I_2' \cdot R_2 = U_{ab} \quad (4.37)$$

где

$$U_{ab} = I_1 \cdot R_0 = 100 \cdot 0,02 = 2 \text{ В} \quad (4.38)$$

Тогда

$$R_2 = U_{ab} / I_2' = 2 / 4,98 = 0,4 \text{ Ом} \quad (4.39)$$

а

$$I_2'' \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2} = U_{ab} \quad (4.40)$$

Отсюда найдем

$$C_2 = I_2'' / \omega \cdot U_{ab} = 0,02 / 314 \cdot 2 = 32 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \quad (4.41)$$

Задача

6. Числа

ВИТКОВ

ОСНОВНЫХ

обмоток w_1 и w_2 четырехобмоточного трансформатора, показанного на рисунке 3.2, равны $w_1 = w_2 = 20$. Число витков вспомогательной обмотки $w_a = 1000$. Ток в обмотке w_1 равен $I_1 = 5 \text{ А}$, а ток I_2 в обмотке w_2 на 0,5 % больше I_1 и опережает ток I_1 на 20° . Направления токов таковы, что их МДС действуют встречно.

Требуется определить, каков должен быть ток в обмотке w_a и каков должен быть сдвиг фаз между ним и током I_1 , чтобы вибрационный гальванометр, подключенный к измерительной обмотке $w_{из}$, не давал отклонения.

Ответ. 768 мкА; 49°20'.

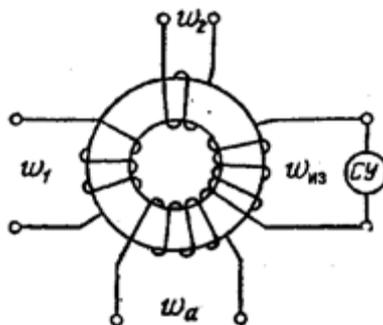


Рис.4.2. Схема к задаче №6

Задача 7. Номинальные коэффициенты трансформации трансформаторов тока T_X и T_0 , включенных по схеме, показанной на рисунке 3.3, равны $K_{I_n} = 200/5$. Первичный ток $I_1 = 100$ А. Погрешности трансформаторов равны: у трансформатора T_X погрешность тока $f_{I_x} = 0,6 \%$, угловая погрешность тока $d_{I_x} = 40'$; у трансформатора T_0 погрешность тока $f_{I_0} = -0,5 \%$, угловая погрешность $d_{I_0} = 5''$.

Определите напряжение на зажимах сопротивления $DR = 1$ Ом.

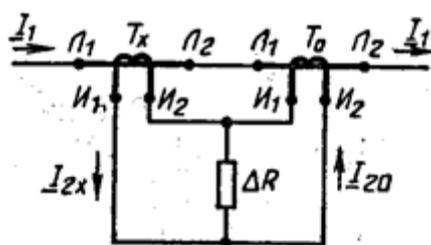


Рис.4.3. Схема к задаче №7

Решение:

Ток в сопротивлении DR равен

$$\begin{aligned} \Delta i &= i_{2x} - i_{20} = \frac{I_1}{K_{I_n}} \cdot (1 + \lambda_{IX}) - \frac{I_1}{K_{I_n}} \cdot (1 + \lambda_{0X}) = \frac{I_1}{K_{I_n}} \cdot (\lambda_{IX} - \lambda_{I0}) = \\ &= \frac{100 \cdot 5}{200} \cdot (0,006 + j2,91 \cdot 10^{-4} \cdot 40 + 0,0005 - j2,91 \cdot 10^{-4} \cdot 5) = (0,0163 + j0,0254) \text{ А.} \end{aligned} \quad (4.42)$$

Напряжение на зажимах сопротивления DR равно

$$\begin{aligned}\dot{U}_{DR} &= \Delta I / \Delta U = (0,0163 + j0,0254) \cdot 1 = (16,3 + j2,54) \text{ мВ} \\ |\dot{U}_{DR}| &= 39,2 \text{ мВ}\end{aligned}\tag{4.43}$$

Практическая работа №5. Исследование характеристик конденсаторов постоянной ёмкости

Цель работы: Исследование электрических свойств конденсаторов с оксидным диэлектриком в рабочем диапазоне изменения внешних параметров.

