

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микро- и наноэлектроники

А.П. Казанцев

Учебное пособие

«МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

для высших учебных заведений по специальностям

I-39 01 01 «Радиотехника»,

I-39 01 02 «Радиоэлектронные системы»,

I-39 01 03 «Радиоинформатика»,

I-39 01 04 «Радиоэлектронная защита информации»

Минск 2008

Аннотация

В учебном пособии изложены основные сведения о свойствах материалов, используемых в изделиях электронной техники: проводников, диэлектриков, полупроводников и магнитных материалов.

Значительное внимание уделено физическим процессам, происходящим в материалах под действием электромагнитного поля, которое определяет такие свойства, как электропроводность, поляризация, способность намагничиваться. Выделены основные количественные параметры, отражающие свойства материалов и позволяющие сравнивать и рационально выбирать нужный материал для конкретных областей применения.

Приведены общие сведения по основным компонентам электроники: резисторам, конденсаторам, полупроводниковым приборам и интегральным схемам.

Представлены классификационные схемы и таблицы основных количественных параметров наиболее широко используемых материалов и компонентов электроники, изготавливаемых на их основе.

Предназначается для студентов младших курсов вузов и колледжей, обучающихся по радиотехническим и приборостроительным специальностям.

Содержание

Введение	5
Глава 1. Электротехнические материалы	6
1.1. Классификация ЭТМ.....	6
1.2. Физико-химическая природа материалов.....	7
1.3. Энергетический спектр электронов и деление веществ на классы.....	9
Контрольные вопросы.....	14
Глава 2. Проводники	15
2.1. Свойства и количественные параметры проводников.....	15
2.2. Материалы с высокой проводимостью.....	17
2.3. Материалы с высоким удельным сопротивлением.....	20
2.4. Резистивные материалы.....	22
2.5. Материалы и сплавы различного назначения.....	22
2.6. Изделия и компоненты электроники на основе проводниковых материалов.....	25
Обмоточные провода.....	25
Монтажные провода.....	26
Установочные провода, шнуры, кабели.....	27
2.7. Резисторы.....	30
Классификация резисторов по различным признакам.....	31
Наборы резисторов.....	33
Деление резисторов по материалу токопроводящего элемента.....	35
Системы обозначений и маркировки резисторов.....	37
Контрольные вопросы.....	40
Глава 3. Диэлектрики	41
3.1. Свойства и количественные параметры диэлектриков.....	41
Поляризация.....	41
Виды поляризации диэлектриков.....	44
Электропроводность диэлектриков.....	48
Потери в диэлектрике.....	49
Эквивалентные схемы замещения реального диэлектрика.....	52
Пробой диэлектрика и виды пробоя.....	54
Контрольные вопросы.....	56
3.2. Диэлектрические материалы.....	57
Классификация диэлектрических материалов.....	57
Газообразные диэлектрические материалы.....	57
Жидкие диэлектрические материалы.....	59
Твердые органические диэлектрические материалы.....	60
Неорганические диэлектрические материалы.....	66
Керамические материалы.....	70
3.3. Конденсаторы.....	72
Классификация конденсаторов по различным признакам.....	73
Варианты конструкций конденсаторов.....	74
Деление конденсаторов по виду диэлектрика и система обозначений.....	77
Контрольные вопросы.....	80

Глава 4. Полупроводники	80
4.1. Типы, основные свойства и количественные параметры полупроводников....	80
Собственные и примесные полупроводники.....	80
Температурная зависимость удельной проводимости примесных полупроводников.....	85
Фотопроводимость полупроводников.....	87
Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях.....	89
Контрольные вопросы.....	90
4.2. Полупроводниковые материалы.....	91
Методы получения монокристаллов.....	91
Получение и основные характеристики наиболее применяемых полупроводниковых материалов.....	95
Контрольные вопросы.....	98
4.3. Приборы и компоненты электроники на основе полупроводниковых материалов.....	99
Полупроводниковые резисторы.....	101
Диоды.....	103
Транзисторы.....	106
Основные классификационные признаки транзисторов.....	111
Система условных обозначений транзисторов.....	112
Тиристоры.....	113
Многэлектродные полупроводниковые приборы.....	115
Контрольные вопросы.....	118
4.4. Интегральные микросхемы.....	119
Классификация и типы интегральных микросхем.....	119
Полупроводниковые ИС на биполярных и МДП-транзисторах.....	121
Пленочные ИС.....	122
Гибридные ИС.....	123
Совмещенные ИС.....	124
Контрольные вопросы.....	124
Глава 5. Магнетики.....	125
5.1. Природа магнетизма и магнитные свойства веществ.....	125
5.2. Процесс намагничивания и количественные параметры магнитных материалов.....	127
Процесс намагничивания в переменном магнитном поле.....	130
5.3. Магнитные материалы, основные характеристики, применение.....	132
Магнитомягкие материалы.....	132
Магнитотвердые материалы.....	136
Магнитные материалы специального назначения.....	139
Контрольные вопросы.....	141
Литература.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Достижения современной науки и техники трудно представить без фундаментальных исследований в материаловедении. Поэтому, как бы высоки не были успехи космонавтики и вычислительной техники, приборостроения, ЭВМ, микроэлектроники и т.д., необходимо отдать должное развитию материаловедения, благодаря которому оказалось возможным создание обычных резисторов и конденсаторов, электронных ламп и транзисторов, интегральных микросхем и микропроцессоров, сложнейших ЭВМ, радиотехнических устройств и систем и т.п.

Роль и значение электротехнических материалов возрастает по мере развития научно-технического прогресса. Увеличение мощностей и напряжений электротехнических установок, уменьшение габаритов и массы аппаратов и устройств, необходимость их работы в условиях высоких, сверхвысоких и сверхнизких температур, повышенной влажности, иных внешних воздействий предъявляют все более жесткие требования к электротехническим материалам и вызывают необходимость разработки более совершенных их типов.

Современные отрасли науки и техники, такие, как радиосвязь, радиолокация, радиоастрономия, радиоспектроскопия, радиофизика, кибернетика, микроэлектроника, автоматика, телемеханика и др., не могли бы получить столь значительное развитие без использования высококачественных электротехнических материалов и радиокомпонентов на их основе. При этом в ряде случаев совершенно необходимо создание новых материалов с особыми свойствами.

Использование этих свойств позволяет существенно улучшить качественные показатели и эксплуатационную надежность оборудования, удешевить и упростить технологию производства.

Для получения требуемых свойств материалов в настоящее время используют разнообразные, зачастую весьма сложные приемы химического синтеза, искусственного выращивания монокристаллов, напыления и осаждения тонких пленок на различные подложки в вакууме и электролите, разнообразные способы особо глубокой очистки материалов (в том числе зонная плавка), введение добавок (диффузией и ионно-плазменным легированием), воздействие электромагнитного поля и проникающих излучений, высокого давления и температур и т.п. Все это свидетельствует о наличии весьма разнообразных приемов и методов получения материалов с широким набором требуемых свойств.

Как правило, выбор материалов для конкретного применения является сложной задачей, успешное решение которой в значительной степени зависит от глубины и всесторонности знаний разнообразных свойств весьма широкого спектра электротехнических материалов. Для этого необходимо сознательно разбираться в требованиях, предъявляемых к конкретным материалам, глубоко изучить физические явления, происходящие в материалах при воздействии на них электромагнитного поля, знать количественные параметры, характеризующие свойства материалов и уметь их рационально использовать.

Глава 1

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Классификация ЭТМ.

Материалы, широко используемые в радиоэлектронной аппаратуре, имеют различные названия: электротехнические материалы, радиотехнические материалы, материалы электронной техники. Однако принципиальной разницы между этими материалами нет. Несмотря на различия в названиях, все они применяются для изготовления деталей или компонентов и устройств электротехнической, радиотехнической, микроэлектронной, вычислительной аппаратуры. Тем не менее, все материалы в интересующей нас области техники должны обладать вполне определенным набором свойств, благодаря которым они находят конкретное применение.

Объединяющим началом всех электротехнических материалов является набор их свойств по отношению к электромагнитному полю. При взаимодействии с электромагнитным полем проявляются электрические и магнитные свойства. Это позволяет дать определение понятия «электротехнические материалы» и классифицировать их.

Электро(радио)техническими материалами называются материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств.

По основному электрическому свойству веществ - электропроводности - все они делятся на три группы: проводники, полупроводники и диэлектрики.

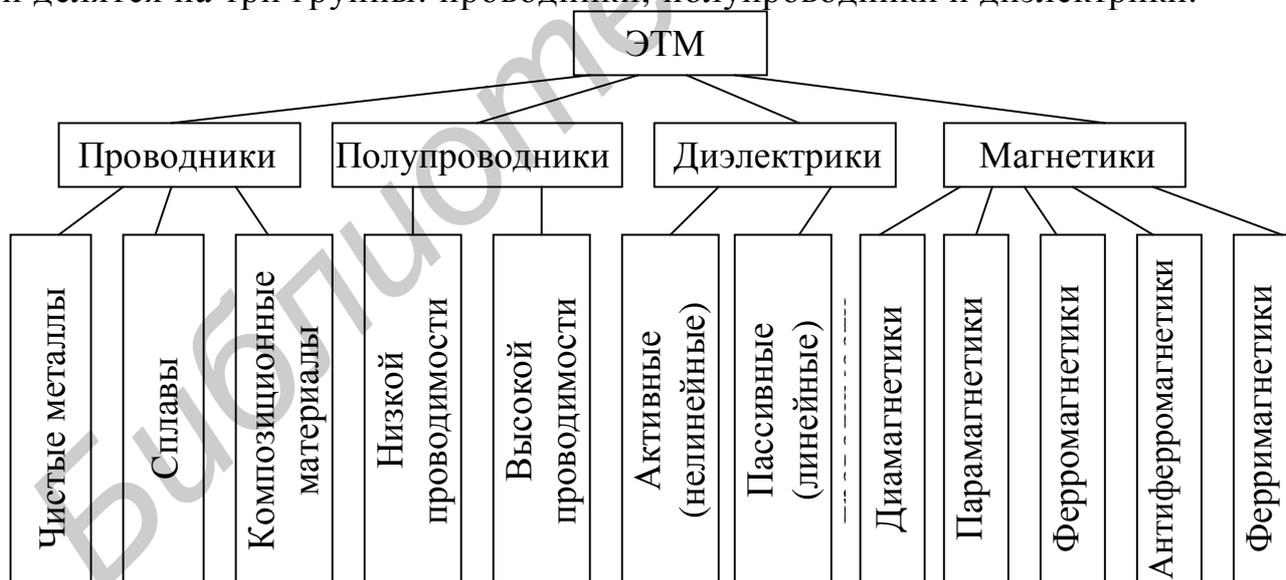


Рисунок 1.1 - Классификация ЭТМ на группы и подгруппы

По магнитным свойствам вещества делятся на пять групп: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

Каждая из названных групп в свою очередь подразделяется на подгруппы по количественным параметрам, характеризующим их основные свойства. Это позволяет представить классификацию радиоматериалов в виде обобщенной схемы (рисунок 1.1).

Для практического использования необходимо, чтобы в количественном отношении электрические или магнитные свойства были достаточно выражены, а механические, технологические и другие характеристики отвечали определенным требованиям. Поэтому не все из перечисленных групп одинаково широко используются в технике и не все будут рассмотрены в данном курсе.

1.2. Физико-химическая природа материалов

Все существующие в природе материалы независимо от их агрегатного состояния (газообразные, жидкие, твердые) построены из атомов более чем 100 химических элементов. Любое вещество (материал) состоит из огромного количества электрически заряженных частиц - электронов и атомных ядер химических элементов, которые и определяют его свойства. Принципиально возможно описать эти свойства с точки зрения квантово-механического взаимодействия заряженных частиц, составляющих вещество. Однако строгий подход к решению таких задач связан с весьма значительными математическими трудностями.

Существуют способы упрощенного анализа свойств материалов, позволяющих использовать часть макроскопических характеристик, полученных экспериментально. При этом наиболее существенные особенности взаимодействия между электронами и ядрами химических элементов, образующих вещество, учитываются интегрально или автоматически.

Одним из таких способов является анализ химических связей элементов вещества. Естественно, что различия типов веществ обусловлены различием в характере распределения электронов в атомах и молекулах и особенно в характере распределения наиболее удаленных от ядра валентных электронов и ионных атомных остовов. Сопоставляя между собой расположение атомов в структуре вещества, электронную конфигурацию этих атомов, тип химической связи между ними, можно ответить на ряд важных вопросов о макроскопических свойствах материала, таких, как электропроводность, способность к намагничиванию, плотность, твердость, пластичность, температура плавления и т.д.

Наиболее важным в данном подходе к анализу свойств материалов является вопрос о силах связи, удерживающих атомы вместе. Эти силы почти полностью являются силами электростатического взаимодействия между электронами и ядрами атомов. Роль сил магнитного происхождения весьма незначительна, а гравитационными силами, из-за малых значений масс взаимодействующих частиц, можно пренебречь. Существование стабильных связей между атомами вещества предполагает, что полная энергия E_n^V N частиц в объеме V вещества в виде суммы кинетической E_k и потенциальной U_n $E_n^V = N(E_k^V + U_n^V)$ меньше суммарной энергии этого же количества частиц вне объема, т.е. в свободном состоянии $E_n^c = N(E_k^c + U_n^c)$. Разность этих энергий $E_n^c - E_n^V = E_{св}$ называется энергией химической связи или просто *энергией связи*.

Экспериментально установлено, что электрофизические и механические свойства вещества или материала определяются характером связи и количественным значением энергии связи $E_{св}$.

По характеру взаимодействия между частицами, составляющими вещество, различают шесть типов химической связи:

- ковалентную неполярную;
- ковалентную полярную, или гомеополярную;
- ионную, или гетерополярную;
- донорно-акцепторную;
- металлическую;
- межмолекулярную.

Ковалентная неполярная связь возникает при объединении одноименных атомов в молекулы, например, H_2 , O_2 , Cl_2 , N_2 , алмаз, сера, Si , Ge и т.д. При этом происходит обобществление валентных электронов, что приводит к дополнению внешней электронной оболочки до устойчивого состояния. Молекулы с ковалентной неполярной связью имеют симметричное строение, т.е. центры положительного и отрицательного зарядов совпадают. В результате электрический момент молекулы равен нулю, т.е. молекула - неполярная или нейтральная.

Следует напомнить, что электрический момент, отличный от нуля, характерен для дипольных молекул. Они представляют собой систему из двух одинаковых по величине и разноименных по знаку электрических зарядов q , расположенных на некотором расстоянии l друг от друга. Для такой системы зарядов или молекулы электрический или дипольный момент равен $\mu = ql$.

Ковалентная неполярная связь характерна для диэлектриков и полупроводников.

Ковалентная полярная (гомеополярная или парноэлектронная) связь возникает при объединении разноименных атомов, например, H_2O , CH_4 , CH_3Cl , CCl_4 и т.д. При этом также происходит обобществление пар валентных электронов и дополнение внешней оболочки до устойчивого состояния. Однако каждая связь имеет дипольный момент. Тем не менее, молекула в целом может быть нейтральной или полярной (рисунок 1.2).

Соединения с гомеополярной связью могут быть диэлектриками (полимерные органические материалы) и полупроводниками.

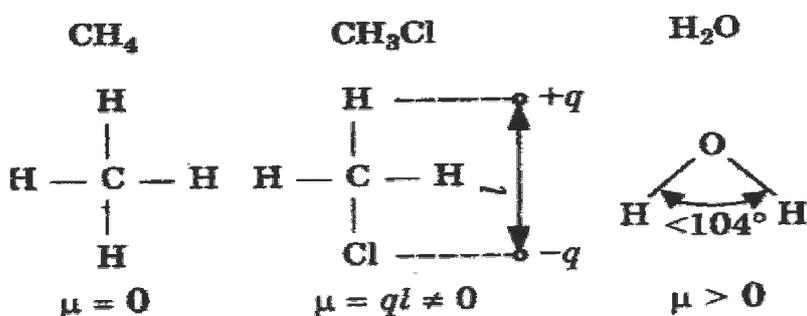


Рисунок 1.2 - Структуры молекул с гомеополярной связью

Ионная (гетерополярная) связь возникает при образовании молекулы элементами, находящимися в конце (VII группа) и начале (I группа) таблицы

Д.И.Менделеева, например $NaCl$. При этом валентный электрон металла, слабо связанный с атомом, переходит к атому галогена, достраивая его орбиту до устойчивого состояния (8 электронов). В результате образуются два иона, между которыми действуют силы электростатического притяжения.

Ионные силы взаимодействия достаточно велики, поэтому вещества с ионной связью имеют сравнительно высокую механическую прочность, температуру плавления и испарения. Ионная связь характерна для диэлектриков.

Донорно-акцепторная связь по сути своей является разновидностью ионной связи и возникает при образовании материала элементами различных групп таблицы Д.И.Менделеева, например, соединения $A^{III}B^V$ - $GaAs$ и т.д.; соединения $A^{II}B^V$ - ZnS , $CdTe$ и т.д. В таких соединениях атом одного элемента, называемый донором, отдает электрон другому атому, называемому акцептором. В результате возникает донорно-акцепторная химическая связь, являющаяся достаточно прочной. Материалы с такой связью могут быть диэлектриками и полупроводниками.

Металлическая связь возникает между атомами в металлах и является следствием обобществления всех валентных электронов, образующих электронный газ и компенсирующих заряд ионов кристаллической решетки. Благодаря взаимодействию электронного газа и ионов возникает металлическая связь. Обобществленные электроны слабо связаны с атомными остовами и с энергетической точки зрения являются свободными. Поэтому уже при очень слабых внешних электрических полях проявляется высокая электропроводность металлов.

Межмолекулярная или остаточная связь характерна для веществ органического происхождения, например, парафина. Она возникает между молекулами вещества и является слабой, за счет чего такие материалы имеют низкую температуру плавления и механические характеристики, свидетельствующие о непрочности молекулярной структуры вещества.

Следует отметить, что обычно атомы в твердом теле не связаны каким-либо одним из рассмотренных видов связи. Поэтому свойства веществ и материалов на их основе удобнее рассматривать и оценивать, анализируя энергетический спектр электронов атомов, составляющих вещество.

1.3. Энергетический спектр электронов и деление веществ на классы

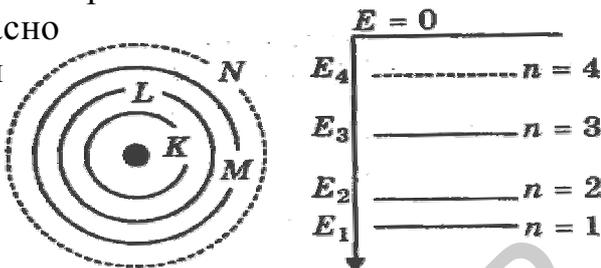
Под термином *энергетический спектр* понимают шкалу количественных значений энергии электронов атомов данного вещества.

Физическое состояние электронов в атоме определяется четырьмя квантовыми числами: n , l , m , s . Согласно планетарной модели атома, электроны вращаются вокруг ядра по определенным орбитам - электронным оболочкам, которые принято обозначать K , L , M , N и т.д. в зависимости от значения главного квантового числа $n = 1, 2, 3, \dots$. Ближайшая к ядру оболочка K соответствует значению $n = 1$. Следующая L -оболочка соответствует $n = 2$ и т.д. В свою очередь, оболочки состоят из подоболочек, обозначаемых s , p , d , f соответственно

значениям орбитального квантового числа l , принимающего целочисленные значения, т.е. $l = 0, 1, 2 \dots (n-1)$.

Следовательно, с энергетической точки зрения электроны данной оболочки имеют близкие, но неодинаковые значения энергии.

В изолированных атомах, согласно первому постулату Бора, электроны вращаются по строго определенным орбитам и имеют дискретные значения энергии $E_1, E_2 \dots E_n$. Их принято называть энергетическими уровнями (рисунок



1.3).

Рисунок 1.3 – Оболочки и энергетический спектр электронов изолированного атома

Для наиболее удаленных от ядра валентных электронов существуют орбиты и, соответственно, энергетические уровни (E_4), на которые могут переходить электроны, находящиеся в возбужденном состоянии за счет поглощения внешней энергии

Энергетические уровни отделены друг от друга достаточно широкими энергетическими интервалами $\Delta E_1 = E_2 - E_1$ и т.д. Электроны данного атома не могут иметь значения энергии внутри интервала. Согласно второму постулату Н.Бора они могут переходить с одного уровня (орбиты) на другой скачком изменяя энергию на ширину энергетического интервала между уровнями.

Таким образом, энергетический спектр электронов изолированного атома имеет дискретный характер. Он представляет собой вполне определенный для данного вещества набор энергетических уровней. Расчеты показывают, что точность определения численного значения энергии валентных электронов составляет величину порядка $\pm 10^{-7}$ эВ. Это очень высокая точность, что и позволяет подтвердить дискретный характер энергетического спектра электронов изолированного атома.

Для понимания, как образуется энергетический спектр электронов в твердом теле, рассмотрим упрощенную модель формирования твердого тела из изолированных атомов вещества (рисунок 1.4).

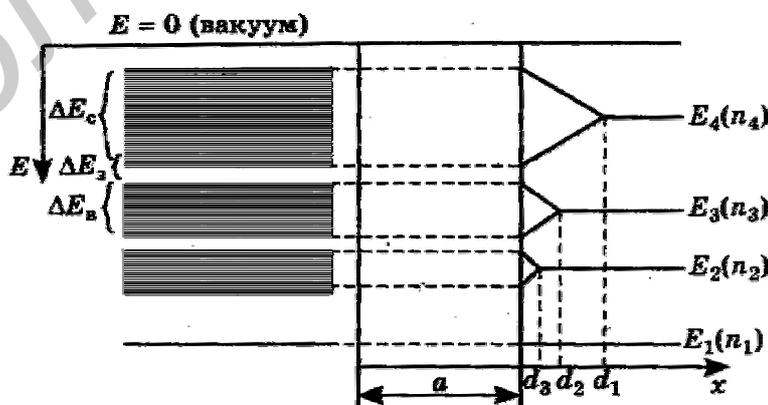


Рисунок 1.4 - Возникновение энергетических зон для электронов при образовании вещества из изолированных атомов:

n_1, n_2, \dots - главные квантовые числа энергетических состояний (уровней) электронов изолированного атома; a - расстояние между атомами в веществе или постоянная кристаллической решетки; d_1, d_2, \dots - расстояния, при сближении на которые начинается

перекрывание орбит электронов соседних атомов; ΔE_C - свободная, т.е. не заполненная электронами, энергетическая зона при отсутствии возбуждения ($T = 0$ К); ΔE_3 - зона запрещенных значений энергий для валентных электронов данного вещества; ΔE_B - энергетическая зона валентных электронов

При сближении атомов на расстояния соответствующие образованию твердого тела, между атомами возникают силы связи, приводящие к перекрыванию орбит (волновых функций) электронов. В результате изменяются энергетические состояния электронов изолированных атомов. Вместо дискретных уровней образуются энергетические зоны, состоящие из очень близко расположенных (порядка 10^{-22} эВ) энергетических уровней. На расстоянии d_1 начинают расщепляться уровни E_4 , разрешенные для электронов в возбужденном состоянии. Затем по мере сближения ($d_2, d_3 \dots$) расщепляются энергетические уровни валентных электронов (E_3) и электронов на более низких уровнях.

На расстоянии 'а' устанавливается устойчивое состояние атомов в твердом теле. В этом состоянии атомов энергетический спектр электронов представляет собой чередование разрешенных и запрещенных энергетических зон.

Таким образом, *в твердом теле энергетический спектр электронов имеет зонный характер*, в отличие от дискретного энергетического спектра электронов изолированных атомов.

Вид энергетического спектра электронов был обоснован квантовой теорией твердого тела. По полученным результатам ее принято называть зонной теорией твердого тела.

Расчеты показывают, что ширина разрешенной зоны для возбужденных электронов составляет величину порядка 1 эВ. Следовательно, дискретный уровень (E_4), определенный с точностью $\pm 10^{-7}$ эВ превратился в достаточно широкую разрешенную зону. При отсутствии внешних возбуждений, в частности при $T = 0$ К, в этой зоне электронов нет. Поэтому ее принято называть *свободной зоной*. При наличии внешних возбуждений она частично заполнена электронами. Они слабо связаны с атомами вещества, являются свободными и при приложении внешнего электрического поля обеспечивают протекание тока, т.е. электропроводность вещества. По этой причине свободную зону часто называют *зоной проводимости*.

Разрешенные энергетические зоны содержат такое число близко расположенных энергетических уровней, сколько атомов в единице объема данного вещества с учетом количества электронов на данной орбите и составляет величину порядка ($10^{22} \dots 10^{23}$) см⁻³. Количество разрешенных энергетических зон равно или меньше количество дискретных энергетических уровней (орбит) электронов в изолированном атоме.

По виду энергетического спектра вещества можно оценить или предсказать его электрофизические свойства, наблюдаемые экспериментально. Однако, для этих целей достаточно рассматривать только часть энергетического спектра, которую принято называть энергетической диаграммой. Она включает зону валентных электронов, запрещенную зону, если таковая имеется, и свободную зону.

Такой подход правомерен и связан с тем, что электроны, расположенные на внутренних орбитах, наиболее близко к ядру атома, с одной стороны сильно

связаны с ядром, а с другой - экранированы электронами внешних оболочек от взаимодействия с ядрами и электронами соседних атомов. Поэтому глубоко лежащие электроны либо образуют очень узкие зоны (уровень n_2), либо вообще их не образуют (уровень n_1). И, хотя уровни и зоны, соответствующие этим электронам, являются частью общего энергетического спектра, фактически они не влияют на макроскопические свойства веществ. Поэтому глубокие уровни и зоны не рассматриваются и не изображаются на энергетической диаграмме.

Валентные электроны наиболее сильно взаимодействуют между собой. При образовании вещества их орбиты (уровень n_3) значительно перекрываются, в том числе перекрываются орбиты (уровень n_4), разрешенные для электронов, находящихся в возбужденном состоянии. Поскольку свойства веществ определяются валентностью, наибольший интерес представляют энергетическая зона валентных электронов и свободная зона, куда могут перейти валентные электроны в случае внешнего возбуждения.

Если в единичном объеме вещества (кристалла) содержится N одновалентных атомов, то валентная зона состоит из N близко расположенных энергетических уровней, на которых могут находиться, согласно принципу Паули, $2N$ электронов. Таким образом, у материала из одновалентных атомов валентная зона заполнена наполовину.

Свободная и валентная зоны могут перекрываться (рисунок 1.5,а), что характерно для металлов. Когда зоны не перекрываются, между ними образуется зона запрещенных энергий для электронов, называемая запрещенной зоной, от величины (ΔE_z) которой существенно зависят свойства материалов (рисунок 1.5,б,в).

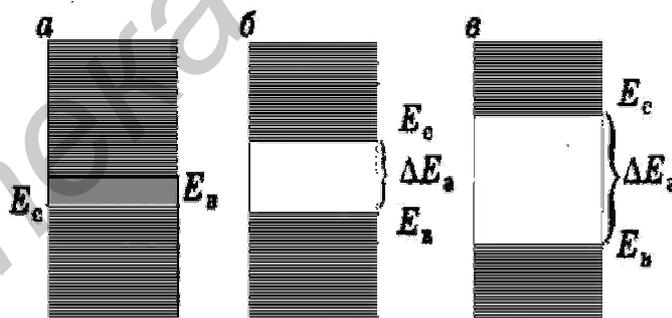


Рисунок 1.5 - Энергетические диаграммы:
а - металлов; б – полупроводников;
в - диэлектриков

Таким образом, согласно зонной теории твердого тела, по виду энергетической диаграммы можно разделить вещества по электропроводности на три класса: проводники, полупроводники, диэлектрики.

Проводниками являются материалы (металлы), у которых свободная и валентная зоны перекрываются, благодаря чему электроны валентной зоны могут беспрепятственно переходить на незанятые уровни свободной зоны под действием очень слабых внешних электрических полей и обеспечивать тем самым высокую электропроводность.

Полупроводниками являются материалы с узкой запрещенной зоной (ΔE_z менее 3 эВ), которая может быть преодолена электронами валентной зоны за счет внешних энергетических воздействий (температуры T , напряженности внешнего электрического поля E , энергии электромагнитного излучения $h\nu$) и, таким образом, возможно возникновение электропроводности.

Диэлектриками являются такие материалы, у которых запрещенная зона очень велика (ΔE_z до 8 эВ) и валентные электроны не могут ее преодолеть, поэтому электропроводность в диэлектриках не наблюдается.

При $T = 0$ К свободная зона полупроводников и диэлектриков не содержит электронов. Валентная зона частично или полностью заполнена электронами. Однако, они прочно связаны с атомами вещества, т.е. не являются свободными и не могут участвовать в обеспечении электропроводности. Следовательно, при $T = 0$ К полупроводники являются диэлектриками.

При нормальных условиях ($T \approx 300$ К) внешняя тепловая энергия передается электронам валентной зоны, и, если она достаточна для преодоления запрещенной зоны, а фактически — для разрыва связи между атомами и валентными электронами, последние переходят в свободную зону и обеспечивают электропроводность вещества. Это характерно для полупроводников с узкой запрещенной зоной. С увеличением температуры количество свободных электронов увеличивается и растет электропроводность.

Таким образом, различие между металлом и полупроводником стирается с ростом температуры, а различие между полупроводником и диэлектриком - с понижением температуры.

Способность веществ проводить электрический ток, т.е. обладать электропроводностью, можно количественно оценить по значению внешней энергии возбуждения электропроводности ($E_{\text{воз}}$). Эта энергия близка к нулю у металлов. Для полупроводников численное значение $E_{\text{воз}}$ определяется шириной запрещенной зоны и растет по мере ее увеличения. При значительном увеличении $E_{\text{воз}}$ полупроводники переходят в класс диэлектриков.

Таким образом, по величине энергии возбуждения электропроводности $E_{\text{воз}}$ или энергии активации проводимости все вещества можно расположить в единый ряд от хорошо проводящих металлов ($E_{\text{воз}}$ мало) до хороших диэлектриков, практически не обладающих электропроводностью ($E_{\text{воз}}$ велико).

Существует достаточно условное деление веществ на классы по численному значению удельного объемного сопротивления измеряемого в [Ом·м]. Диапазоны значений удельных сопротивлений следующие:

проводники - $10^{-8} \dots 10^{-5}$;

полупроводники - $10^{-6} \dots 10^9$;

диэлектрики - $10^7 \dots 10^{17}$.

Следует отметить, что величина удельного сопротивления не является бесспорным признаком принадлежности материала к одному из указанных классов. Вещество одного и того же химического состава при фазовых переходах и изменении внешних условий может переходить из одного класса электропроводности в другой. Так металлы в твердом и жидком состоянии - типичные проводники, а в газообразном - диэлектрики. Кристаллический германий - полупроводник, при температурах, близких к нулю, - диэлектрик, а в расплавленном состоянии обладает металлической электропроводностью. Углерод в модификации алмаза - диэлектрик, а в модификации графита - проводник.

Все это свидетельствует о многообразии подходов к определению свойств и классификации электротехнических материалов.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электротехнических материалов.
2. Каков характер энергетического спектра электронов в твёрдых телах?
3. Почему при анализе свойств веществ рассматривается не весь, а только часть энергетического спектра электронов в твердом теле?
4. Нарисуйте энергетические диаграммы основных классов материалов.
5. На какие классы делятся материалы по отношению к электромагнитному полю?
6. В чём отличие энергетических диаграмм проводников, полупроводников и диэлектриков?

Глава 2 ПРОВОДНИКИ

2.1. Свойства и количественные параметры проводников

Проводник - вещество, основным электрическим свойством которого является электропроводность.

Проводники являются наиболее широко применяемыми в технике материалами. Из них изготавливают обмоточные и монтажные провода, силовые кабели и линии электропередач, кабели радио, телефонно-телеграфной связи, проводящие дорожки печатных плат и интегральных схем, конструкционные детали приборов и устройств и т.п. Столь широкие области применения проводниковых материалов предполагают различные варианты их классификации. С точки зрения материаловедения общая классификация представлена на рисунке 1.1.

Существует также классификация по смешанным признакам:

чистые металлы;

сплавы (высокого сопротивления, для термопар, припой);

тугоплавкие металлы с температурой плавления выше 1700 °С

благородные металлы.

Для электротехнического применения целесообразно проводниковые материалы подразделить на следующие группы:

материалы с высокой проводимостью;

материалы с высоким удельным сопротивлением;

металлы и сплавы различного назначения;

материалы на основе углерода и его модификаций;

сверхпроводниковые материалы.

По агрегатному состоянию проводники могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Твердыми проводниками являются металлы и некоторые модификации углерода. К жидким относятся ртуть, расплавленные металлы и электролиты - водные растворы кислот, щелочей и солей, которые обладают электропроводностью.

Пары и газы при низких напряжениях не являются проводниками, однако, при больших внешних полях они становятся проводниками за счет ударной

ионизации. Газовая среда при равенстве в единице объема электронов и ионов называется плазмой.

Электрофизические, а также механические свойства проводников весьма разнообразны и характеризуются широким набором параметров:

- удельная проводимость или удельное сопротивление;
- температурный коэффициент удельного сопротивления;
- температурный коэффициент линейного расширения;
- работа выхода;
- теплоемкость;
- удельная теплопроводность;
- температура плавления;
- плотность;
- пределы прочности при сжатии, растяжении, изгибе;
- относительное удлинение при разрыве;

При использовании проводников для решения различных задач в области радиотехники и электроники любой из перечисленных параметров может оказаться наиболее значимым. Однако основными параметрами проводниковых материалов являются первые четыре.

Удельная проводимость σ является количественной характеристикой способности проводить электрический ток, т.е. электропроводности вещества. Величина $\rho = 1/\sigma$, обратная удельной проводимости, называется удельным сопротивлением и определяется выражением

$$\rho = RS/l, \quad (2.1)$$

где R - сопротивление, [Ом]; S - поперечное сечение, [м²]; l - длина проводника, [м].

В системе СИ размерность ρ - [Ом·м]. Часто используют внесистемную единицу [Ом·мм²/м]. Связь между ними определяется соотношением

$$1 \text{ [Ом·м]} = 10^6 \text{ [мкОм·м]} = 10^6 \text{ [Ом·мм}^2\text{/м]}.$$

Диапазон значений ρ для металлов достаточно узок и составляет всего около трех порядков: от $1,6 \cdot 10^{-8}$ [Ом·м] для серебра до $6 \cdot 10^{-5}$ [Ом·м] для материалов на основе углерода.

Температурный коэффициент удельного сопротивления TK_ρ характеризует изменение сопротивления материала при изменении температуры. У металлов с ростом температуры сопротивление увеличивается вследствие уменьшения подвижности электронов за счет рассеяния на тепловых колебаниях решетки. Количественной мерой изменения удельного сопротивления при изменении температуры является TK_ρ . Он показывает, относительное изменение удельного сопротивления ρ при изменении температуры на один градус.

Математически TK_ρ определяется выражением

$$TK_r = \frac{1}{r} \frac{dr}{dT} [K^{-1}] \quad (2.2)$$

Он может быть как положительным для чистых металлов, так и отрицательным для некоторых сплавов. Для металлов TK_ρ находится в пределах $(2-6) \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

Температурный коэффициент линейного расширения α_l характеризует изменение линейных размеров образца материала при изменении температуры. Этот коэффициент необходимо особенно учитывать в случаях совместной или сопряженной работы различных материалов, например, металл-стекло, металл-керамика и т.д. Количественные значения α_l контактирующих материалов должны быть близки, чтобы не возникали недопустимые напряжения на стыках, в спаях и т.п., приводящие к разрушению одного из материалов. Величина α_l ; определяется выражением

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} [K^{-1}] \quad (2.3)$$

которое показывает относительное изменение линейного размера (длина) образца материала при изменении температуры на один градус.

Численные значения α_l металлов колеблются в широких пределах, от $4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ (для вольфрама) до $182 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ для ртути.

Работа выхода ϕ численно равна энергии, необходимой для удаления электрона из вещества в вакуум без сообщения ему кинетической энергии. На энергетической диаграмме вещества работа выхода ϕ представляет собой энергетический интервал между уровнем вакуума и уровнем Ферми (E_F) (рисунок 2.1,а). Уровень Ферми, или энергия Ферми, есть максимально возможная энергия электронов в металле при температуре абсолютного нуля. В металлах при $T = 0 K$ E_F совпадает с потолком валентной зоны. В полупроводниках E_F находится в запрещенной зоне (рисунок 2.1,б) и поэтому является условным уровнем, удобным для описания свойств и расчета количественных параметров полупроводников. Тем не менее, принято считать, что уровень Ферми есть энергетический уровень, вероятность заполнения которого электронами при температуре, отличной от абсолютного нуля, равна $1/2$.

Работа выхода и ее количественное значение является наиболее важным параметром в

случае контакта различных веществ, например, металл-металл (М-М), металл-полупроводник (М-П), полупроводник-полупроводник (П-П) и т.д. За счет разных значений работ выхода для электронов в месте контакта возникает контактная разность потенциалов, определяющая прохождение тока через этот контакт. В случае проводящего контакта М—М возникновение разности потенциалов — явление вредное, а для создания термопар необходима наибольшая разница значений работ выхода контактирующих металлов. Для других типов контактов работы выхода контактирующих материалов и соотношения между ними определяют физические принципы работы приборов и устройств, использующих контакты.

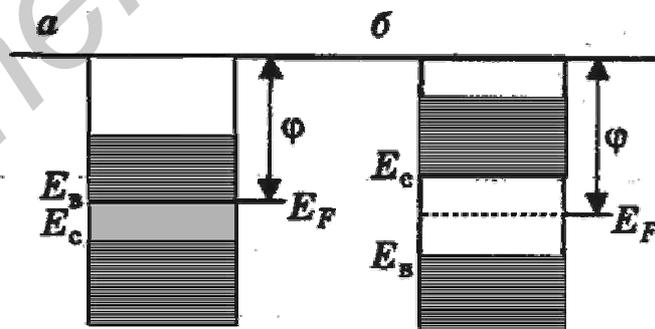


Рисунок 2.1 - Энергетические диаграммы материалов, граничащих с вакуумом: а – металла; б - полупроводника

Таким образом, работа выхода является одним из основных параметров проводниковых и полупроводниковых материалов и должна учитываться при создании и анализе работы различных приборов и устройств.

2.2. Материалы с высокой проводимостью.