Основные теоретические положения

Конденсатором с оксидным диэлектриком называют конденсатор, реализующий емкость в системе металл – оксид – противоэлектрод.

Рабочим диэлектриком таких конденсаторов являются тонкие оксидные слои на поверхности базового металла (анода), получаемые посредством его электрохимического оксидирования. Анодные оксидные пленки (Ta_2O_5 , Al_2O_3 , Nb_2O_5), толщина которых не превышает 1 мкм, обладают высоким электроизоляционными свойствами (удельное электрическое сопротивление $\rho \geq 10^{14}$ Ом · см; электрическая прочность $E_{\text{пр}} = (3 \dots 6) \cdot 10^{16}$ В/см) и сравнительно высокой диэлектрической проницаемостью (для Ta_2O_5 $\varepsilon = 27$; для Al_2O_3 $\varepsilon = 8 \dots 10$; для Nb_2O_5 $\varepsilon = 41$ на частоте 1 кГц).

С целью увеличения емкости (заряда) оксидных конденсаторов поверхность металлического анода развивают, что достигается посредством изготовления анода из металлического порошка в форме объемно-пористого тела методами порошковой металлургии или из металлической фольги, подвергнутой электрохимическому травлению.

Материалом второго электрода конденсаторов этого класса служит электролит (водный раствор серной кислоты у танталовых конденсаторов и электролиты на

основе органических спиртов у алюминиевых конденсаторов) или полупроводниковая двуокись марганца (MnO_2). В пленочных оксидных конденсаторах материалом второго электрода, как правило, является пленка алюминия. Такие конденсаторы используются для интегральных микросхем и получают их в процессе единого технологического цикла производства.

В зависимости от материала противоэлектрода конденсаторы делятся на оксидно-электролитические (танталовые типа К52, алюминиевые типа К50), оксидно-полупроводниковые (типа К53) и оксидно-металлические.

Вещество противоэлектрода заполняет поры объемно-пористого тела (травленной фольги), что позволяет в большой степени реализовать в емкости площадь поверхности анода.

Сочетание высоких диэлектрических свойств оксидного диэлектрика в тонких слоях с большей площадью поверхности электрода обеспечивает конденсаторам с оксидным диэлектриком рекордно высокие удельные параметры – емкость (заряд) в расчете на единицу объема.

Другой важный параметр конденсаторов – тангенс угла потерь – составляет у оксидных конденсаторов в области звуковых частот порядка 10^{-2} и обнаруживает рост с увеличением частоты, начиная уже с 10^4 Гц. Это обусловлено вкладом в потери, наряду с диэлектрическими потерями в оксидном слое, рассеяния на сопротивление контакта, которое существенно для этих типов конденсаторов (рис. 5.1).

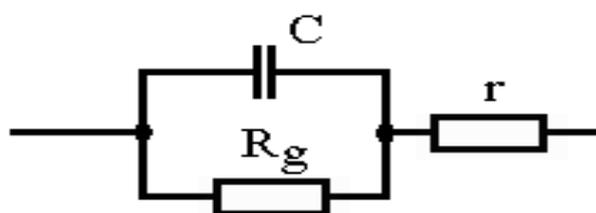


Рис. 5.1. Эквивалентная схема замещения конденсатора:

C – емкость; R_g – сопротивление диэлектрика;

r – сопротивление электрода (контакта)

Из представленной на рис. 1 эквивалентной электрической схемы замещения конденсатора видно, что тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора $\text{tg } \delta_k$ складывается из тангенса угла потерь оксидного слоя (диэлектрика) $\text{tg } \delta_{\text{диэл}}$ и тангенса угла потерь на сопротивление электрода (контакта) $\text{tg } \delta_r$

$$\text{tg } \delta_k = \text{tg } \delta_{\text{диэл}} + \text{tg } \delta_r \quad (5.1)$$

Величина составляющей $\text{tg } \delta_r$, обусловленной рассеянием на сопротивлении контакта, возрастает пропорционально частоте.