К ним относятся медь, алюминий, никель, серебро и золото. Основные параметры этих материалов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1
Количественные параметры материалов с высокой проводимостью

Материал	Удельное сопротивление $\rho \times 10^6$ Ом·м	Температурный коэффициент TK_p K ⁻¹	Температурный коэффициент $\alpha_l \times 10^6$ K ⁻¹	Работа выхода φ , эВ	Температура плавления $T_{пл}$, °C
Медь	0,0172	0,0043	16	4,3	1083
Алюминий	0,028	0,0042	24	4,3	657
Никель	0,073	0,0065	13	5,0	1455
Серебро	0,016	0,0040	19	4,4	961
Золото	0,024	0,0038	14	4,8	1063

Медь занимает первое место по применимости среди проводниковых материалов. Она характеризуется высокой электропроводностью и пластичностью, хорошо обрабатывается, легко паяется и сваривается. В процессе получения меди выплавкой из природных руд обязательной операцией является электролитическая очистка, поскольку наличие примесей различных элементов до 0,1% резко снижает механические свойства и повышает удельное сопротивление материала.

Различают мягкую медь (ММ), отожженную при температуре до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, и твердую медь (МТ), неотожженную, получаемую холодной прокаткой, которая по механическим свойствам – пределу прочности, относительному удлинению, твердости и упругости превосходит медь марки ММ. Мягкую медь с изоляцией применяют в основном для изготовления токопроводящих шин, кабелей, обмоточных и монтажных проводов, где важна гибкость и пластичность, а не прочность. Круглая медная проволока выпускается диаметром от 0,03 до 10 мм. Твердую медь используют, когда необходимо обеспечить механическую прочность, твердость и сопротивление истиранию. Из нее изготавливают провода для воздушных линий, шины электроаппаратов, распределительных силовых щитов, коллекторов электрических машин, где изделия находятся, как правило, в неизолированном виде, а также в качестве конструкционного материала в электро- и радиоаппаратуре.

Специальные сорта меди - бескислородная, электровакуумная - применяют в электровакуумной технике и микроэлектронике.

Основными недостатками меди являются подверженность атмосферной коррозии, низкое сопротивление истиранию и снижение механической прочности при нагреве свыше 100...200 °С. Устранить эти недостатки позволяют сплавы на основе меди, называемые бронзами и латунями.

Бронзы - это сплавы меди с оловом, алюминием, с легирующими добавками химических элементов *Si, Mn, P, Cr, Be, Cd* и т.д. Их применяют для изготовления токоведущих пружин, штепсельных и скользящих контактов, зажимов, ножей переключателей и выключателей и т.д.

Латуни - это сплавы меди с цинком (до 40%) с использованием легирующих добавок типа *Al, Ni, Pb* и др. Из латуней изготавливают зажимы и контакты приборов, а вытяжкой и штамповкой - сложные конструкционные изделия.

Алюминий является вторым после меди материалом по применяемости в электротехнике. Основное преимущество его перед медью состоит в том, что он почти в 3,5 раза легче. Однако его сопротивление почти в 1,6 раза больше, чем у меди, поэтому для изготовления провода такого же сопротивления, как медный, требуется увеличивать диаметр в 1,3 раза, что при ограничении габаритов изделия не всегда возможно.

Алюминий на воздухе покрывается тонкой пленкой оксида Al_2O_3 , которая является антикоррозийной защитой. Поэтому его используют для замены свинца в защитных кабельных оболочках. С другой стороны, при соединениях алюминиевых проводов образуются большие переходные сопротивления, а пленка Al_2O_3 препятствует пайке и сварке.

Из алюминия изготавливают провода, шины, трубки, листовые материалы, фольгу и прочие изделия. Проволока выпускается диаметром от 0,06 до 8 мм, а шины - толщиной от 3 до 12 мм при ширине от 10 до 120 мм. Алюминиевая фольга толщиной от 0,006 до 0,15 мм используется в качестве обкладок в бумажных и пленочных конденсаторах разных типов.

Алюминий широко применяется в микроэлектронике для формирования токоведущих дорожек, а в окисленном виде - для изоляции элементов и в качестве межуровневой изоляции в многослойных структурах.

Никель обладает хорошими механическими свойствами - прочностью, пластичностью и т.п., стоек к окислению. Поэтому его широко применяют в электровакуумной технике в качестве электродов и конструкционных деталей ламп и приборов. Кроме того, его используют в качестве компонента ряда магнитных и проводниковых сплавов, для защиты и декоративных покрытий изделий из железа. В микроэлектронике он применяется при формировании контактных площадок как защитный слой на меди и алюминии, что обеспечивает надежную пайку и сварку внешних выводов микросхем.

Серебро среди металлов имеет наименьшее удельное сопротивление, что и определило его широкое применение в технике. Оно обладает высокой пластичностью, что позволяет получать фольгу толщиной 0,00025 мм и проволоку диаметром до 0,01 мм. Благодаря стойкости к окислению на воздухе при температурах до 200 °С и высокой теплопроводности оно используется в сплавах с кадмием и медью для контактов электроаппаратов, реле и т.д. В чистом виде серебро применяют для контактов в слаботочных цепях, а также в качестве электродов в керамических и слюдяных конденсаторах, где оно

наносится непосредственно на диэлектрик с последующим вжиганием либо путем испарения в вакууме. В виде тонких пленок серебро используется в высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройствах для получения слоев с высокой проводимостью. Оно входит также в состав припоев, обеспечивающих прочные соединения при пайке.

Золото обладает высокой пластичностью и инертностью к агрессивным средам, поэтому используется как контактный материал, для коррозионно-устойчивых покрытий, электродов фотоэлементов и т.д. В микроэлектронике его применяют в качестве выводов навесных компонентов микросхем и соединений контактных площадок с выводами на корпусе микросхем, а также в качестве химически инертного защитного слоя элементов интегральных схем (ИС).

2.3. Материалы с высоким удельным сопротивлением

К материалам данной группы относятся сплавы на основе меди - манганин, константан; на основе тройных сплавов *Fe-Cr-Ac* – фехраль и хромаль, а на основе *Ni-Cr-Fe*-нихром. Они предназначены для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т.д.

Основными параметрами этих материалов являются удельное сопротивление и его температурный коэффициент, а также предельная температура ($T_{пред}$), при которой электронагревательный элемент может длительно работать на воздухе без изменения своих свойств. Количественные параметры наиболее употребляемых материалов приведены в табл.2.2.

Манганин выпускается в виде проволоки диаметром от 0,02 до 1 мм и применяется для изготовления проволочных сопротивлений и в электроизмерительной технике. Достоинство его - слабая зависимость сопротивления от температуры, что необходимо для обеспечения постоянства сопротивления в электроизмерительных устройствах. Кроме того, манганин имеет малое значение термо-э.д.с. в контакте с медью, благодаря чему снижается погрешность при точных измерениях. Манганиновая проволока выпускается также с эмалевой и шелковой изоляцией и применяется для изготовления образцовых сопротивлений.

Константан обладает весьма малой величиной температурного коэффициента сопротивления, часто принимаемой равной нулю. Однако в паре с медью он создает большую термо-э.д.с, что не позволяет использовать его в точных сопротивлениях и электроизмерительных приборах. Константановая проволока используется для изготовления реостатов и термопар. Образование на поверхности проволоки под действием температуры сплошной оксидной пленки позволяет использовать ее в качестве естественной изоляции между витками в реостатах.

Константановая проволока выпускается также с эмалевой, эмалево-шелковой и эмалево-хлопчатобумажной изоляцией.

Нихром и фехраль являются жаростойкими материалами, применяемыми в электронагревательных приборах и печах, где необходима длительная работа при температурах от 800 до 1200 °С, что обеспечивается стойкостью к окислению при высоких температурах. В процессе работы на поверхности проволоки или ленты образуется плотная защитная оксидная пленка,

предохраняющая материал от дальнейшего окисления и разрушения. Для повышения длительности работы электронагревательных элементов жаростойкий материал помещают в трубку из металла, стойкого к окислению, и заполняют промежуток между проволокой и трубкой диэлектриком с высокой теплопроводностью (MgO). За счет дополнительной протяжки трубки ее внешний диаметр уменьшается, а диэлектрик уплотняется, образуя прочную изоляцию проводника высокого сопротивления. Таким методом изготавливают теплонагревательные элементы печей, элементы бытовых приборов (утюгов, кипятильников).

Таблица 2.2

Количественные параметры материалов с высоким удельным сопротивлением

Материал, состав	Удельное сопротивление $\rho, \times 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Температурный коэффициент $\text{TK}\rho, \text{ K}^{-1}$	Предельная температура $T_{\text{пред}}, \text{ }^\circ\text{C}$
Манганин: $Cu - 33...86\%$; $Mn - 67...12\%$; Добавки Fe, Al	0,4...1,88	$\pm 4 \cdot 10^{-5} \dots 4 \cdot 10^{-6}$	200
Константан: $Cu - 55...60\%$ $Ni - 45...40\%$	0,48...0,52	$-5 \cdot 10^{-6}$	450
Нейзильбер: $Cu - 65\%$ $Ni - 15\%$ $Zn - 20\%$	0,28...0,35	$3 \cdot 10^{-4}$	150
Никелин: $Cu - 62\%$ $Ni - 18\%$ $Zn - 20\%$	0,39...0,45	$2 \cdot 10^{-5}$	150
Нихром: $Ni - 55...80\%$ $Cr - 15...25\%$ Добавки Ti, Fe	1,02...1,36	$9...12 \cdot 10^{-5}$	900...1100
Фехраль: $Cr - 12...27\%$ $Al - 0,6\%$ $Fe - \text{остальное}$	1,2...1,5	$5...15 \cdot 10^{-5}$	800...1200
Хромаль: $Cr - 13...27\%$ $Al - 4...5\%$ $Fe - \text{остальное}$	1,37...1,47	$(1,3...15) \cdot 10^{-5}$	750...1400

Недостатком рассматриваемых материалов является повышенная хрупкость и твердость, зависящая от процентного содержания хрома и железа. Поэтому проволоку диаметром от 0,01 до 0,2 мм изготавливают из сплава с содержанием хрома менее 20%. Проволоку диаметром больше 0,2 мм и ленты толщиной

более 0,2 мм изготавливают из нихромов других марок или из фехралей. Проволоку и ленты больших сечений используют в электронагревательных устройствах большой мощности и промышленных электронагревательных печах.

2.4. Резистивные материалы

Для изготовления как дискретных, так и интегральных резисторов применяется достаточно широкий круг материалов. Обычно их используют в пленочном исполнении. Для этой цели применяют пленки тугоплавких металлов (Ta , Cr , Re); высокорезистивные сплавы (манганин, константен, нихром); кремнийсодержащие сплавы ($Cr + Ni + Si$, $Cr + Fe + Si$) типа РС (резистивный сплав); многокомпонентные сплавы (Fe , Cr , Ni , Al , W , Si) типа МЛТ; двухкомпонентные сплавы и химические соединения ($Si - Cr$, $Si - Mo$); оксиды металлов (SnO_2); керметы - смеси порошков металлов (Cr , Ni , Fe) и оксидов (SiO_2 , TiO_2), являющих диэлектрической связкой частиц проводящего материала; композиционные смеси на основе серебра, палладия и их оксидов с органической или неорганической диэлектрической связкой; резистивные материалы на основе углерода и его модификаций.

Благодаря широкой номенклатуре и разнообразию свойств существующие резистивные материалы обеспечивают получение различных типов резисторов нужных номиналов с заданной точностью.

2.5. Материалы и сплавы различного назначения

К данной группе материалов в первую очередь относятся сплавы для термопар, применяемых для измерения температуры, и припои, предназначенные для соединения металлических частей путем пайки. Сюда же следует отнести ртуть, вольфрам, молибден и другие металлы (свинец, олово, цинк, платина, палладий) применяемые в технике благодаря их специфическим свойствам.

Материалы, применяемые для изготовления термопар, и их некоторые характеристики приведены в таблице 2.3. Из нее следует, что наибольшей термо-э.д.с. при данной разности температур обладает термопара хромель-копель, а наиболее высокие температуры можно измерять термопарой платинородий-платина.

Припои - это специальные сплавы, применяемые для создания механически прочного шва или получения электрического контакта с малым переходным сопротивлением. Обычно припои имеют значительно меньшую температуру плавления, нежели соединяемые металлы. Различают мягкие припои с температурой плавления ($T_{п}$) ниже 400 °С и твердые припои с $T_{п}$ выше 500 °С. Мягкие припои по пределу прочности при растяжении примерно в десять раз уступают твердым. Тип припоя выбирается исходя из рода спаиваемых металлов, требуемых механической прочности, коррозионной стойкости и т.д.

Пайка припоями осуществляется с применением флюсов, которые растворяют и удаляют оксиды, защищают в процессе пайки поверхность и припой от окисления, уменьшают поверхностное натяжение припоя и смачиваемость поверхности пайки, улучшают растекаемость припоя. С этой

целью используют активные (кислотные) флюсы; бескислотные - канифоль со спиртом или глицерином; активированные флюсы - канифоль с активизаторами и антикоррозийные флюсы на основе фосфорной кислоты; специальные флюсы для сварки и пайки алюминия.

Таблица 2.3

Сплавы для термопар и их характеристики

Материал, Состав	Контактный Материал	Предельная температура измерения $T_{из}$, °C	Термо-э.д.с. E	
			$\times 10^6$, В/К	$\times 10^3$, В/К, при $T_{из}$
Копель: $Cu - 56\%$; $Ni - 44\%$				
Алюмель: $Ni - 95\%$; $Al+Si+Mg - 5\%$				
Хромель: $Ni - 90\%$; $Cr - 10\%$	Копель Алюмель	600 1200	80 40	48 48
Платинородий: $Pt - 90\%$; $Rh - 10\%$	Платина	1700	8,8	15
Медь	Константан	500	50	25
	Копель	500	60	30
Железо	Константан	800	54	43
	Копель	800	62	50

Характеристики наиболее применяемых в технике припоев представлены в табл.2.4.

Таблица 2.4

Характеристики технических припоев

Тип припоя	Марка припоя	Состав припоя	Температура плавления $T_{п}$, °C	Материалы, соединяемые припоем
Припои оловянно-свинцовые	От ПОС-18 до ПОС-90	$Sn - 18...90\%$; $Sb - 0,15...2,5\%$; $Pb - \text{остальное}$	190...277	Медь и ее сплавы, оцинкованное железо
Припои оловянно-свинцово-кадмиевые	ПОСК-47	$Sn - 47...50\%$; $Pb - 32...36\%$; $Cd - 17...18\%$	145...180	Медь и ее сплавы, серебро
Припои оловянно-свинцово-серебряно-кадмиевые	ПСрК	$Sn - 30\%$; $Cd - 5\%$; $Pb - 63\%$; $Ag - 2\%$	225	Медь и ее сплавы, серебро

Припои оловянно-кадмиево-цинковые	$Sn - 40...55\%$ $Cd - 20\%$ $Zn - 25\%$ $Al - 15\%$	200...255	Алюминий и его сплавы
-----------------------------------	---	-----------	-----------------------

Ртуть - металл, находящийся в жидком состоянии при нормальной температуре. Широко применялся в ртутных выпрямителях большой мощности, газоразрядных приборах, осветительных лампах и ртутных реле. Ртуть стойка к окислению, имеет $\rho_v \approx 0,95 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и $TK_p = 9,9 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹. Пары ртути очень ядовиты, поэтому хранят ее в герметически закрытой фарфоровой или стеклянной таре.

Вольфрам, молибден — металлы с температурой плавления 3380 и 2690 °С, соответственно. Они обладают достаточно высоким удельным объемным сопротивлением, $\rho_v \approx 0,55 \cdot 10^{-6}$ и $0,048 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Эти качества и определили области их применения. Из них изготавливают спирали ламп накаливания, электроды и держатели электровакуумных приборов, а также контакты, обладающие высокой механической прочностью, способностью противостоять действию электродуги и применяемые в различных электроаппаратах.

Свинец обладает высокой коррозионной стойкостью. Поэтому его широко применяют в качестве оболочек кабелей. Из-за низкой температуры плавления ($T_p = 327$ °С) его используют для изготовления плавких предохранителей. Кроме того, свинец широко применяют в качестве пластин свинцовых аккумуляторов и защитных средств в рентгеновских установках, благодаря сильному поглощению ионизирующих излучений.

Олово используют в качестве защитных покрытий металлов благодаря способности не окисляться при нормальных температурах и стойкости к действию влаги. Из него изготавливают оловянно-свинцовую фольгу, применяемую в качестве обкладок конденсаторов. Олово входит в состав бронз и припоев. Диоксид олова благодаря высокой адгезии к керамике и стеклу и высокой прозрачности в видимой и ультрафиолетовой областях спектра широко применяется в электронике в качестве резисторов и проводящих покрытий в электровакуумных приборах, индикаторах, преобразователях изображения и т.д.

Цинк применяют в виде защитных покрытий (оцинкованное железо) для предохранения от коррозии. Он входит в состав латуней. Кроме того, из цинка изготавливают электроды гальванических элементов, используют его в фотоэлементах и для металлизации бумаги металлобумажных конденсаторов.

Платина и палладий, наряду с серебром и золотом, относятся к группе благородных металлов и используются в технике благодаря высокой химической стойкости. Наиболее широко применяют сплавы платины с иридием и палладия с серебром и медью в качестве контактных материалов, обеспечивающих высокую надежность контактов за счет высокой износостойкости и отсутствия окисления. Платина применяется также для изготовления термопар, работающих до 1600 °С. Палладий в смеси со стеклом и серебром используют в виде пасты для получения резисторов толсто пленочных микросхем.

2.6. Изделия и компоненты электроники на основе проводниковых материалов

Проводниковые материалы широко используются в различных приборах и устройствах РЭА. Особенностью их применения в изделиях и компонентах электроники является необходимость совместного использования с диэлектрическими материалами.

К основным областям применения проводниковых материалов следует отнести:

- конструкционные детали и изделия;
- провода и кабели различного назначения;
- в виде фольги в резисторах, конденсаторах и печатных платах;
- в виде тонких пленок в резисторах, конденсаторах и интегральных микросхемах.

Все возможные применения проводниковых материалов рассмотреть не представляется возможным.

Поскольку некоторые области применения уже упоминались в тексте, целесообразно остановиться только на наиболее важных изделиях из проводниковых материалов.

Обмоточные провода

Обмоточные провода предназначены для изготовления обмоток трансформаторов и электрических машин дросселей, реле, катушек индуктивности резонансных контуров и фильтров и т.д. Такие провода изготавливают в виде одной жилы круглого сечения с различным диаметром от 0,02 мм до 2,5 мм. Они могут иметь эмалевое покрытие (изоляцию), пленочное, покрытие из волокнистых материалов, либо комбинационное покрытие из эмали и волокнистых материалов.

Эмалевая изоляция имеет толщину (0,007...0,065) мм, что значительно меньше волокнистой и волокнисто-эмалевой. Это позволяет уменьшить объем обмотки, либо увеличить число витков в заданном объеме и тем самым увеличить мощность электрической машины или аппарата.

Обмоточные провода изготавливают из меди, алюминия и материалов с высоким удельным сопротивлением: константана, манганина и нихрома.

Наиболее распространенными получили медные обмоточные провода с эмалевой изоляцией типов:

- ПЭВ-1 – провод с эмалевой высокопрочной изоляцией в один слой;
- ПЭВ-2 – провод с эмалевой высокопрочной изоляцией с двумя слоями;
- ПЭТВ – провод с эмалевой теплостойкой высокопрочной изоляцией;
- ПЭЛ – провод с эмалевой лаковой изоляцией и т.д.

Алюминиевые обмоточные провода с эмалевой изоляцией маркируются аналогично:

- ПЭА – провод с эмалевой изоляцией, алюминиевый;
- ПЭВА – провод с эмалевой высокопрочной изоляцией, алюминиевый и т.д.