Поскольку оксидные конденсаторы используются, как правило, в цепях фильтрации или защиты электронных схем, важное значение имеет величина тока утечки на постоянном напряжении. Она определяется сопротивлением диэлектрика R_g и инжектирующей способностью материала противоэлектрода.

При приложении к конденсаторной структуре напряжения с полярностью, соответствующей положительному потенциалу на аноде, величина тока утечки определяется, главным образом, удельным сопротивлением оксидного диэлектрика и мала. При противоположной полярности напряжения (отрицательный потенциал на аноде) имеет место инжекция носителей заряда (протонов) из водного раствора кислоты или сорбирующего влагу пористого слоя двуокиси марганца. Избыточная концентрация носителей заряда в диэлектрике приводит к существенному повышению уровня тока, протекающего в конденсаторе при этой полярности.

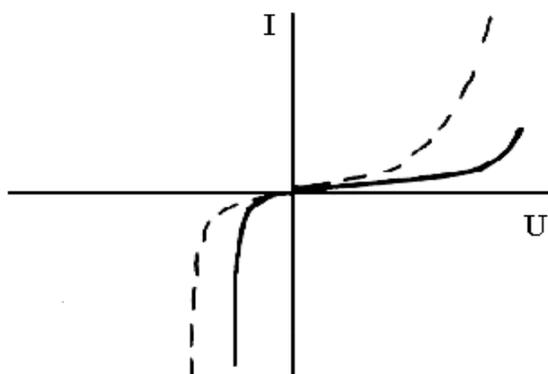


Рис. 5.2. Вольт-амперная характеристика электролитического конденсатора (_____) и оксидно-полупроводникового конденсатора (_ _ _ _ _).

Большой ток (пропускное направление) протекает в конденсаторе при приложении напряжения, полярности, соответствующей отрицательному потенциалу на аноде.

В результате вольт-амперная характеристика (ВАХ) оксидного конденсатора является асимметричной (подобной ВАХ полупроводниковых диодов) рис. 2, а сами конденсаторы могут использоваться только при одной полярности приложенного напряжения (положительный потенциал на аноде). Полярность оксидных конденсаторов существенно ограничивает область их применения.

Порядок выполнения работы

Определить эквивалентные последовательные емкость и сопротивление конденсаторной структуры Ta – Ta₂O₅ – электролит (образец № 1) на переменном сигнале частотой 100 Гц.

Снять вольт-амперную характеристику конденсаторной структуры с оксидным диэлектриком (зависимость величины тока, протекающего через структуру, от приложенного напряжения).

Последовательность расчета

Произвести расчет эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора

$$r = \frac{R}{2} \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 - \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^2 - 1 \right], \quad (5.2)$$

где: R – сопротивление резистора (R = 500 Ом);

f – частота переменного сигнала (f = 100 Гц).

Рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь и эквивалентные параллельные емкость и сопротивление по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = 2 \pi \cdot f \cdot r \cdot C. \quad (5.3)$$

Рассчитать эквивалентную параллельную емкость по формулам:

$$C = \left(2\pi f \sqrt{R^2 \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^2 - r^2} \right)^{-1} \quad (5.4)$$

$$C_{нар} = \frac{C}{1 + tg^2 \delta} \quad (5.5)$$

Рассчитать эквивалентное параллельное сопротивление по формуле:

$$R_{нар} = r \left(1 + \frac{1}{tg^2 \delta} \right) \quad (5.6)$$

Рассчитать диэлектрическую проницаемость ϵ оксидной диэлектрической пленки (Ta_2O_5) по формуле

$$\epsilon = \frac{C d}{\epsilon_0 S} \quad , \quad (5.7)$$

где C – емкость конденсатора;

d – толщина диэлектрической пленки, равная $2 \cdot 10^{-5}$ см;

S – площадь электрода (для конденсатора емкостью 68 мкФ $S=6 \cdot 10^2$ см², для конденсатора емкостью 33 мкФ $S=3 \cdot 10^2$ см²); $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14}$ Ф/см.

Рассчитать удельное сопротивление оксидной пленки по формуле

$$\rho = R_{нар} \frac{S}{d} \quad (5.8)$$

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема измерительной установки.
3. Результаты расчета эквивалентного последовательного сопротивления и емкости. Результаты расчета тангенса угла диэлектрических потерь и эквивалентных параллельных емкости и сопротивления.
4. Параметры оксидной диэлектрической пленки ($tg\delta$, ϵ_0 , ρ).
5. Таблица с результатами измерений величины тока, протекающего через образцы, в зависимости от приложенного напряжения.
6. Расчет $\rho = f(U)$.
7. Графики зависимости величины тока от приложенного напряжения (вольт-амперные характеристики) образцов № 1 и № 2, совмещенные в одних координатах.
8. Таблица с результатами измерения тока, протекающего через образец №1 при постоянном напряжении, в зависимости от температуры. График зависимости $I = f(T)$.

9. ВЫВОДЫ.

Практическая работа №6. Исследование полупроводниковых конденсаторов переменной ёмкости

Для плоского конденсатора с зарядом Q , имеющего металлические обкладки площадью S , расположенные на расстоянии d друг от друга и разделенные слоем материала с диэлектрической проницаемостью ϵ , определить:

- емкость;
- удельную емкость;
- разность потенциалов между обкладками;
- напряженность электрического поля в диэлектрике;
- энергию, запасенную в конденсаторе;
- плотность запасенной в конденсаторе энергии.

Методические указания

1. Исходные данные для конкретных вариантов задачи 3 приведены в табл. 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1

Последняя цифра шифра	Материал диэлектрика	Диэлектрическая проницаемость	Толщина диэлектрика, мкм
1	Политетрафторэтилен	2	1000
2	Оксид алюминия	10	0,2
3	Керамика на основе титаната циркония	40	100
4	Поликарбонат	3	10
5	Пятиокись ниобия	41	0,05
6	Керамика на основе титаната бария	9000	10
7	Ультрафарфор	8,2	6
8	Керамика на основе	30000	3

	ниобата свинца		
9	Слюда	7	1000
0	Пятиокись тантала	27	0,01

Таблица 6.2

	Предпоследняя цифра шифра				
	1 и 2	3 и 4	5 и 6	7 и 8	9 и 0
Площадь электродов, м ²	1,0·10 ⁻²	2,5·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁸	1,0·10 ⁻¹⁰
Материал диэлектрика	Заряд конденсатора, Кл				
Политетрафторэтилен	1,8·10 ⁻⁸	4,4·10 ⁻¹¹	1,7·10 ⁻¹²	7,0·10 ⁻¹⁴	1,8·10 ⁻¹⁶
Окись алюминия	4,4·10 ⁻⁴	1,1·10 ⁻⁶	4,4·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁹	4,4·10 ⁻¹²
Керамика на основе титаната циркония	3,5·10 ⁻⁶	8,8·10 ⁻⁹	3,5·10 ⁻¹⁰	1,4·10 ⁻¹¹	3,5·10 ⁻¹⁴
Поликарбонат	2,6·10 ⁻⁶	6,6·10 ⁻⁹	2,6·10 ⁻¹⁰	1,1·10 ⁻¹¹	2,6·10 ⁻¹⁴
Пятиокись ниобия	7,3·10 ⁻³	1,8·10 ⁻⁵	7,3·10 ⁻⁷	2,9·10 ⁻⁸	7,3·10 ⁻¹¹
Керамика на основе титаната бария	8,0·10 ⁻³	2,0·10 ⁻⁵	8,0·10 ⁻⁷	3,2·10 ⁻⁸	8,0·10 ⁻¹¹
Ультрафарфор	1,2·10 ⁻⁵	3,0·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻⁹	4,8·10 ⁻¹¹	1,2·10 ⁻¹³
Керамика на основе ниобата свинца	8,9·10 ⁻²	2,2·10 ⁻⁴	8,9·10 ⁻⁶	3,5·10 ⁻⁷	8,9·10 ⁻¹⁰
Слюда	6,2·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻¹⁰	6,2·10 ⁻¹²	2,5·10 ⁻¹³	6,2·10 ⁻¹⁶
Пятиокись тантала	2,4·10 ⁻²	6,0·10 ⁻⁵	2,4·10 ⁻⁶	9,6·10 ⁻⁸	2,4·10 ⁻¹⁰