Примерами обмоточных проводов из материалов с высоким удельным сопротивлением материалов могут быть:

- ПЭВКМ-1 – провод с одним слоем эмалевой высокопрочной изоляцией, константановый, мягкий;

ПЭК – провод с лакостойкой эмалевой изоляцией, константановый;
ПЭВММ-1 – провод с одним слоем эмалевой высокопрочной изоляцией, манганиновый, мягкий;
ПЭММ – провод с лакостойкой эмалевой изоляцией манганиновый, мягкий;
ПЭВНХ-1 – провод с одним слоем эмалевой высокопрочной изоляцией нихромовый;
ПЭНХ – провод с лакостойкой эмалью нихромовый и т.д.

Важнейшими характеристиками обмоточных проводов с эмалевой изоляцией являются эластичность, нагревостойкость и электрическая прочность эмалевых покрытий.

Волокнистая, пленочная и комбинированная изоляция имеет толщину (0,05...0,17) мм. В качестве волокнистой изоляции применяется пряжа из различных материалов: хлопчатобумажная, шелковая, из капроновых, лавсановых, асбестовых и стеклянных волокон. Последние два вида пряжи подклеиваются к поверхности провода с помощью глифталевых и кремнийорганических лаков. Провода с таким видом изоляции обладают повышенной нагревостойкостью. Для изготовления обмоток трансформаторов с масляной изоляцией применяют провода покрытые бумажными лентами, которые хорошо пропитываются трансформаторным маслом. Благодаря этому обеспечивается высокая электрическая прочность изоляции обмоток трансформаторов.

Примерами обмоточных проводов из меди и алюминия с высокой изоляцией могут быть:

- ПБ – провод (медный), изолированный несколькими слоями кабельной бумаги;
- ПБО – провод, изолированный одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи;
- ПБД – провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи;
- АПБ – алюминиевый провод круглого или прямоугольного сечения, изолированный несколькими слоями обмотки из лент кабельной бумаги;
- АПБОО – алюминиевый провод круглого или прямоугольного сечения, изолированный обмоткой и оплеткой из хлопчатобумажной ткани и т.д.

Кроме медных и алюминиевых проводов с волокнистой изоляцией, выпускают обмоточные провода из материалов с высоким удельным сопротивлением с такими же видами изоляции.

Монтажные провода

Монтажные провода применяют для электрического соединения деталей, узлов и блоков различных приборов и изделий РЭА, а также частей в электрических аппаратах и машинах.

Токопроводящим элементом монтажных проводов являются однопроволочные провода или жилы из материалов с высокой проводимостью – меди или алюминия. Однопроволочные провода относят к негибким, а многопроволочные (многожильные) – к гибким монтажным проводам, у которых токопроводящие жилы свиты (скручены) из тонких проволок.

Монтажные провода выпускаются в резиновой полихлорвиниловой и волокнистой изоляции из хлопчатобумажной, шелковой или капроновой пряжи и из синтетических пленок, в частности, из фторопласта. Для лучшего распознавания монтажных проводов их изоляционные покрытия обычно имеют различную окраску.

Маркировка монтажных проводов аналогична маркировке обмоточных проводов. Наиболее распространенными марками медных монтажных проводов являются:

- МР – медный однопроволочный в резиновой изоляции;
- МРГ – медный в резиновой изоляции, гибкий (многопроволочный);
- МГВ – медный, гибкий с (полихлор-) виниловой изоляцией;
- МГШ – медный, гибкий с изоляцией из искусственного шелка;
- МГШВ – медный, гибкий с шелковой и виниловой изоляцией;
- ПМП – провод медный одножильный, изолированный полиэтиленом и и.д.

Установочные провода, шнуры, кабели

Установочные провода и шнуры применяют в силовых и осветительных сетях и установках. Они служат для распределения электрической энергии и подключения к сети электродвигателей, светильников и других потребителей тока. Токопроводящие элементы установочных проводов и шнуров изготавливают из медной или алюминиевой проволоки. Жилы изолируют электроизоляционными материалами. Поверх изоляции возможно применение оплетки из хлопчатобумажной или шелковой пряжи, которую пропитывают специальным противогнилостным составом. В некоторых случаях наружную оплетку изготавливают из тонкой стальной оцинкованной проволоки для защиты от механических повреждений.

Установочные провода выпускают одно-, двух-, трех-, четырех-, и многожильными. Наиболее распространенными марками установленных проводов являются:

- ПР – провод медный одножильный с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи;
- АПР – алюминиевый провод с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи;
- ПРГ – провод медный гибкий с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи
- ПВ – провод медный одножильный с виниловой изоляцией;
- АПВ – алюминиевый провод с виниловой изоляцией;
- ПВГ – провод медный гибкий (многожильный) с виниловой изоляцией; и т.д.

Кабельными называют изделия, предназначенные для передачи электрической энергии и электрических сигналов на большие расстояния.

По назначению кабели можно разделить на силовые для передачи и распределения электрической энергии, телефонно-телеграфные, радиочастотные и оптоволоконные.

Силовые кабели представляют собой системы из скрученных вместе неизолированных (голых) проводов или изолированных друг от друга жил в защитной наружной металлической или резиновой оболочке.

Голые провода предназначены для силовых воздушных линий электропередач, линий связи и т.п. Они изготавливаются из скрученных алюминиевых или медных проволок и могут иметь сердцевину из стальных проволок и могут иметь сердцевину из стальных проволок, несущих механическую нагрузку.

Силовые кабели с резиновой и полимерной изоляцией предназначены для передачи электроэнергии по трассам с разным уровнем прокладки в земле. Кабели с резиновой изоляцией выпускают одно-, двух-, трех-, и четырехжильными с сечением жил (1-500) мм². Жилы могут быть изолированы друг от друга и заключены в общую оболочку, изготовленную из свинца, полихлорвинила или специальной резины. Вид изоляции определяется назначением, мощностью передаваемой электрической энергии и условиями эксплуатации.

Телефонно-телеграфные кабели могут содержать до тысяч пар проводов с изоляцией разного цвета и общей оболочкой из полимерного материала.

Радиочастотные кабели предназначены для передачи сигналов высокой частоты. Они используются в установках многоканальной телефонии, в телевизионных установках, для передачи питания к антеннам и т.п. Их выпускают в виде коаксиальных однопроводных кабелей типа РК, состоящих из центрального медного провода, помещенного в высокочастотную изоляцию, поверх которой располагается оплетка из тонкой проволоки являющаяся обратным проводом. Внешняя изоляция может выполняться из резины или полимерного материала. Кабели типа РД состоят из двух изолированных проводников, заключенных в общую оболочку.

Оптоволоконные кабели представляют собой систему световодов из световедущих стекловолокон. Световоды состоят из двух слоев специальных стекол: световедущей жилы с высоким показателем преломления и изоляционной оболочки с меньшим показателем преломления. Излучение, падающее на входной торец прозрачного световода, распространяется по нему благодаря неоднократному полному внутреннему отражению от границы раздела световедущей жилы и оболочки и выходит из противоположного конца.

В видимой и ближней инфракрасной области спектра наибольшее распространение получили световодные волокна из оптического стекла. Для световедущих жил используют щелочные стекла с большим содержанием оксида свинца (PbO), а для изоляционной оболочки – щелочные стекла, содержащие оксид бария (BaO).

Световодные волокна диаметром (2...15) мкм укладывают параллельно в пучки и спекают, получая многожильные световоды диаметром (0,3...3) мм. В оптоволоконном кабеле число световедущих жил доходит до 100 000. По таким кабелям можно передавать с одного торца на противоположный не только световой сигнал, но и изображение.

Световоды выпускают как прямые, так и изогнутые или закрученные (при подогреве). Жгуты из тонких волокон, соединенных только по концам, обладают гибкостью. Изгиб не нарушает передачи по ним изображения.

Опволоконные кабели применяют для передачи различной информации в вычислительной технике, телевидении, фототелеграфии и т.д.

Проведенное рассмотрение применения проводниковых материалов не может считаться полным. Это скорее всего ознакомительная информация, поскольку в каждом отдельном случае необходимо учитывать особые требования и специфические условия эксплуатации изделий из проводниковых материалов. Для глубокого изучения следует пользоваться литературой по каждой области применения проводниковых материалов.

2.7. Резисторы

Одним из основных пассивных элементов радиотехнической и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются резисторы. Они составляют от 10 до 50% всех компонентов, определяемых принципиальной электрической схемой прибора или устройства.

Резистором называется пассивный компонент электрической цепи, предназначенный для регулирования и перераспределения электрической энергии между ветвями цепи, которая выполняет определенную функцию преобразования информации, представляемой в виде электрических сигналов.

Типовые конструкции пленочных и объемных резисторов представлены на рисунках 2.2 и 2.3.

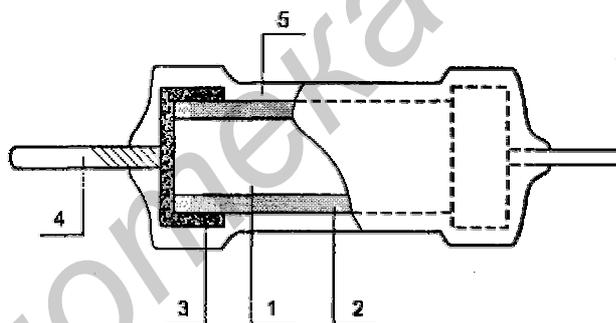


Рисунок 2.2 – Типовая конструкция пленочного резистора

- 1 – диэлектрическое цилиндрическое основание;
- 2 – резистивный токопроводящий элемент;
- 3 – контактные металлические колпачки;
- 4 – проволочные выводы;
- 5 – защитная пленка.

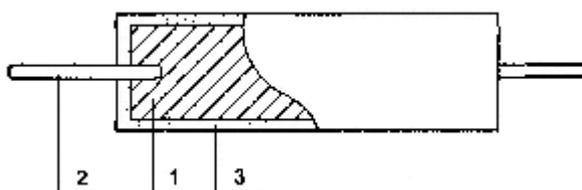


Рисунок 2.3 – Типовая конструкция объемного резистора

- 1 – токопроводящий стержень круглого или прямоугольного сечения;
- 2 – проволочные выводы;
- 3 – защитная стеклоэмалевая или стеклокерамическая оболочка.

Для всех типов резисторов существуют специальные ряды номинальных значений сопротивления и допусков на отклонения от номиналов. По оценке специалистов в мире насчитывается несколько тысяч типов резисторов, а число типонаминов – несколько десятков миллионов и их количество постоянно увеличивается. Ежегодный выпуск резисторов в промышленно развитых странах исчисляется миллиардами штук. В связи с этим систематизация и деление резисторов на группы, и классы вызывает серьезные затруднения.

Классификация резисторов по различным признакам.

Существуют различные классификационные признаки деления резисторов. Наиболее устоявшимися являются:

- по значению и характеру изменения сопротивления - на постоянные и переменные;
- по назначению - на общего назначения и специальные;
- по способу монтажа - для навесного и печатного монтажа, для микромодулей и микросхем;
- по способу защиты от внешних факторов - на изолированные, неизолированные, герметизированные и вакуумные;
- по типу материала резистивного слоя - на проволочные, непроволочные и металлофольговые.

Постоянные резисторы имеют фиксированные, в пределах допуска, значения сопротивления, которое в процессе эксплуатации не изменяется.

Переменные резисторы подразделяются на регулировочные и подстроечные. Первые - позволяют осуществлять изменение величины сопротивления в процессе эксплуатации аппаратуры. Вторые - предусматривают изменения величины сопротивления при разовой или периодической регулировке, а в процессе работы аппаратуры не изменяются.

Переменные резисторы имеют различные конструктивные особенности:

- одноэлементные и многоэлементные (сдвоенные, строенные и четверенные, в виде блоков из нескольких резисторов);
- с круговым (270°) и прямолинейным перемещением подвижного контакта (20-40мм);
- с выключателем и без выключателя;
- с дополнительным и без дополнительного вывода;
- с упором и без упора;
- с фиксацией и без фиксации положения подвижной системы.

Резисторы общего назначения совместно с другими элементами электрических цепей используются для перераспределения токов и напряжений в ветвях цепей,

делителей и сглаживающих элементов в цепях питания, формирователей импульсов, шунтов, нагрузок и т.д.

Диапазон номинальных сопротивлений от 10 Ом до 10 МОм при номинальной мощности рассеяния от 0,062 до 100Вт и допустимом отклонении сопротивления от номинального значения в соответствии с существующей шкалой допусков от ± 1 до $\pm 20\%$.

Специальные резисторы подразделяются на:

- прецизионные и сверхпрецизионные;
- высокочастотные;
- высоковольтные;
- высокоомные;
- наборы резисторов.

Прецизионные и сверхпрецизионные резисторы отличаются большой точностью номиналов сопротивлений и высокой стабильностью параметров в процессе эксплуатации. Допуски на значение сопротивления составляют от $\pm 0,0005$ до 0,5%. Диапазон номинальных сопротивлений шире, чем у резисторов общего назначения и составляет от 1 Ом до сотен ГОм, а мощности рассеяния не превышают 2Вт из-за высоких требований к стабильности, которые трудно выполнить при больших мощностях рассеяния.

Применяются такие резисторы в основном в измерительных приборах, системах автоматики и вычислительной техники.

Высокочастотные резисторы имеют малые значения собственной (паразитной) индуктивности и емкости. Это и определило область применения в высокочастотных цепях, кабелях и волноводах в качестве согласующих нагрузок, аттенуаторов, эквивалентов антенн и т.п. Проволочные резисторы рассчитаны на работу при частотах до сотен кГц, а непроволочные - до сотен МГц и более.

Высоковольтные и высокоомные резисторы предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного тока в качестве делителей напряжения, искрогасителей, подавителей радиопомех в цепях с малыми токами, в измерительной аппаратуре и т.д.

Значения сопротивлений в соответствии с существующими рядами номиналов охватывают диапазон от 10 до 10^{12} Ом при допусках от $\pm 0,1$ до $\pm 20\%$. Диапазон рабочих напряжений от 30В до 25кВ при мощностях рассеяния от 0,01 до 500Вт.

Для навесного и печатного монтажа используются большинство резисторов, которые могут иметь как мягкие, так и жесткие выводы в виде проволоки круглого сечения или ленты, в виде лепестков. Это позволяет сначала механически закрепить резистор на плате, гребне и т.п., а затем с помощью пайки создать электрический контакт с необходимыми элементами электрической схемы.

Для микромодулей и микросхем выпускаются миниатюрные конструкции резисторов, в том числе и наборы резисторов, у которых в качестве выводов используются определенные части их поверхности. Сопротивления в виде чип-элементов используются в качестве навесных компонентов гибридных и интегральных микросхем.

Неизолированные резисторы, в том числе и с защитными покрытиями, не допускают касания своего корпуса с токоведущими частями и шасси аппаратуры.

Изолированные резисторы за счет покрытия диэлектрическими материалами в виде лаков, компаундов и др. допускают касание корпуса резистора шасси или токоведущих частей аппаратуры.

Герметизированные и вакуумные резисторы имеют конструкцию, исключающую возможность сообщения окружающей среды с внутренними элементами резистора. Это достигается герметизацией резисторов с помощью керамических или металлических корпусов, опрессовки компаундами, либо помещением резистора в стеклянную вакуумную колбу.

Наборы резисторов.

Набором резисторов называют совокупность резисторов, объединенных в единую конструкцию, как правило в корпусах микросхем или корпусах сопрягающихся с микросхемами, имеющими однорядные, двухрядные или планарно расположенные выводы для печатного монтажа. Наборы резисторов по материалу и конструкции корпуса бывают:

- металлополимерные;
- герметичные металлокерамические;
- герметичные металlostеклянные;
- керамические;
- пластмассовые.

По назначению, типу резистивного элемента и схемотехническому построению деление наборов резисторов совпадает с классификацией традиционных резисторов. Отличие наборов от традиционных резисторов заключается лишь в схемотехническом построении. По этому признаку наборы резисторов делятся на:

- *простой набор резисторов* – соединенные или несоединенные в электрическую схему постоянные резисторы, не имеющие функциональной зависимости выходного сигнала от входного;
- *функциональный* – набор постоянных резисторов, соединенных в определенную электрическую схему, обеспечивающую функциональную зависимость выходного сигнала от входного;
- *комбинированный* – набор, состоящий из постоянных и переменных резисторов.

По функциональному назначению наборы резисторов используются в электрических схемах в качестве:

- последовательных делителей напряжения;
- прецизионных делителей;
- регулируемых наборов резисторов;
- преобразователей уровня напряжения;
- декодирующих двоичных матриц;
- декодирующих двоично-десятичных матриц.

В соответствии с функциональным назначением существующие наборы резисторов в основном применяются в устройствах и изделиях измерительной и вычислительной техники.

Система условных обозначений наборов резисторов включает:

- старые ненормализованные обозначения;

- условные обозначения тонкопленочных наборов резисторов, имеющих конструктивное исполнение в виде интегральных микросхем
- обозначение наборов резисторов не отнесенных к классу интегральных микросхем, которые могут быть как сокращенными, так и полными

Среди ненормализованных буквенных обозначений часто встречаются такие как:

- НС – набор сопротивлений;
- ДНД – делитель напряжения дискретный;
- ДНМ – делитель напряжения миниатюрный;
- СЭС – схемный элемент сопротивлений и т.д.

Условное обозначение тонкопленочных наборов резисторов состоит из следующих элементов:

- три цифры, отражающие серию микросхемы;
- две буквы, обозначающие подгруппу и вид микросхемы (НР – набор резисторов, НФ – набор функциональный)
- условный номер (одна или несколько цифр) разработки микросхемы по функциональному признаку в данной серии.

Например, 301НР2...ТУ – набор резисторов серии микросхем 301 с порядковым номером разработки 2 и номером технических условий.

Для наборов резисторов, не отнесенных к классу интегральных микросхем, сокращенное условное обозначение состоит из следующих элементов:

- сочетание букв, обозначающих подкласс резисторов (НР – набор резисторов);
- цифра, обозначающая вид материала токопроводящего элемента (1 – непроволочные, 2 – проволочные или металлофольговые)
- регистрационный номер конкретного типа набора резисторов.

Например, НР1-16...ТУ – набор резисторов непроволочных с номером разработки 16 и номером технических условий.

Полное обозначение наборов резисторов используется в конструкторской документации на изделие, регламентируется отраслевыми стандартами или техническими условиями и состоит из сокращенного обозначения варианта конструктивного исполнения, значений основных параметров и характеристик наборов резисторов и обозначение документа на поставку.

Например, НР1-7А-5-7-470 Ом \pm 5%...ТУ – набор непроволочных резисторов с регистрационным номером 7 и вариантом конструкции А, типовой схемой 5, числом резисторов 7 с номинальным сопротивлением 470 Ом, допуском на отклонение от номинала \pm 5% и номером технических условий.

Основными параметрами и характеристиками наборов резисторов, отраженными в конструкторских документах, являются:

- обозначение типовой схемы построения набора;
- число резисторов или разрядов в наборе;
- номинальное сопротивление и допуск на отклонение от номинала в процентах;
- температурный коэффициент сопротивления;
- номинальная мощность;
- сопротивление изоляции;
- номинальные входное и выходное напряжения;
- время установления выходного напряжения;

- коэффициент деления набора резисторов, определяемый как отношение выходного напряжения к напряжению на его входе.

Исчерпывающую информацию по наборам резисторов можно найти в специальной литературе, справочниках, в регламентирующих документах и документах на поставку.

Деление резисторов по материалу токопроводящего элемента.