1. Емкость конденсатора C определяется по формуле емкости для плоского конденсатора с однослойным диэлектриком

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (6.1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

2. Удельная емкость конденсатора и плотность запасенной в конденсаторе энергии определяются в расчете на единицу активного объема диэлектрика $V_{\text{диэл}}$:

$$V_{\text{диэл}} = S \cdot d . \quad (6.2)$$

4. Разность потенциалов между обкладками конденсатора U рассчитывается с использованием формулы, соответствующей физическому определению электрической емкости

$$C = \frac{Q}{U}, \quad (6.3)$$

где Q - заряд конденсатора.

5. Напряженность электрического поля в диэлектрике конденсатора E определяется как разность потенциалов между его обкладками, отнесенная к толщине диэлектрика

$$E = \frac{U}{d}. \quad (6.4)$$

6. Запасенная в конденсаторе энергия W определяется исходя из заряда конденсатора и напряжения между его обкладками

$$W = \frac{Q \cdot U}{2}. \quad (6.5)$$

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
10. Схема измерительной установки.
11. Результаты расчета эквивалентного последовательного сопротивления и емкости. Результаты расчета тангенса угла диэлектрических потерь и эквивалентных параллельных емкости и сопротивления.
12. Параметры оксидной диэлектрической пленки ($\text{tg}\delta$, ϵ_0 , ρ).
13. Таблица с результатами измерений величины тока, протекающего через образцы, в зависимости от приложенного напряжения.
14. Расчет $\rho = f(U)$.
15. Графики зависимости величины тока от приложенного напряжения (вольт-амперные характеристики) образцов № 1 и № 2, совмещенные в одних координатах.

16. Таблица с результатами измерения тока, протекающего через образец №1 при постоянном напряжении, в зависимости от температуры. График зависимости $I=f(T)$.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

Самостоятельная работа – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

При организации самостоятельной работы следует взять за правило:

- учиться ежедневно, начиная с первого дня семестра, пропущенные дни будут потеряны безвозвратно;
- чтобы выполнить весь объем самостоятельной работы, необходимо заниматься по 3–5 часов ежедневно;
- начиная работу, надо выбрать что-нибудь среднее по трудности, затем перейти к более трудной работе, и напоследок оставить легкую часть, требующую не столько больших интеллектуальных усилий, сколько определенных моторных действий.

Виды заданий для внеаудиторной самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференциальный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности студента.

3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки по всем типам занятий является работа с литературой. Умение работать с литературой

означает научиться осмысленно пользоваться учебно-методическим и другим информационным обеспечением дисциплины.

Для изучения дисциплины вся рекомендуемая литература подразделяется на основную и дополнительную и приводится в п. 10 рабочей программы дисциплины.

К основной литературе относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия).

Поскольку в учебной литературе (учебниках) зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражения новые документы, события, явления, научные открытия последних лет, то рекомендуется для более углубленного изучения программного материала дополнительная литература.

Прежде чем приступить к чтению, необходимо запомнить или записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания, название интересующих глав.

Содержание (оглавление) дает представление о системе изложения ключевых положений всей публикации и помогает найти нужные сведения.

Предисловие или введение книги поможет установить, на кого рассчитана данная публикация, какие задачи ставил перед собой автор, содержится краткая информация о содержании глав работы. Иногда полезно после этого посмотреть послесловие или заключение. Это помогает составить представление о степени достоверности или научности данной книги.

Изучение научной учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей. Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект. Такие записи удлиняют процесс проработки, изучения книги, но способствуют ее лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал. При изучении литературы особое внимание следует обращать на новые термины и понятия. Записи позволяют восстановить в памяти ранее прочитанное без дополнительного обращения к самой книге.

Процесс изучения дисциплины предполагает также активное использование информационных технологий при организации своей познавательной деятельности.

Наличие огромного количества материалов в Сети и специализированных поисковых машин делает Интернет незаменимым средством при поиске информации в процессе обучения.

Однако при использовании интернет-ресурсов следует учитывать следующие рекомендации:

- необходимо критически относиться к информации;
- следует научиться обрабатывать большие объемы информации, представленные в источниках, уметь видеть сильные и слабые стороны, выделять из представленного материала наиболее существенную часть;
- необходимо избегать плагиата, поэтому, если текст источника остается без изменения, необходимо сделать ссылки на автора работы.

3.3 Подготовка к практическим работам

Подготовка к практическим работам осуществляется студентом во внеаудиторное время в часы, отведенные на самостоятельную работу. Подготовка требует немалого времени, поэтому целесообразно планировать ее заранее за несколько дней до занятия и целесообразно проводить в следующей последовательности.

1. Внимательно ознакомьтесь с описанием соответствующей практической работы руководствуясь методическими указаниями к выполнению практической работе, уясните цель и задачи эксперимента.

2. Используя конспект лекций и рекомендованную в описании практической работы учебную литературу, изучите теоретические вопросы, относящиеся к лабораторному эксперименту. Выясните теоретические положения, знание которых необходимо для выполнения работы и понимания полученных результатов.

3. Изучите принципиальную схему лабораторной установки, приведенную в описании работы. Ознакомьтесь с применяемым оборудованием, контрольно-измерительными приборами, принципом их действия, правилами эксплуатации.

4. Ознакомьтесь с порядком выполнения работы, усвойте методику измерения физических величин в практическом эксперименте, последовательность операций и форму представления полученных результатов.

5. В индивидуальном лабораторном журнале подготовьте «заготовку отчета», который должен быть отражением работы по систематизации приобретенных знаний, опорным планом для проведения эксперимента.

«Заготовку отчета» рекомендуется выполнять по следующей схеме:

- номер, название и цель работы;
- оборудование, приборы и материалы, применяемые в процессе измерений;
- краткий конспект теоретических положений по теме исследования – анализ физических основ метода и описание методики эксперимента, который включает:
 - физическое явление, изучаемое в работе, связь между величинами, его описывающими;
 - объект исследования, его особенности;
 - физическое явление, положенное в основу метода измерений;
 - зависимость, которая может быть экспериментально проверена;
 - условия, позволяющие осуществить такую проверку;
 - и поясняющие теоретический материал рисунки;
- принципиальная схема установки;
- описание метода измерения;
- заготовки таблиц, в которых будут представлены результаты измерений и расчетов (примеры таблиц даются в методическом указании к работе);
- расчетные формулы искомых величин.

6. Проверьте степень подготовленности к лабораторному занятию по контрольным вопросам, приводимым в описании работы.

Окончательное оформление работы, обработка результатов эксперимента и подготовка к защите по контрольным вопросам проводится студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу.

К следующему (после выполнения очередной лабораторной работы) занятию каждый студент должен представить окончательный отчет о выполненной

лабораторной работе, в который входит «заготовка отчета» дополненная следующими пунктами:

- результаты измерений и вычислений в виде таблиц (или ином виде, согласно методическим рекомендациям к данной лабораторной работе);
- расчетные формулы, по которым производились вычисления с примером вычисления по каждой формуле, что позволяет при необходимости быстро проверить правильность расчета;
- систематизированные результаты эксперимента – схемы, графики, диаграммы и т.п., в соответствии с заданием на лабораторную работу и требованиям, предъявляемым к их оформлению;
- оценка надежности и достоверности результатов (примеры вычислений величин, измеряемых косвенно, и погрешностей для прямых и косвенных измерений);
- основные выводы по результатам работы, вытекающие из экспериментальных данных или на основании сравнения полученных результатов с теоретическими данными, если это возможно с объяснением расхождения.