С позиции материаловедения наиболее важной является классификация резисторов по типу материала токопроводящего элемента, называемого часто резистивным слоем или элементом. Классификация резисторов по этому признаку может быть представлена в виде схемы (рисунок 2.4)

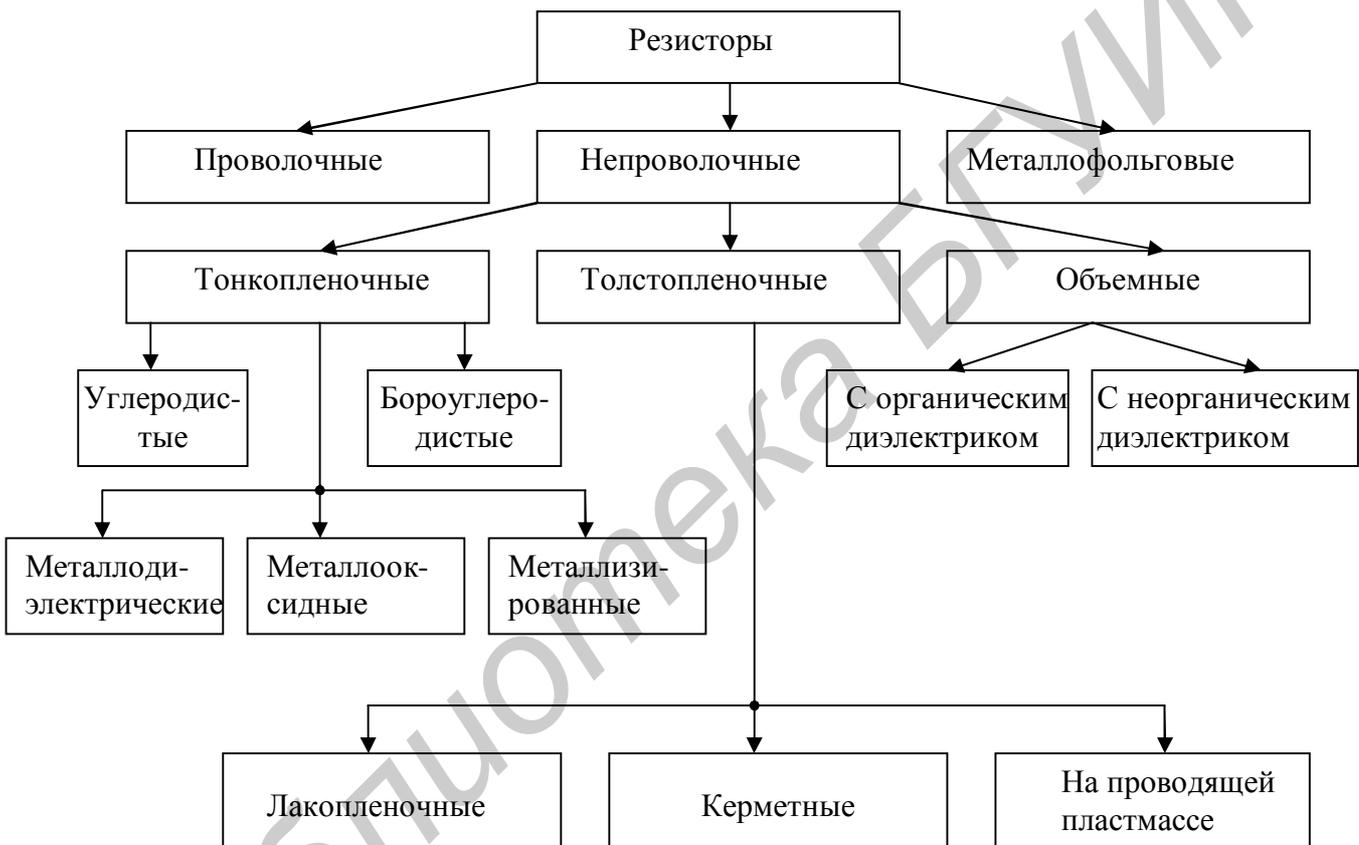


Рисунок 2.4 – Схема классификации резисторов по материалу токопроводящего элемента

В проволочных резисторах токопроводящими элементами являются обмоточные провода высокого сопротивления из константана, манганина, нихрома и никелина.

В металлофольговых – токопроводящий резистивный элемент изготавливают из фольги высокоомного материала определенной конфигурации, наносимой на изолированное основание.

Провода могут иметь один или два слоя высокопрочной либо лакостойкой эмали, а также комбинированную изоляцию из эмали и слоя обмотки из хлопчатобумажной или шелковой пряжи.

Диаметр обмоточных проводов для резисторов колеблется от 0,02 до 1 мм. Для малогабаритных высокоомных сопротивлений повышенной стабильности

выпускают провода диаметром (6...10) мкм в сплошной стеклянной изоляции, обладающей высокими электроизоляционными свойствами.

Постоянные проволочные резисторы выполняются намоткой высокоомной проволоки на цилиндрические или плоские каркасы из диэлектрика, что обеспечивает механическую прочность и возможность укрепления на них всех остальных конструктивных элементов.

В реальных резисторах кроме резистивного элемента необходимы металлические выводы для включения в электрическую схему. Они должны иметь надежный электрический контакт с резистивным элементом, а в переменном резисторе также и с подвижным скользящим контактом. Для защиты резистора от влияния окружающей среды и механических повреждений резистивный элемент и часть выводов покрывают защитной пленкой, обладающей хорошей адгезией с металлом выводов и корпусом резистора.

Конструктивное сочетание – токопроводящий элемент и выводы – определяет такие характеристики резистора, как допустимая рассеиваемая мощность, механическая прочность, технологичность изготовления и надежность.

Проволочные резисторы постоянного сопротивления применяются в аппаратуре при высоких требованиях к стабильности, точности, уровню шумов и при значительной (до 100 Вт) допустимой мощности рассеяния. Недостатком проволочных резисторов является ограниченный частотный диапазон из-за большой собственной (паразитной) емкости и индуктивности.

Непроволочные резисторы по толщине токопроводящего элемента подразделяют на тонкопленочные (толщина – доля миллиметра), объемные (толщина – единицы миллиметра). Деление по толщине слоя не существует.

Токопроводящий элемент непроволочных резисторов изготавливается разнообразными технологическими приемами из достаточно широкого спектра резистивных материалов. Он представляет собой тонкую пленку, которая не может служить конструктивным элементом резистора. Поэтому в качестве несущей конструкции таких резисторов используется диэлектрическое основание в виде полых или сплошных цилиндров, квадратных, прямоугольных или дисковых подложек (каркасов).

Основной операцией при создании непроволочных резисторов является нанесение токопроводящей пленки на диэлектрическое основание. Пленка должна иметь хорошую адгезию (сцепление) с основанием и длительно сохранять ее в рабочем температурном диапазоне. Сопротивление резистора определяется конфигурацией, составом пленки, ее толщиной и размерами основания. Состав пленки определяет временную или эксплуатационную стабильность резистора. Размеры основания совместно с выводами определяют отвод тепла, а значит работоспособность и надежность резистора. Чем на большую мощность рассчитан резистор, тем больше должна быть поверхность охлаждения и размеры диэлектрического основания.

Следует отметить, что выпускаются бескорпусные переменные и постоянные резисторы различного назначения.

Тонкопленочные резисторы по материалу токопроводящего слоя подразделяются на углеродистые и бороуглеродистые, металлодиэлектрические, металлооксидные и металлизированные

В углеродистых и бороуглеродистых резисторах токопроводящим элементом является пленка углерода или бороорганических соединений, наносимая пиролитическим осаждением на диэлектрическое основание (каркас) резистора.

Металлодиэлектрические, металлооксидные и металлизированные токопроводящие элементы изготавливают в виде микрокомпозиционного слоя из диэлектрика и металла, тонкой пленки оксида металла или сплава металла с различными добавками.

Толстопленочные и объемные резисторы, как и тонкопленочные, используют различные материалы для формирования токопроводящего слоя. К ним относятся лакосажевые, керметные материалы и проводящие пластмассы.

Токопроводящие слои таких резисторов представляют собой гетерогенную (однородную) систему или композицию из нескольких составляющих. Ее получают механическим смешиванием проводящего компонента из графита или сажи, металла или оксида металла. Обязательно добавление в смесь органического или неорганического связующего материала (смолы, стеклоэмали), наполнителя, пластификатора и отвердителя. После соответствующей термообработки смеси образуется однородный монолитный слой с необходимым комплексом резистивных параметров.

Лакосажевые композиции формируются на основе смол в виде лаковых растворов. Проводящим компонентом является сажа. Поэтому резисторы на основе таких композиций называют лакосажевыми, лакопленочными или пленочными композиционными. Для объемных резисторов на основе сажи, в качестве связующего компонента используют органические смолы и стеклоэмали.

В керметных резисторах основным проводящим компонентом являются металлические порошки и их смеси, представляющие собой керамическую, стеклянную или полимерную основу с равномерно распределенными частицами металла.

В резисторах на основе проводящих пластмасс токопроводящий элемент формируется горячим прессованием проводящей композиции в виде пресспорошков, изготовленных на основе связующих полимеров (смол) и сажи. Возможны металлопластмассовые композиции, проводящим компонентом которых являются металлы.

Обилие разнообразных и достаточно жестких требований к резисторам обеспечивается как подбором необходимого материала токопроводящего элемента, так и большим количеством конструктивных решений. Поэтому номенклатура постоянных и переменных резисторов достаточно широка. Это позволяет обеспечивать решение весьма сложных задач при разработке, производстве и эксплуатации радио- и электротехнических приборов, устройств и систем.

Для более полной информации о резисторах необходимо пользоваться специальной и справочной литературой, а также нормативной документацией на выпускаемую продукцию производителем.

Системы обозначений и маркировки резисторов.

В аппаратуре и приборах, находящихся в эксплуатации, как и в современных изделиях электронной промышленности, используются резисторы различного

времени изготовления, а, следовательно, и различных систем сокращенного обозначения.

В системе, существовавшей до 1968 года, обозначение резисторов состояло из букв, отражающих конструктивно-технологические особенности резистора. Первая буква или набор букв, как правило, соответствовали названию токопроводящего слоя.

Среди наиболее широко применявшихся и находящихся в эксплуатации постоянных резисторов использовались следующие сокращенные обозначения типа резистора:

- МЛТ - металлизированные лакированные теплостойкие;
- МОН - металлооксидные низкоомные;
- УЛМ - углеродистые лакированные малогабаритные;
- ВС - влагостойкие углеродистые;
- МТ - металлизированные теплостойкие;
- МЛМ - металлизированные лакированные миниатюрные;
- КИМ - композиционные изолированные малогабаритные;
- КОМ - композиционные опрессованные мегомные;
- ПЭВ - проволочное эмалированное влагостойкое;
- ПВС - микропроволочные высоковольтные в стеклянной изоляции и др.

Резисторы переменного сопротивления обозначались аналогично:

- ПП-2 - проволочный переменный (2 Вт);
- СП-0,4 - сопротивление переменное (0,4 Вт);
- СПД - сопротивление переменное дисковое;
- СПО - сопротивление переменное объемное;
- ПЭВР - проволочное эмалированное влагостойкое регулируемое и др.

В конструкторской документации после буквенного обозначения указываются параметры и характеристики резистора в следующей последовательности:

- номинальная мощность резистора;
- номинальное сопротивление и буквенное обозначение единицы измерения (Ом, кОм, МОм, ГОм, ТОм);
- допустимое отклонение (допуск) в процентах от номинала;
- группа по уровню шумов;
- группа по температурному коэффициенту сопротивления (ТКС);
- номер ГОСТа или ТУ (технических условий).

Для переменных резисторов добавляется буквенное обозначение функциональной характеристики, отражающей закон изменения величины сопротивления в зависимости от угла поворота (положения) подвижного контакта:

- А - линейная (возрастающая);
- Б - логарифмическая (возрастающая);
- В - обратнологарифмическая (падающая);
- И, Е - экспоненциальная (падающая и возрастающая).

Система обозначений в конструкторской документации сохранилась и в настоящее время.

С 1968 года в соответствии с принятым ГОСТом постоянные резисторы стали обозначать буквой С - сопротивление, а переменные - буквами СП - сопротивление

переменное. После буквенных обозначений стоит цифра, указывающая номер группы и отражающая материал токопроводящего слоя (табл.2.5), а затем через дефис - номер конкретной конструкции резистора. Например, С2-1 – резистор постоянный второй группы, первый вариант конструкции.

Таблица 2.5

Обозначение резисторов по типу токопроводящего слоя

Постоянные	Переменные	Тип токопроводящего слоя	Пример сокращенного обозначения
С1-	-	непроволочные углеродистые, бороуглеродистые	С1-4
С2-	СП2-	непроволочные металлопленочные (металлодиэлектрические) или металлооксидные	С2-1, С2-13, СП2-2А
С3-	СП3-	непроволочные тонкопленочные (лакопленочные), композиционные (керметные)	С3-3, С3-4, СП3-3, СП3-9, СП3-19
С4-	СП4-	непроволочные объемные композиционные	С4-2, С4-3, СП4-1, СП4-3
С5-	СП5-	проволочные и металофольговые	С5-5, С5-37, С5-25Ф, СП5-3, СП5-22
С6-	-	непроволочные тонкослойные металлизированные	С6-1, С6-9

В соответствии с действующей системой сокращенное условное обозначение резисторов также состоит из трех элементов:

- первый элемент - буквенный, обозначающий подкласс резисторов: Р- резистор постоянный; РП- резистор переменный; НР - набор резисторов;
- второй элемент - цифра, обозначающая группу резисторов по материалу токопроводящего слоя: 1- непроволочные; 2- проволочные и металлофольговые;
- третий элемент - цифра, обозначающая номер конкретной конструкции резистора.

В конструкторской документации помимо рассмотренных сокращенных обозначений типов резисторов, как и в предыдущих системах, указываются мощность, номинальное сопротивление, допустимое отклонение (допуск) в процентах от номинала и ряд других параметров.

Например, Р1-4-0,5-10 кОм ± 1%...ТУ – постоянный непроволочный резистор с регистрационным номером 4, номинальной мощности 0,5 Вт, номинальным сопротивлением 10 кОм, допуском ± 1% и номером технических условий (ТУ); РП1-33Д-0,125-1 кОм ± 1%...ТУ – переменный непроволочный резистор с регистрационным номером 33 и вариантом конструкции Д, мощностью 0,125 Вт,

номинальным сопротивлением 1 кОм, допуском $\pm 1\%$ и номером технических условий.

Кроме сокращенных и полных обозначений резисторов, отражаемых в конструкторской документации, используется маркировка резисторов, наносимая на корпус резистора. Она может быть: - буквенно-цифровая, отражающая тип, номинальную мощность, номинальное сопротивление, допуск; - буквенно-кодовая (сокращенная); - цветовая.

Буквенно-цифровая маркировка указывается на корпусе резистора, если достаточно места. Для миниатюрных резисторов не хватает места на корпусе, поэтому используется буквенно-кодовая маркировка.

Маркировка цветным кодом наносится на корпус резистора в виде кругов или полос и отражает номинальное сопротивление и допуск.

Все виды маркировки резисторов стандартизированы, поэтому подробную информацию можно найти в справочниках и в соответствующих нормативных документах.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение термина «проводник».
2. Что является количественной мерой электропроводности и какой параметр для ее характеристики используется в инженерной практике?
3. Запишите и поясните формулу для расчета температурного коэффициента удельного сопротивления.
4. Запишите и поясните формулу для расчета температурного коэффициента линейного расширения.
5. Что такое работа выхода и как она отображается на энергетической диаграмме проводника?
6. Перечислите проводниковые материалы с высокой удельной проводимостью.
7. Каков порядок величины удельной проводимости меди, алюминия, серебра?
8. Перечислите проводниковые материалы с высоким удельным сопротивлением.
9. Перечислите количественные параметры, отражающие основные электрофизические свойства проводников.
10. Перечислите проводниковые материалы, применяемые для изготовления постоянных резисторов.
11. Что такое наборы резисторов, и как они подразделяются по схемотехническому строению?
12. Как делятся резисторы по типу материала токопроводящего элемента и конструктивному исполнению?
13. Какие существуют марки припоев, и при каких температурах производится пайка?
14. Что такое термопара? Перечислите наиболее известные материалы для термопар.

Глава 3 ДИЭЛЕКТРИКИ

3.1. Свойства и количественные параметры диэлектриков

Диэлектриком называется вещество, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле.

Как и всякое вещество в природе, диэлектрик состоит из атомов и молекул, положительные и отрицательные заряды которых связаны достаточно большими силами электростатического взаимодействия, т.е. для диэлектрика характерно наличие сильно связанных зарядов и отсутствие свободных зарядов, способных обеспечивать в электропроводность.

Поляризация

Под действием внешнего электрического поля напряженностью E происходит смещение связанных зарядов относительно своих устойчивых положений, т.е. происходит ориентация зарядов внешним электрическим полем. Это явление называется *поляризацией*. В результате в объеме диэлектрика возникает внутреннее электростатическое поле $E_{\text{вн}}$, обусловленное заряженными частицами самого вещества (рисунок.3.1), а суммарное поле в диэлектрике:

$$E_{\text{д}} = E - E_{\text{вн}} > 0 \quad (3.1)$$

При отсутствии внешнего поля каждый элемент объема, содержащий достаточно большое число молекул, не имеет электрического момента из-за разупорядоченной ориентации электрических моментов отдельных молекул. Под действием внешнего электрического поля за счет упорядочения расположения зарядов молекул в пространстве каждый элементарный объем диэлектрика будет иметь электрический момент, отличный от нуля и равный сумме электрических моментов всех поляризованных молекул диэлектрика, находящихся в этом объеме. Таким образом, *электрическая поляризация* — это состояние вещества, при котором электрический момент некоторого объема вещества отличен от нуля.

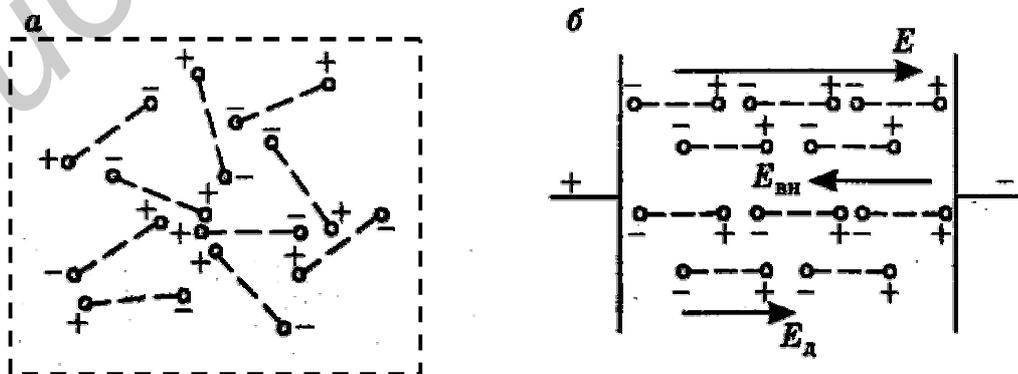


Рисунок 3.1 - Расположение зарядов в диэлектрике:

a – при отсутствии внешнего поля;

б – при помещении в электрическое поле

Диэлектрики, в которых поляризация возникает только под действием электрического поля, называются *линейными* или пассивными и применяются в технике в качестве электроизоляционных материалов, в конденсаторах и в конструкционных изделиях или деталях.

Диэлектрики, которые поляризуются благодаря механическому воздействию, называются *пьезоэлектриками*, а явление - *пьезоэлектрическим эффектом*.

Диэлектрики, в которых возникает самопроизвольная поляризация в определенном интервале температур, называются *сегнетоэлектриками*, а явление поляризации - *спонтанным*.