3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем

Для подготовки конспекта рекомендуется использовать основную и дополнительную литературу.

При написании конспекта придерживайтесь следующих рекомендаций.

1. Прежде чем приступить к чтению, необходимо записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания.

2. Внимательно прочитайте текст.

3. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.

4. Выделите главное, составьте план.

5. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.

6. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана.

При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты, учитывайте лаконичность, значимость мысли. В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения.

3.5 Подготовка к текущему и промежуточному контролю

Подготовка к тестированию. В современном образовательном процессе тестирование как новая форма оценки знаний занимает важное место.

Цель тестирований в ходе учебного процесса студентов состоит не только в систематическом контроле знаний, но и способствует повышению эффективности обучения учащихся, позволяет выявить уровень усвоения теоретического материала, выявить уровень практических умений и аналитических способностей студентов. А на основе этого идет коррекция процесса обучения и планируются последующие этапы учебного процесса.

При подготовке к тесту следует, прежде всего, просмотреть конспект лекций и практических занятий и отметить в них имеющиеся темы и практические задания, относящиеся к тематике теста. Особо следует уделить внимание содержанию тем заданных на самостоятельное изучение, так как часть вопросов в тестах может относиться именно к этим темам. Если какие – то лекционные вопросы и практические задания на определенные темы не были разобраны на занятиях (или решения которых оказались не понятыми), следует обратиться к учебной литературе, рекомендованной преподавателем. Полезно самостоятельно решить несколько типичных заданий по соответствующему разделу.

При подготовке к тесту не следует просто заучивать, необходимо понять логику изложенного материала. Этому немало способствует составление развернутого плана, таблиц, схем. Как и любая другая форма подготовки к контролю знаний, тестирование имеет ряд особенностей, знание которых помогает успешно выполнить тест.

Можно дать следующие методические рекомендации:

- прежде всего, следует внимательно изучить структуру теста, оценить объем времени, выделяемого на данный тест, увидеть, какого типа задания в нем содержатся, что поможет настроиться на работу;
- лучше начинать отвечать на те вопросы, в правильности решения которых нет сомнений, пока не останавливаясь на тех, которые могут вызвать долгие раздумья, что позволит успокоиться и сосредоточиться на выполнении более трудных вопросов;
- очень важно всегда внимательно читать задания до конца, не пытаясь понять условия «по первым словам» или выполнив подобные задания в предыдущих тестированиях, так как такая спешка нередко приводит к досадным ошибкам в самых легких вопросах;
- если Вы не знаете ответа на вопрос или не уверены в правильности, следует пропустить его и отметить, чтобы потом к нему вернуться;
- думайте только о текущем задании, необходимо концентрироваться на данном вопросе и находить решения, подходящие именно к нему;
- многие задания можно быстрее решить, если не искать сразу правильный вариант ответа, а последовательно исключать те, которые явно не подходят, что позволяет в итоге сконцентрировать внимание на одном-двух вероятных вариантах;
- рассчитывать выполнение заданий нужно всегда так, чтобы осталось время на проверку и доработку (примерно 1/3-1/4 запланированного времени), что позволит свести к минимуму вероятность описок и сэкономить время, чтобы набрать максимум баллов на легких заданиях и сосредоточиться на решении более трудных, которые вначале пришлось пропустить;
- процесс угадывания правильных ответов желательно свести к минимуму, так как это чревато тем, что Вы забудете о главном: умении использовать имеющиеся накопленные в учебном процессе знания, и будете надеяться на удачу.

Подготовка к промежуточной аттестации. Формой промежуточной аттестации (контроля) является зачет. Зачет может проводиться в виде письменного опроса с последующим собеседованием или с применением тестирования.

Зачет – форма проверки полученных теоретических и практических знаний, их прочность, развитие творческого мышления, приобретение навыков самостоятельной работы, умения синтезировать полученные знания.

Основная цель подготовки к зачету – достичь понимания законов и явлений, а не только механически заучить материал.

Рекомендации по подготовке к зачетному тесту представлены выше.

Подготовка к устной сдаче зачета включает в себя несколько основных этапов:

- просмотр программы учебного курса;
- определение необходимых для подготовки источников (учебников, дополнительной литературы и т.д.) и их изучение;
- использование конспектов лекций;
- консультирование у преподавателя.

Для успешной сдачи зачета рекомендуется соблюдать несколько правил.

1. Подготовка к зачету начинается с первого занятия по дисциплине, на котором студенты получают общую установку преподавателя и перечень основных требований к текущей и промежуточной аттестации. При этом важно с самого начала планомерно осваивать материал, руководствуясь, прежде всего перечнем вопросов к экзамену, конспектировать важные для решения учебных задач источники.

2. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до зачета. В течение этого времени нужно успеть повторить и систематизировать изученный материал.

3. За несколько дней перед зачетом распределите вопросы равномерно на все дни подготовки, возможно, выделив последний день на краткий повтор всего курса.

4. Каждый вопрос следует проработать по конспекту лекций, по учебнику или учебному пособию. Для лучшего запоминания материала целесообразно работать с

карандашом в руках, записывая выводимые формулы, изображая рисунки, схемы и диаграммы в отдельной тетради или на листах бумаги.

5. После повтора каждого вопроса нужно, закрыв конспект и учебники, самостоятельно вывести формулы, воспроизвести иллюстративный материал с последующей самопроверкой.

6. Все трудные и не полностью понятые вопросы следует выписывать на отдельный лист бумаги, с последующим уточнением ответов на них у преподавателя на консультации.

7. При ответе на вопросы билета студент должен продемонстрировать знание теоретического материала и умение применить при анализе качественных и количественных задач. Изложение материала должно быть четким, кратким и аргументированным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сорокин, В.С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики [Электронный ресурс] : учеб. / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 448 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/67462>.

2. Сорокин, В.С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71735>.

3. Марков В.Ф. Материалы современной электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Марков, Х.Н. Мухамедзянов, Л.Н. Маскаева. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2014. — 272 с. — 978-5-7996-1186-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69626.html>

4. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Легостаев. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. — 239 с. — 978-5-86889-679-8. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/72057.html>

5. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники. Часть 1 [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л.Н. Орликов. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 98 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13990.html>

6. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники. Часть 2 [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л.Н. Орликов. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем

управления и радиоэлектроники, 2012. — 100 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13991.html>

7. Бычков, Ю.А. Справочник по основам теоретической электротехники [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 368 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3187>.

8. Шалимова, К.В. Физика полупроводников [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/648>.

9. Ханин, С. Д. Радиоматериалы и радиокомпоненты: учебно-методический комплекс / сост. С. Д. Ханин, О. В. Денисова, А. И. Адер - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. — 165 с.

10. Кузевных, Н.И. Радиоматериалы и радиокомпоненты: Учебное пособие для студентов радио-технических специальностей / Кузевных Н.И., Солдатова Л.Ю. — Томск: ТУСУР, 2012. — 176 с.

11. Хадыкин, А. М. Радиоматериалы и радиокомпоненты: конспект лекций. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. — 86 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Краткий конспект лекций	4
1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции	4
1.2 Краткое содержание курса лекций	7
2 Методические рекомендации к практическим работам	173
2.1 Подготовка к выполнению практических работ	178
2.2 Выполнение практических работ	178
2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» практической работы	179
2.4 Наименование предлагаемых к выполнению практических работ и методические указания к ним	180
3 Методические рекомендации к самостоятельной работе	221
3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы	221
3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением	221
3.3 Подготовка к практическим работам	223
3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем	225
3.5 Подготовка к текущему и промежуточному контролю	226
Библиографический список	230

Нещименко Виталий Владимирович,
доцент кафедры Физики АмГУ, доктор физ.-мат. наук