Пьезоэлектрики и сегнетоэлектрики являются нелинейными диэлектриками и относятся к классу активных диэлектриков. К этому же классу относятся диэлектрики с особыми оптическими свойствами, способные сохранять поляризованное состояние и создающие тем самым электрическое поле в окружающем пространстве после снятия внешнего поля.

Для количественной оценки степени поляризации диэлектрика пользуются макроскопической характеристикой, называемой диэлектрической проницаемостью ϵ . Различают абсолютную диэлектрическую проницаемость ϵ^* и относительную, или просто диэлектрическую проницаемость ϵ . Абсолютная диэлектрическая проницаемость есть величина, характеризующая способность диэлектрика образовывать электрическую емкость; ее размерность - $[\Phi/м]$. Связь между абсолютной и относительной диэлектрическими проницаемостями определяется соотношением $\epsilon^* = \epsilon \cdot \epsilon_0$, где ϵ_0 - электрическая постоянная, характеризующая электрическое поле при отсутствии его взаимодействия с веществом, т.е. она характеризует электрическое поле в вакууме:

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} [\Phi/м] = 8,85 \cdot 10^{-12} [\Phi/м] = 8,85 [н\Phi/м]$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ является безразмерной величиной и определяется соотношением

$$\epsilon = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} \quad (3.2)$$

С точки зрения существования внутреннего электростатического поля в диэлектрике *относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз ослабляется поле в диэлектрике по сравнению с полем в вакууме при одинаковом заряде, создающем это электрическое поле, т.е.*

$$\epsilon = \frac{E}{E_d} = \frac{E}{E - E_{вн}} > 1 \quad (3.3)$$

Третье определение диэлектрической проницаемости вытекает из рассмотрения конденсатора, к пластинам которого приложено постоянное напряжение, а между обкладками вносится диэлектрик (рисунок 3.2).

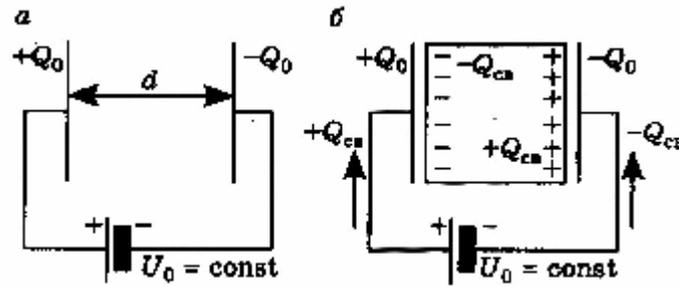


Рисунок 3.2 – Схема включения конденсатора:
***a* – без диэлектрика;**
***б* – с диэлектриком**

При отсутствии диэлектрика между обкладками конденсатора, на них от источника U_0 накапливается свободный заряд Q_0 , и емкость конденсатора (рисунок 3.2, а) определяется соотношением:

$$C_0 = \frac{Q_0}{U_0} \quad (3.4)$$

При внесении между обкладками конденсатора диэлектрика (рисунок 3.2, б) в нем за счет поляризации образуется связанный заряд $Q_{св}$, который уменьшает напряженность электрического поля между обкладками до значения E_d . Однако, напряженность поля в соответствии с выражением $E=U/d$ определяется только геометрией конденсатора и напряжением внешнего источника. Следовательно, уменьшение напряженности поля в конденсаторе должно компенсироваться. Это происходит за счет натекания на обкладки от источника U_0 дополнительного заряда, обратного по знаку $Q_{св}$. В таком случае емкость конденсатора с диэлектриком будет определяться соотношением

$$C_d = \frac{Q_0 + Q_{св}}{U_0} \quad (3.5)$$

Из (3.4) и (3.5) следует, что $C_d > C_0$ за счет наличия диэлектрика между обкладками конденсатора. Это неравенство тем больше, чем выше степень поляризации диэлектрика, характеризуемая диэлектрической проницаемостью ϵ .

Отношение емкости конденсатора с диэлектриком к емкости конденсатора без диэлектрика количественно характеризует способность диэлектрика поляризоваться, что выражается в увеличении емкости конденсатора с диэлектриком:

$$\epsilon = \frac{C_d}{C_0} = \frac{(Q_0 + Q_{св})}{U_0} \cdot \frac{U_0}{Q_0} = \left(1 + \frac{Q_{св}}{Q_0}\right) \geq 1 \quad (3.6)$$

Следовательно, *относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора с диэлектриком по сравнению с емкостью конденсатора того же размера без диэлектрика.*

Диэлектрическую проницаемость можно рассчитать по экспериментально измеренной емкости, используя для расчета выражение для емкости плоского конденсатора, зная его геометрические размеры:

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (3.7)$$

где S - площадь обкладки конденсатора; d - расстояние между обкладками.

С другой стороны, при заданных размерах конденсатора, т.е. S и d можно, изменяя материал диэлектрика (ϵ), получить требуемое значение емкости.

Таким образом, для получения конденсатора максимальной емкости при минимальных размерах нужен диэлектрический материал с большим значением ϵ , а для изоляции проводов и радиодеталей друг от друга нужен диэлектрический материал с минимальным значением ϵ целью уменьшения паразитных емкостей.

Виды поляризации диэлектриков

В зависимости от природы частиц, составляющих материал, и сил связи между ними в диэлектриках наблюдаются различные виды поляризации. Основными механизмами или видами поляризации являются:

- электронная;
- ионная;
- дипольно-релаксационная;
- электронно-релаксационная;
- ионно-релаксационная поляризация.

Электронная поляризация обусловлена упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер атомов и ионов (рисунок 3.3).

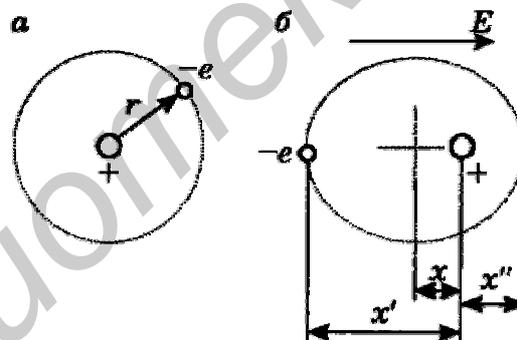


Рисунок 3.3 - Механизм электронной поляризации: а – при отсутствии внешнего поля; б – при наложении электрического поля

При отсутствии внешнего поля центры положительного и отрицательного зарядов совпадают и, таким образом, электрический момент зарядов равен нулю. При наложении внешнего поля происходит деформация орбиты, а точнее рассредоточение отрицательного заряда, т.е. появляется асимметрия зарядов и возникает электрический момент:

$$m = qx \quad (3.8)$$

Возникновение электрического момента и есть электрическая поляризация.

Поскольку $x \ll r$, смещение центров зарядов весьма незначительно ($\sim 10^{-17}$ м). Это связано с тем, что напряженность внешнего поля много меньше

напряженности поля электростатического взаимодействия ($E_{\text{внеш}}=10^2...10^3$ В/см, $E_{\text{внутр}} = 5 \cdot 10^{11}$ В/см).

Электронная поляризация присуща всем диэлектрикам и является единственным видом для неполярных диэлектриков. Время установления поляризации $\tau \sim 10^{-15}$ с, т.е. поляризация мгновенна и затрат энергии внешнего поля на нее нет.

Ионная поляризация обусловлена упругим смещением ионов относительно положения равновесия (рисунок 3.4) и характерна для ионных диэлектриков (по структуре и виду химической связи).

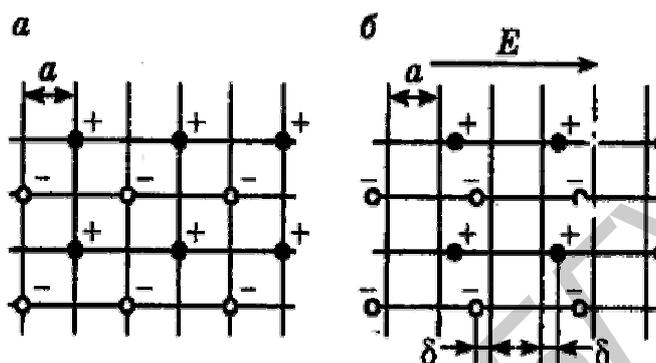


Рисунок 3.4 - Механизм ионной поляризации
a – при отсутствии;
б – при наложении электрического поля

При помещении ионного диэлектрика в электрическое поле ионы смещаются относительно своих устойчивых положений на незначительные расстояния δ , меньшие размера элементарной ячейки a . В результате поляризации возникает электрический момент $m = q(a \pm 2d)$.

Время установления поляризации $\tau \sim 10^{-13}$ с, т.е. поляризация почти мгновенна. Она успевает произойти при частотах внешнего поля, соответствующих частотам *световых колебаний*. При частоте менее 10^{13} Гц затрат энергии внешнего поля на поляризацию нет.

Дипольно-релаксационная поляризация возникает в ионных полярных диэлектриках, состоящих из дипольных молекул.

Внешнее электрическое поле создает момент вращения дипольной молекулы, т.е. ориентирует связанные заряды по полю (рисунок 3.5). Расчет момента вращения показывает, что в процессе ориентации диполя возникает электрический момент μ , т.е. происходит поляризация диэлектрика.

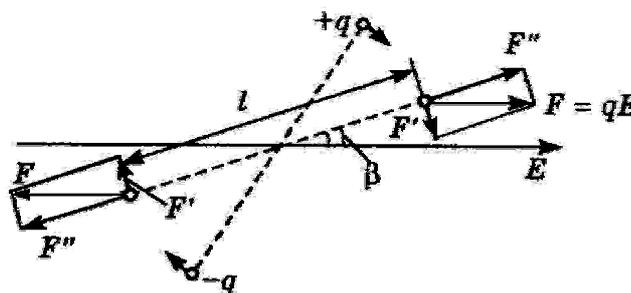


Рисунок 3.5 - Ориентация диполя
внешним электрическим полем

Сила внешнего поля $F = qE$. Составляющая силы внешнего поля F' создает момент вращения $M_{вр} = F' \cdot l = F \cdot \sin\beta \cdot l = qlE \sin\beta = \mu E \sin\beta$, который зависит от электрического момента μ . Здесь β - угол между направлениями электрического момента диполя и напряженностью внешнего поля E .

Время поляризации или релаксации τ определяется типом диполей, а также силой химической связи между молекулами, и находится в пределах от 10^{-2} до 10^{-10} с. Это свидетельствует о том, что данный вид поляризации замедленный и требует затрат потерь энергии внешнего поля на ориентацию молекул. Это выражается в выделении теплоты, т.е. нагреве диэлектрика в процессе поляризации.

Поляризация протекает вначале быстро, а затем замедляется, т.е. ослабевает. Отсюда происходит название - *релаксационная*, т.е. *ослабевающая или замедляющаяся*.

Степень поляризации диэлектрика характеризуется *поляризованностью* P , которая численно равна электрическому моменту единицы объема поляризованного диэлектрика. На рисунке 3.6 представлены зависимости поляризованности от времени, позволяющие определить связь степени поляризации со временем релаксации τ .

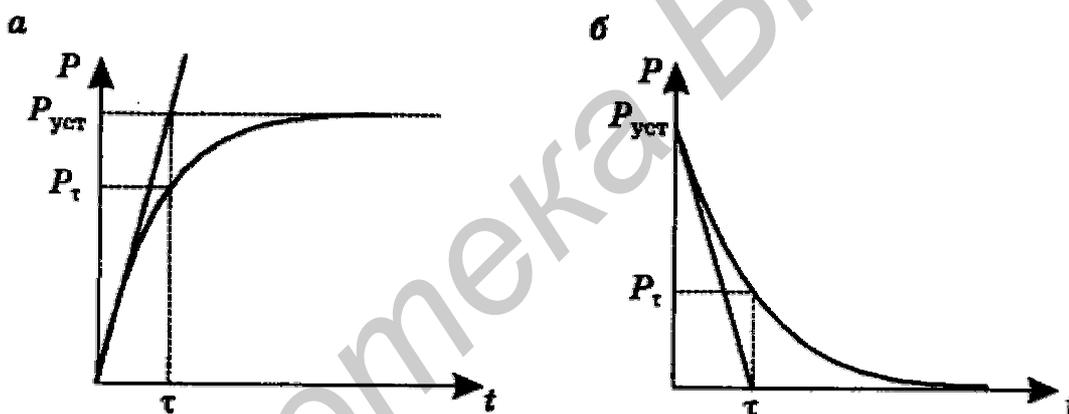


Рисунок 3.6 - Процесс дипольно-релаксационной поляризации:
а - при приложении электрического поля;
б - при снятии внешнего поля

При приложении поля $P_\tau = P_{уст} - P_{уст} / e$.

Если $P_{уст} = 100\%$, то $P_\tau = 63\%$, а $P_{уст}/e = 37\%$. Следовательно, за время τ 63% диполей ориентируются по полю и процесс поляризации можно считать завершённым. При снятии поля $P_\tau = P_{уст} e^{-1/\tau}$. За время τ поляризованность $P_\tau = P_{уст} / e = 37\%$.

Таким образом, время релаксации τ - это промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полем дипольных молекул после его снятия уменьшается в e раз от установившегося значения, и система фактически возвращается из неравновесного состояния в равновесное.

Электронно-релаксационная поляризация возникает в диэлектриках, имеющих дефекты структуры, когда в узле кристаллической решетки отсутствует ион. В силу электронейтральности системы в месте дефекта должны находиться электрон или дырка, принадлежащие всем соседним ионам и поэтому слабо с

ними связанные. Их принадлежность к соседним ионам равновероятна, а хаотическое перемещение не создает электрического момента системе.

В случае приложения внешнего электрического поля большая часть «дефектных» зарядов сравнительно легко смещается полем, что приводит к асимметрии электрических зарядов и возникновению электрического момента в объеме диэлектрика, т.е. возникает электронно-релаксационная поляризация.

Величина ϵ в зависимости от степени дефектности структуры материала может достигать высоких значений. Время релаксации τ находится в пределах от 10^{-7} до 10^{-11} с.

Ионно-релаксационная поляризация возникает в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой структурных элементов решетки, в частности, в стеклах. Слабо связанные ионы могут смещаться внешним полем на расстояния, превышающие постоянную решетки. При снятии поля ионы сравнительно медленно возвращаются к центрам равновесия под действием теплового хаотического движения. Время релаксации $\tau \sim 10^{-5} \dots 10^{-7}$ с и достаточно большие расстояния смещения ионов свидетельствуют о том, что этот вид поляризации требует затрат энергии внешнего поля, т.е. в диэлектрике происходят необратимые потери энергии, выделяемые в виде теплоты, или приводящие к нагреванию диэлектрика.

В реальном диэлектрике может быть один или несколько видов поляризации с различным временем τ . Если все поляризационные процессы присутствуют в диэлектрике и происходят независимо друг от друга, то поляризованность и, соответственно, диэлектрическая проницаемость являются суммой всех составляющих поляризации:

$$\epsilon = \epsilon_{др} + \epsilon_{ир} + \epsilon_{эр} + \epsilon_{и} + \epsilon_{э} \quad (3.9)$$

При изменении частоты внешнего поля часть поляризационных процессов, успевающая следовать за изменением поля, будет вносить вклад в диэлектрическую проницаемость ϵ , а процессы, отстающие от изменения поля, не будут влиять на величину ϵ .

Таким образом, диэлектрическая проницаемость является частотнозависимой; ее зависимость от частоты называется *дисперсией диэлектрической проницаемости* (рисунок 3.7).

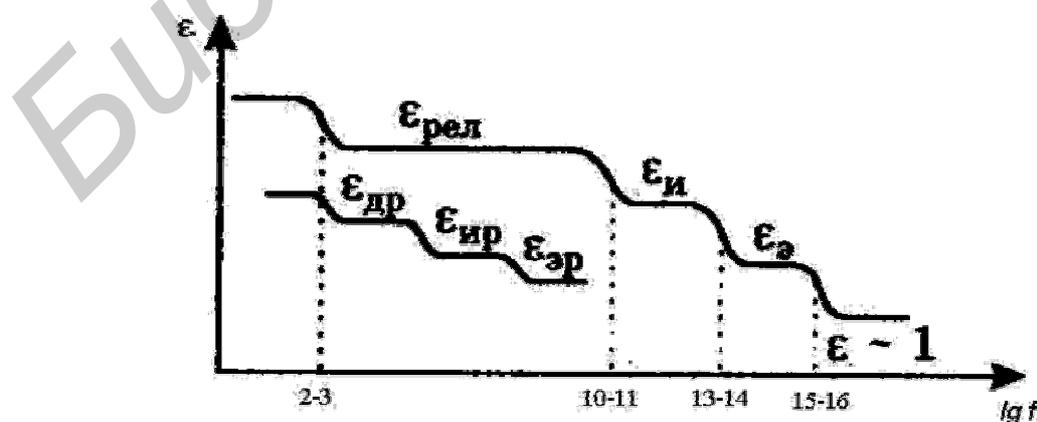


Рисунок 3.7 - Дисперсия диэлектрической проницаемости

Электропроводность диэлектриков

Электропроводностью называется способность вещества проводить электрический ток под действием постоянного электрического поля.

В реальном диэлектрике за счет несовершенства структуры и наличия примесей имеется незначительное число свободных носителей зарядов, перемещение которых под действием электрического поля создает ток сквозной проводимости или же ток утечки ($I_{ск}$).

Смещение связанных зарядов обуславливает поляризационные токи или токи смещения, называемые токами абсорбции ($I_{аб}$). Они возникают только в момент включения и выключения внешнего электрического поля. В переменном электрическом поле токи смещения имеют место при изменении фазы напряженности внешнего поля, т.е. все время, пока приложено это поле.

Количественной мерой электропроводности является *удельная проводимость σ , равная заряду, протекающему в единицу времени через единичное сечение образца при единичной напряженности поля.*

Согласно закону Ома, плотность тока j пропорциональна напряженности электрического поля E . Коэффициентом пропорциональности является удельная проводимость, т.е.

$$j = \sigma E. \quad (3.10)$$

С другой стороны $j = qnv$ где n - концентрация носителей заряда, а v - скорость направленного движения зарядов в электрическом поле напряженности E . Следовательно, можно записать $\sigma E = qnv$, откуда

$$S = qn \frac{v}{E} = qni \quad (3.11)$$

Величина i называется *подвижностью носителей заряда. Она равна скорости направленного движения носителя в электрическом поле единичной напряженности.*

Носителями зарядов могут быть электроны (дырки), ионы и молионы - заряженные группы молекул (коллоидные частицы). В связи с этим различают электронную, ионную и молионную электропроводности.

Электронная электропроводность характерна для проводников (металлов), полупроводников и относительно реже встречается у диэлектриков.

Ионная электропроводность наблюдается у кристаллических диэлектриков за счет ионов самого вещества или ионов примесей. Однако она особенно характерна для аморфных веществ – смол, лаковых пленок, компаундов, стекол, а также для жидких диэлектриков. Прохождение ионных токов сопровождается явлением *электролиза*, т.е. переносом вещества с образованием вблизи электродов новых химических веществ. Это явление используется при нанесении различных покрытий.

Молионная электропроводность по своей физической сущности довольно близка к ионной и наблюдается в коллоидных системах, представляющих собой смесь двух веществ (фаз), одно из которых в виде макроскопических частиц находится во взвешенном состоянии в другом веществе. Из коллоидных систем наиболее часто в электроизоляционной технике используются эмульсии (обе фазы - жидкости) и суспензии (одна фаза - твердое вещество, другая - жидкость). При

приложении внешнего поля молионы приходят в движение, и процесс сопровождается явлением электрофореза, который отличается от электролиза тем что не происходит образование новых веществ, а лишь меняется концентрация одной фазы в другой за счет осаждения молионов на электродах. Примером практического использования электрофореза является покрытие металлических предметов каучуком, смолами из их суспензий.

Молионная электропроводность наблюдается у жидких лаков и компаундов, увлажненных масел и т.д.

Практической мерой электропроводности является не удельная проводимость, а величина, ей обратная, — удельное сопротивление ρ . В технике различают удельное объемное ρ_V и удельное поверхностное ρ_S сопротивления.

В системе СИ *удельное объемное сопротивление ρ_V численно равно сопротивлению куба вещества с ребром 1 м, если ток проходит через объем между противоположными гранями куба и имеет размерность [Ом·м].*

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S численно равно сопротивлению квадрата любого размера на поверхности диэлектрика, если ток проходит между противоположными сторонами этого квадрата, и имеет размерность [Ом], [Ом/квadrat], [Ом/□]. Последняя форма записи размерности характерна для проводниковых и полупроводниковых пленок, используемых в микроэлектронике, формируемых как на полупроводниковых, так и на диэлектрических подложках.

Величина поверхностного сопротивления сильно зависит от состояния поверхности, т.е. влажности, степени загрязнения, окисления. Неполлярные диэлектрики слабо адсорбируют влагу, и ρ_S мало зависит от влажности. Ионные диэлектрики - керамика, стекло - гигроскопичны, поэтому для них ρ_S во влажной среде мало. Для устранения влияния влажности и повышения ρ_S керамические и стеклянные детали покрывают влагостойкими кремнийорганическими лаками.

Потери в диэлектрике

Потери в диэлектрике или диэлектрическими потерями называют мощность, выделяющуюся в диэлектрике в виде тепла при воздействии на него электрического поля.

Это означает, что диэлектрик нагревается под действием внешнего электрического поля, на что тратится, т.е. теряется энергия внешнего поля.

Существует две причины необратимых потерь энергии электрического поля в диэлектрике:

- нагрев за счет протекания тока сквозной проводимости;
- потери энергии за счет замедленных видов поляризации.

Наличие тока сквозной проводимости, согласно закону Джоуля-Ленца, приводит к выделению теплоты в диэлектрике, т.е. к необратимым потерям энергии внешнего поля.

Поляризационные процессы, которые принято характеризовать поляризованностью \dot{P} , также приводят к необратимым потерям энергии

внешнего поля. Поляризованность \bar{P} численно равна электрическому моменту \bar{M} единицы объема диэлектрика.

Если поляризационные процессы успевают следовать за изменением внешнего поля, то сдвига фаз между напряженностью поля \bar{E} и поляризованностью \bar{P} нет (рисунок 3.8). В этом случае в течение первой четверти периода поле ориентирует связанные заряды по направлению поля, совершая определенную работу, или затрачивая энергию (см. рисунок 3.5).

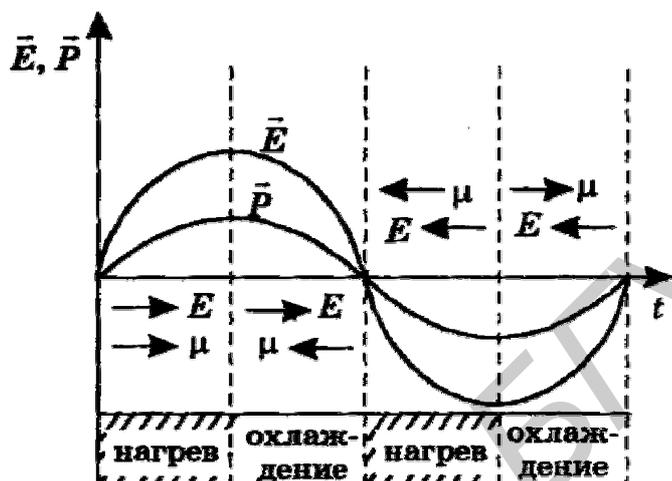


Рисунок 3.8 - Поляризация диэлектрика на низких частотах и, при быстрых видах поляризации

Направления поля \bar{E} и электрического момента \bar{M} совпадают. Кинетическая энергия связанных зарядов растет, равносильно повышению их температуры, т.е. нагреву диэлектрика.

Во вторую четверть периода направление поля \bar{E} остается прежним, а поляризованность \bar{P} уменьшается, т.е. связанные ряды за счет уменьшения \bar{E} начинают возвращаться в исходное состояние, отдавая накопленную кинетическую энергию, что означает понижение их температуры, т.е. охлаждение диэлектрика.

В течение периода нагрев компенсируется охлаждением и, таким образом, необратимых потерь энергии нет. Такой процесс характерен для быстрых видов поляризации.

В случае медленных видов поляризации наблюдается отставание поляризации от изменения внешнего поля (рисунок 3.9).

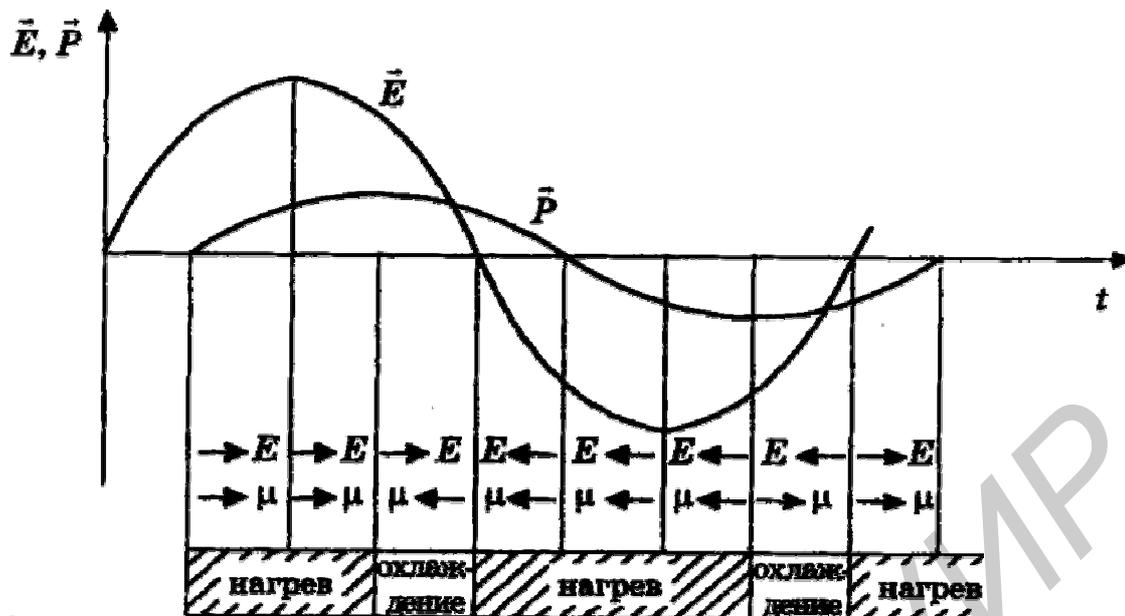


Рисунок 3.9 - Поляризация диэлектрика на высоких частотах (при медленных видах поляризации)

За счет сдвига фаз между напряженностью \dot{E} и поляризованностью \dot{P} время нагрева диэлектрика оказывается большим нежели время его охлаждения, т.е. время накопления кинетической энергии связанными зарядами больше времени ее отдачи. Следовательно, диэлектрик нагревается или в диэлектрике есть необратимые потери энергии внешнего поля. Потери энергии на ориентацию связанных зарядов равносильны тому, что в диэлектрике как бы протекает активный ток, обусловленный поляризационными процессами, отстающими от изменений поля.

Для инженерных расчетов диэлектрические потери характеризуются количественным параметром, называемым тангенсом угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$).

При внесении диэлектрика в переменное электрическое поле векторная диаграмма токов и напряжений имеет вид как на рисунке 3.10. На ней обозначено: I_0 - реактивный ток, обусловленный быстрыми видами поляризации; I_{pr} реактивный ток, обусловленный замедленными видами поляризации; $I_{ск}$ - сквозной активный ток или ток сквозной проводимости; I_{pa} - активный ток, обусловленный замедленными видами поляризации.

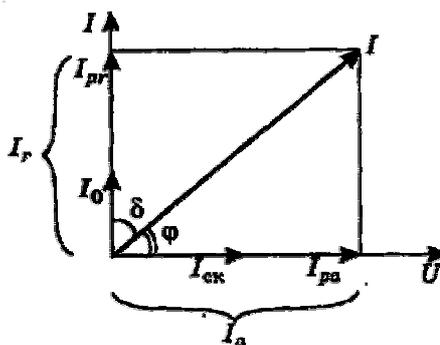


Рисунок 3.10 – Векторная диаграмма токов и напряжений в диэлектрике

Реактивный ток $I_r = I_0 + I_{pr}$ опережает напряжение U на 90° . Активный ток $I_a = I_{ск} + I_{ра}$ совпадает по фазе с напряжением. Полный ток I сдвинут относительно приложенного напряжения на угол φ . Угол δ , дополняющий угол сдвига фаз φ между током и напряжением до 90° , называется углом диэлектрических потерь. Тангенс угла диэлектрических потерь характеризует потери в диэлектрике, что легко понять из векторной диаграммы, поскольку

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_r .$$

Чем больше активный ток I_a , нагревающий диэлектрик, тем больше δ и $\operatorname{tg} \delta$ и, следовательно, больше потери в диэлектрике. По значению $\operatorname{tg} \delta$ представляется возможным оценивать качество диэлектрика: чем он выше, тем хуже диэлектрик. Для хороших диэлектриков $\operatorname{tg} \delta < 10^{-4}$.

Эквивалентные схемы замещения реального диэлектрика

Поскольку в реальном диэлектрике протекают активный I_a и реактивный I_r токи, его можно представить эквивалентной электрической схемой, содержащей идеальные сопротивление R и емкость C , которые обеспечивают протекание этих токов. Идеальные R и C могут быть соединены параллельно или последовательно. Поэтому принято рассматривать и анализировать две схемы замещения - параллельную и последовательную (рисунок 3.11).

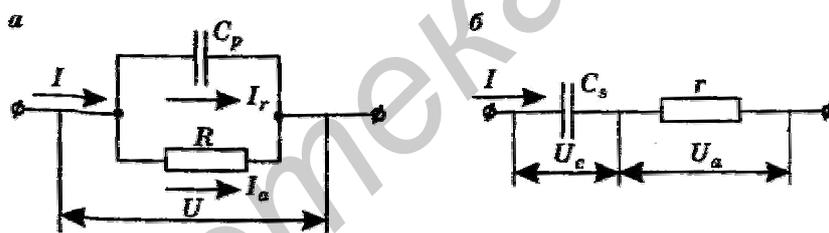


Рисунок 3.11 - Эквивалентные схемы замещения диэлектрика
а – параллельное; б – последовательное;

Условиями эквивалентности схем замещения реальному диэлектрику являются:

- равенство сдвига фаз между током I и напряжением U в реальном диэлектрике и в схеме замещения;
- равенство мощности, выделяемой в схеме замещения, диэлектрическими потерям в реальном диэлектрике.

Векторные диаграммы токов и напряжений для каждой из схем замещения (рисунок 3.12) позволяют рассчитать $\operatorname{tg} \delta$ и мощность, теряемую в диэлектрике.

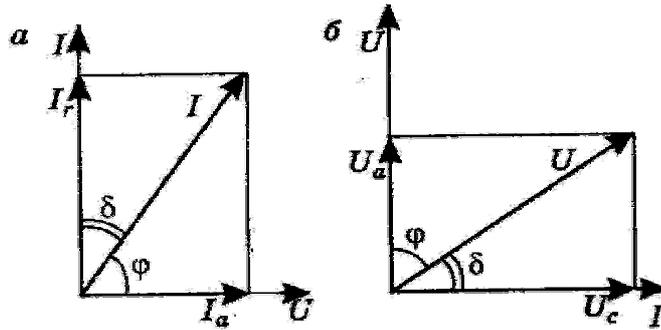


Рисунок 3.12 - Векторные диаграммы эквивалентных схем замещения:

а — параллельной;
б — последовательной.

Согласно векторной диаграмме (рисунок 3.12, а), для параллельной схемы замещения

$$I_a = \frac{U}{R}, I_r = \frac{U}{x_c} = \omega C_p U \text{ и } \operatorname{tg} d = \frac{I_a}{I_r} = \frac{1}{\omega C_p R}. \quad (3.12)$$

Из (3.12) следует

$$\frac{1}{R} = \omega C_p \operatorname{tg} d. \quad (3.13)$$

Поскольку мощность, теряемая в диэлектрике, определяется только активной составляющей тока, то с учетом (3.13)

$$W_{\text{нап}} = UI_a = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} d. \quad (3.14)$$

Из векторной диаграммы для последовательной схемы замещения (рис.3.12, б) следует, что $\operatorname{tg} d = U_a/U_c$. В свою очередь $U_a = Ir$, $U_c = Ix_c$ и, таким образом,

$$\operatorname{tg} d = \frac{Ir}{Ix_c} = r\omega C_s, \quad (3.15)$$

откуда

$$r = \frac{\operatorname{tg} d}{\omega C_s}. \quad (3.16)$$

Мощность, теряемая в диэлектрике, представленном последовательной схемой замещения, равна

$$W_{\text{noc}} = IU_a = I^2 r. \quad (3.17)$$

Значение I^2 можно определить, если учесть, что

$$U^2 = U_a^2 + U_c^2 = (Ir)^2 + (Ix_c)^2 = I^2(r^2 + x_c^2), \quad (3.18)$$

откуда

$$I^2 = \frac{U^2}{r^2 + x_c^2}. \quad (3.19)$$

Подставляя полученное выражение в (3.17), с учетом (3.16) получим

$$W_{\text{noc}} = \frac{U^2}{r^2 + x_c^2} = \frac{U^2 \operatorname{tg} d}{wC_s \left(\frac{\operatorname{tg}^2 d}{w^2 C_s^2} + \frac{1}{w^2 C_s^2} \right)} = \frac{U^2 w C_s \operatorname{tg} d}{1 + \operatorname{tg}^2 d} \quad (3.20)$$

Из (3.14) и (3.20) следует, что для обеих схем замещения мощность потерь пропорциональна $\operatorname{tg} d$, ω и U^2 . Следовательно, правомерно характеризовать потери в диэлектрике количественным параметром $\operatorname{tg} d$.

Для хорошего по качеству диэлектрика $\operatorname{tg} d < 10^{-4}$, поэтому знаменатель выражения (3.20) равен единице, и оно аналогично выражению (3.14). Следовательно, для анализа и расчета мощности потерь хороших диэлектриков можно пользоваться любой из схем замещения. В этом случае $W_{\text{noc}} = W_{\text{пар}}$, $C_p = C_s$ и $R \gg r$.

Для диэлектриков с малым значением сопротивления r , т.е. с большими токами утечки и, следовательно, большими потерями, предпочтительно пользоваться последовательной схемой замещения. Это относится к диэлектрикам, у которых $\operatorname{tg} d < 5 \cdot 10^{-2}$.

Пробой диэлектрика и виды пробоя

Электрическим пробоем называют явление, приводящее к длительному или кратковременному образованию в диэлектрике канала с высокой электропроводностью. Естественно, что в этом случае диэлектрик теряет электроизоляционные свойства. Значение напряжения, при котором происходит пробой, называется пробивным напряжением $U_{\text{пр}}$, а соответствующая ему напряженность поля $E_{\text{пр}}$ - электрической прочностью диэлектрика, имеющей размерность [В/м], поскольку

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d} \quad (3.21)$$

Значение $U_{\text{пр}}$ зависит от толщины диэлектрика d . Чем больше d , тем большее напряжение требуется для образования канала высокой проводимости т.е. пробоя. Величина $E_{\text{пр}}$ нормирована по толщине и поэтому является количественной мерой электрической прочности, т.е. качества диэлектрика.

Для надежной работы любого радиотехнического устройства необходимо, чтобы рабочее напряжение U_p было меньше пробивного $U_{\text{пр}}$. Отношение $U_p/U_{\text{пр}}$ называют коэффициентом электрической прочности изоляции.

В зависимости от того, какими причинами обусловлено появление канала высокой проводимости, различают механизмы пробоя. Для твердых диэлектриков механизмами пробоя являются:

- электрический;
- тепловой;
- электрохимический.

Электрическим пробоем называется пробой, развитие которого обусловлено только разрывом связей между частицами диэлектрика в результате приложенного к диэлектрику напряжения.

Тепловой пробой возникает в случае, когда количество теплоты, выделяющееся в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает количество теплоты, которое может быть рассеяно в окружающую среду. В результате температура изделия увеличивается, что и приводит к пробую.

Электрохимический пробой имеет место в диэлектриках при повышенных температурах и влажности воздуха, когда в материале развиваются процессы, приводящие к необратимому уменьшению сопротивления, т.е. к электрохимическому старению, при котором возможны изменение химического состава вещества и ухудшение электрической прочности.

Таким образом, рассмотренные вопросы физики диэлектриков позволяют выделить основные количественные параметры, характеризующие качество диэлектриков. Таковыми являются:

- диэлектрическая проницаемость ϵ ;
- удельное сопротивление ρ_v, ρ_s ,
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$;
- электрическая прочность $E_{\text{пр}}$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение диэлектрика.
2. Что является количественной характеристикой (мерой) способности диэлектрика поляризоваться?
3. Что такое поляризация и в чём она проявляется?
4. Какие существуют механизмы поляризации?
5. Как связана частотная зависимость ϵ с механизмами поляризации?
6. Что является количественной мерой электропроводности?
7. Какими параметрами пользуются на практике для характеристики электропроводности?
8. Дайте определение подвижности носителей зарядов.
9. Какие токи протекают в диэлектрике?
10. Дайте определение ρ_v и ρ_s . В каких единицах они измеряются?
11. Как понимать потери в диэлектриках и в чём выражается это явление?
12. Назовите причины возникновения потерь в диэлектриках.
13. Что является количественным параметром, характеризующим потери в диэлектрике?
14. Что такое угол и тангенс угла диэлектрических потерь?
15. Изобразите схемы замещения диэлектриков и соответствующие им векторные диаграммы токов и напряжений.
16. Назовите условия эквивалентности схем замещения реальным диэлектрикам.
17. Для чего используются схемы замещения?
18. Что такое пробой диэлектрика? Дать определение.
19. Перечислите и охарактеризуйте механизмы пробоя диэлектриков.
20. Что является количественным параметром, характеризующим явление пробоя и, в каких единицах он измеряется?
21. Перечислите количественные параметры, характеризующие основные свойства диэлектриков.

3.2. Диэлектрические материалы

Классификация диэлектрических материалов

Диэлектрический материал - материал, предназначенный для использования его диэлектрических свойств.

Электроизоляционный материал - диэлектрический материал, предназначенный для электрической изоляции.

Строгая классификация диэлектрических материалов по какому-либо общему признаку весьма затруднительна. Поэтому существует несколько классификационных признаков, используемых в настоящее время.

По поведению в электромагнитном поле диэлектрики делятся на *пассивные* (неуправляемые) и *активные* (управляемые).

По функциям, выполняемым в радиоэлектронной аппаратуре диэлектрики можно разделить на *электроизоляционные* и *конденсаторные* материалы.

К электроизоляционным материалам относятся диэлектрики с малыми токами утечки. В то же время один и тот же диэлектрик может быть и электроизоляционным материалом, и конденсаторным, для чего достаточно удовлетворять основным функциональным требованиям. Так, для электроизоляционного материала ε должна быть минимальной, а для конденсаторного - как можно выше. Эти требования связаны с необходимостью уменьшения паразитных связей и размеров конденсаторов.

По агрегатному состоянию диэлектрики классифицируются на *газообразные*, *жидкие* и *твердые*. Области применения и количество типов материалов существенно различаются, поэтому в данном учебном пособии рассмотрены только самые распространенные из них.

Газообразные диэлектрические материалы

В таблице 3.1 представлены характеристики некоторых газообразных диэлектрических материалов, используемых в технике. Они характеризуются малым значением ε и $tg\delta$, высоким ρ_v и невысоким значением $E_{пр}$ по сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками. В частности, электрическая прочность воздуха $E_{пр.возд} \sim (3...5)$ МВ/м.

Таблица 3.1

Количественные параметры газообразных диэлектриков

Газ	Химическая формула	Полярность газа	ε на низких частотах	ρ_v , Ом·м	$tg \delta$	$\frac{E_{np.газа}}{E_{np.возд}}$
Воздух	-	-	1,00059	$1,7 \cdot 10^{15}$	10^{-8}	1
Водород	H_2	Нейтральный	1,00027	10^{15}	-	0,6
Кислород	O_2	->>-	1,00055	10^{15}	$4 \cdot 10^{-6}$	0,9
Азот	N_2	->>-	1,00058	10^{15}	$4 \cdot 10^{-6}$	1
Гелий	He	->>-	1,00007	10^{15}	-	0,06
Аргон	Ar	->>-	1,00056	$1,7 \cdot 10^{15}$	-	-
Элегаз (гексафторид серы)	SF_6	Полярный	1,00191	-	-	2,5
Фреон (дихлордифторметан)	CCl_2F_2	Нейтральный	-	-	-	2,6
Пары хлороформа	$CHCl_3$	Полярный	-	-	-	4,2
Пары четыреххлористого углерода	CCl_4	Нейтральный	-	-	-	6,4

Достоинством газообразных диэлектриков является восстановление электрической прочности после снятия пробивного напряжения и стабильность свойств во времени.

Особенностью газообразных диэлектриков является необходимость их применения с твердыми диэлектриками.

Электрическая прочность некоторых газов гораздо выше, чем у воздуха. Это связано со способностью их молекул захватывать свободные электроны и превращаться в малоподвижные ионы, что затрудняет развитие пробоя. Явление используют в технике для увеличения электрической прочности газовой изоляции.

Наиболее широко используется в технике элегаз, поскольку он не токсичен, химически инертен, не реагирует с металлами, не разлагается под действием воды, кислот, щелочей; допускает сжатие до 2 МПа при нормальной температуре и допускает нагрев до 150 °С. Используют элегаз в образцовых конденсаторах на рабочих напряжениях до 500 кВ, в высоковольтных кабелях под давлением 0,3...0,5 МПа, в высоковольтных выключателях с напряжением до 750 кВ.

Газы с малой электрической прочностью, такие, как *He, Ne, Ar, Xe* и др., используют в газоразрядных и осветительных приборах, в частности, в рекламных стендах и уличных цветочных украшениях.

Жидкие диэлектрические материалы

Основные классы жидких диэлектрических материалов представлены в виде схемы на рисунок 3.13, а их основные диэлектрические свойства приведены в таблице 3.2

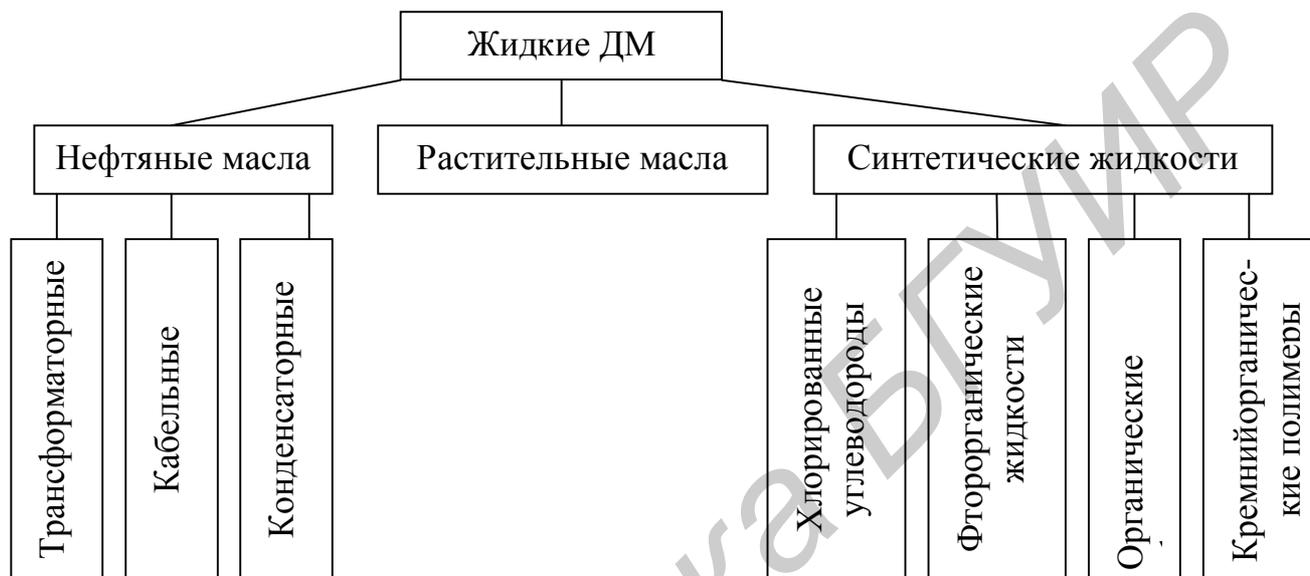


Рисунок 3.13 - Классификационная схема жидких диэлектрических материалов (ДМ)

Таблица 3.2

Параметры жидких диэлектрических материалов

Наименование материала	ρ_v , Ом·м	ϵ	$tg \delta$	$E_{пр}$, МВ/м	Примечание
Трансформаторные масла	10^{13}	2,2	$3 \cdot 10^{-3}$	15...40	
Кабельные масла	$10^{14} \dots 10^{15}$	2,0	$2 \cdot 10^{-3}$	20	
Конденсаторные масла	10^{14}	2,1	$5 \cdot 10^{-3}$	20...50	
Хлорированные углеводороды	$10^{13} \dots 10^{14}$	5,0	$(2..0,8) \times 10^{-3}$	20...22	
Фторорганические соединения	$10^{12} \dots 10^{13}$	2,0	$5 \cdot 10^{-4}$	20	$T_p \leq (400 \dots 500) \text{ } ^\circ\text{C}$
Органические эфиры	10^{13}	3...4	$3 \cdot 10^{-4}$	20	ϵ и $tg \delta$ не зависят от температуры среды; с ростом частоты внешнего поля $tg \delta$ падает
Кремнийорганические полимеры или полисилоксаны	10^{12}	2...2,8	$3 \cdot 10^{-4}$	20	ϵ и $tg \delta$ слабо зависят от частоты внешнего поля и температуры среды

Электрические свойства нефтяных масел зависят от степени их очистки от смол, кислот, щелочей, воды и газов.

Трансформаторные масла используют для заполнения трансформаторов и высоковольтных масляных выключателей. Заполняя поры в изоляции и промежутки между деталями трансформатора, масло повышает электрическую прочность изоляции и улучшает в 28 раз отвод тепла в окружающую среду по сравнению с воздухом.

В высоковольтных выключателях при разрыве контакта возникает дуговой разряд. Если это происходит в масле, то под действием высокой температуры образуются газы под большим давлением, что приводит к гашению разряда, т.е. масло обладает дугогасящими свойствами.

Конденсаторное масло отличается от трансформаторного особо тщательной очисткой и применяется для пропитки бумажных конденсаторов.

Кабельное масло используют для пропитки бумажной изоляции кабелей и заполнения маслonaполненных кабелей на рабочие напряжения до 35 кВ.

Хлорированные углеводороды, в частности совол, применяют для пропитки и заливки бумажных силовых и радиоконденсаторов с повышенной удельной емкостью, рассчитанных на большие рабочие напряжения.

Фторорганические жидкости характеризуются высокой химической инертностью, негорючи и имеют высокую стабильность свойств при температурах до 500 °С. Применяются для пропитки и заливки конденсаторов и трансформаторов, для охлаждения выходных каналов клистронов и т.д.

Органические эфиры используют в высокочастотных конденсаторах, так как $tg\delta$ уменьшается с ростом частоты внешнего поля и, кроме того, ϵ и $tg\delta$ слабо зависят от температуры среды.

Используются для смазки и пропитки волокнистых материалов, стекла, керамики, пластмасс, а также применяются в качестве масел в вакуумных насосах. Обладают высокой термостойкостью и химической инертностью.

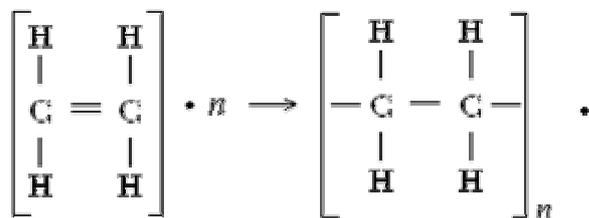
Жидкие диэлектрики растительного происхождения в радиоэлектронной аппаратуре практически не используются.

Твердые органические диэлектрические материалы

Из-за огромного многообразия твердых диэлектрических материалов не представляется возможным привести их четкую классификацию. Поэтому ограничимся делением на *органические* и *неорганические* материалы и в каждой из этих групп рассмотрим наиболее известные и широко применяемые в электронике.

Среди органических диэлектриков наибольшее распространение получили полимерные электроизоляционные материалы. Полимеры — это высокомолекулярные соединения, состоящие из большого числа повторяющихся звеньев, образованных исходными мономерами.

Существует два основных метода синтеза полимеров: полимеризация и поликонденсация.



Полимеризация - это реакция соединения молекул мономера в макромолекулы полимера по схеме $nA \rightarrow A_n$, где n - коэффициент полимеризации. Под действием температуры и высокого давления, например при образовании полиэтилена, непрочная двойная связь между атомами углерода разрывается, и молекулы соединяются друг с другом в цепочку, в которой $n > 1250$, а масса макромолекулы $M > 35000$ а.е.м.

Обычно в результате реакции полимеризации получают линейные полимеры. Они эластичны, могут образовывать гибкие и прочные волокна и пленки, легко размягчаются и расплавляются. Благодаря таким свойствам их называют термопластичными.

Поликонденсация - это реакция образования полимеров, при которой происходят отщепление низкомолекулярных продуктов и замещение или обмен между функциональными группами исходных мономеров. В результате поликонденсации получают материалы, которые обладают большой жесткостью, нерастворимы, расплавляются при высоких температурах, а многие еще до температуры плавления разрушаются химически, обугливаются или сгорают. Они не способны к образованию волокон и пленок. Благодаря изменению химического состава исходного мономера такие материалы называются терморезистивными.

Нагревостойкость органических полимеров менее 100°C . Поэтому для ее повышения синтезированы фтор- и кремнийорганические соединения. Если в этилене C_2H_4 заменить водород на фтор, то, поскольку энергия связи $C-F$ значительно больше, чем $C-H$, нагревостойкость повышается.

Кремнийорганические соединения содержат силоксановую группу - $-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-O-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-$, в которой свободные связи Si могут быть насыщены органическими радикальными группами CH_3 - метила, C_2H_5 - этила, C_6H_5 - фенила и т.д. Поскольку энергия связи $Si-O$ достаточно прочная, нагревостойкость кремнийорганических соединений достигает $250...300^\circ\text{C}$.

Свойства некоторых органических диэлектрических материалов приведены в табл.3.3, а основные характеристики приведены ниже.

Полиэтилен - термопластичный полимер, получаемый в виде гранул, на основе которых изготавливают более 20 марок материалов, пленку, пенопласт и фасонные изделия. Полиэтилен - высокочастотный диэлектрик, применяемый для изоляции ВЧ-кабелей, в радиолокационных и телеустановках, радиоаппаратуре и для изготовления деталей. Наиболее ценное его свойство - практическая независимость ϵ и $tg\delta$ от частоты внешнего поля и температуры.

Полиизобутилен мягче и пластичнее полиэтилена, гигроскопичен, стоек к химическим реагентам. Его добавляют в полиэтилен при изготовлении изоляции ВЧ-кабелей, а также вводят в состав лаков и компаундов.

Полистирол - твердый, прозрачный материал, используемый в конденсаторах с малым $tg\delta$, для изоляции ВЧ-кабелей, изготовления деталей, пленок и пенопластов. Недостаток - низкая температура размягчения, старение.

Таблица 3.3

Количественные параметры органических диэлектрических материалов

Название материала	Химическая формула	ρ_v , Ом·м	ε	$tg\delta$	$E_{пр}$ МВ/м	Нагревостойкость °С	Моро-зостойкость °С	Относительное удлинение $\Delta l/l$, %
Полиэтилен $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C} = \text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	$10^{14} \dots 10^{15}$	2...2,5	$(2 \dots 3) \times 10^{-4}$	40... 125	110...125	-(60...70)	150...900
Полиизобутилен $\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C} \begin{array}{l} \diagup \text{CH}_3 \\ \diagdown \text{CH}_3 \end{array} \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	$10^{13} \dots 10^{14}$	2,2...2,3	$(3 \dots 5) \times 10^{-4}$	15... 20	80	-60	550...900
Полистирол $\text{H}_2\text{C} = \text{C} \begin{array}{l} \diagup \text{H} \\ \diagdown \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]_n$	$10^{14} \dots 10^{16}$	2,5...2,6	$(2 \dots 4) \times 10^{-4}$	20... 110	80...85	-40	1...4
Поливинилхлорид $\text{H}_2\text{C} = \text{C} \begin{array}{l} \diagup \text{H} \\ \diagdown \text{Cl} \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right]_n$	$10^{12} \dots 10^{13}$	3,5...4,5	$(1 \dots 5) \times 10^{-2}$ 1 МГц	20... 50	75	-50	50...150
Фторопласт-3 $\text{F}_2\text{C} = \text{C} \begin{array}{l} \diagup \text{F} \\ \diagdown \text{Cl} \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{Cl} \end{array} \right]_n$	$10^{14} \dots 10^{15}$	3,0	$(1 \dots 2) \times 10^{-2}$ 1 МГц	15... 20	125...200	-(200... 250)	125...200
Фторопласт-4 $\text{F}_2\text{C} = \text{CF}_2$	$\left[\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right]_n$	$10^{14} \dots 10^{16}$	1,9...2,2	$(2 \dots 3) \times 10^{-4}$	40... 150	300	-270	250...350
Лавсан		$10^{14} \dots 10^{16}$	3,0...3,5	$(2 \dots 20) \times 10^{-4}$ 1 МГц	30... 120	150	-80	
Капрон		10^{11}	5,0...6,0	$6 \cdot 10^{-2}$ 1 МГц	20	130	-35	
Оргстекло		10^{14}	3,5	$(2 \dots 6) \times 10^{-2}$	15... 20	70...90	-(50...80)	2...10
Клей БФ		$10^{10} \dots 10^{13}$	3,0...3,8	$(2 \dots 6) \times 10^{-2}$	50... 70			
Синтетический каучук – бутадиеновый СК-Б		10^{15}	2,7...3,0	$5 \cdot 10^{-4}$				

Примечание. Значения $tg\delta$ приведены для частоты 50 Гц, за исключением оговоренных значений в таблице.

Поливинилхлорид - термопластичный полимер, растворимый в дихлорэтано, нитробензоле; устойчив к действию влаги, кислот, щелочей. Легко окрашивается в различные цвета и обрабатывается. Применяется для изготовления защитных оболочек проводов и кабелей низкочастотной аппаратуры. Изготавливается в виде трубок, лент, листов.

Фторопласт-3 - твердый белый материал, растворимый в бензоле, толуоле, не смачивается водой. Из-за большого значения $tg\delta$ применение на высоких частотах ограничено. Используется для изготовления изоляции кабелей.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен, тефлон, фторолон) - твердый белый материал с абсолютной химической стойкостью, не растворяется ни в одном из известных растворителей, не гигроскопичен, негорюч. Исключительно высокие электроизоляционные свойства вплоть до 10^{10} Гц и 200°C . Самый тяжелый из всех полимеров, хорошо обрабатывается. Является лучшим ВЧ и СВЧ диэлектриком. Из него изготавливают пленки, листы, фасонные изделия, втулки, подшипники скольжения и т.д.

Органическое стекло - конструкционный материал с невысокими диэлектрическими свойствами. Хорошо обрабатывается, склеивается, химически и влагостоек.

Все полимеры получают в виде порошков и гранул, из которых посредством формовки и прессования изготавливают листы, трубы, тонкие пленки, нити, композиционные пластмассы и пенопласты.

Пластмасса - это композиция (смесь) полимера, наполнителя, пластификатора и красителя. Изделия из пластмасс изготавливаются методом горячего прессования или литьем под давлением. Из пластмасс изготавливают корпуса приборов, ламповые панели, кнопки, ручки, розетки, разъемы, переключатели, различные конструкционные детали и т.д.

Пенопласты - твердые и эластичные материалы, содержащие большое количество газовых включений. Получают путем полимеризации вспененной водной эмульсии или введением в пресс-порошок газообразователей, разлагающихся при температуре прессования. Обладают малой плотностью, влагостойки, прочны. Имеют высокие электро-, термо- и звукоизоляционные свойства. Лучшие пенопласты на основе полиэтилена и полистирола имеют $tg\delta = (1...3) \cdot 10^{-4}$.

Эластомеры (синтетические каучуки) - полимеры, характеризующиеся высокой эластичностью, малой газо- и влагопроницаемостью и относительно хорошими диэлектрическими свойствами. Предназначены для замены натурального каучука при изготовлении резины. Наиболее распространенный из них - бутадиеновый, получаемый полимеризацией газообразного бутадиена по схеме $H_2C = CH - CH = CH_2 \rightarrow [-CH_2 - CH = CH - CH_2 -]_n$. Лучшими механическими, химическими и электроизоляционными свойствами обладают кремний-, фторорганические и полиуретановые каучуки с нагревостойкостью до $300...400^\circ\text{C}$.

К органическим диэлектрическим материалам, которые в процессе изготовления электроизоляционных изделий находятся в жидком, а в процессе эксплуатации - в твердом состоянии, относятся лаки, клеи, компаунды.

Лаки - это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел, составляющих основу лака, в летучих растворителях. После испарения растворителя основа лака переходит в твердое состояние в виде пленки.

По составу электроизоляционные лаки делятся на:

полимерные, смоляные, каучуковые, полистирольные, поливинилхлоридные, эскапоновые на основе синтетических каучуков, эпоксидные, кремнийорганические, бакелитовые;

эфирно-целлюлозные, нитроцеллюлозные;

масляные, масляно-смоляные, масляно-битумные, масляно-глифталевые.

По виду применения электроизоляционные лаки делятся на три группы.

Пропиточные (маловязкие) служат для пропитки пористой, волокнистой изоляции из бумаги, картона, пряжи, ткани и т.д.

Покровные (красящие) лаки используют для защиты поверхностей от внешних воздействий.

Клеящие (вязкие) предназначены для склеивания твердых электроизоляционных материалов и их приклеивания к металлам.

Клеи - вязкие пленкообразующие жидкости, обладающие высокой адгезией (сцеплением) к большинству материалов. Карбонильный клей склеивает керамику, стекло, слюду, дерево, бумагу, картон, пластмассы, металлы с металлами. Область рабочих температур ± 60 °С.

Клей БФ изготавливают посредством соединения поливинилацетата и фенолформальдегидных смол. Служит для склеивания металлов друг с другом и для получения шва толщиной 0,05...0,15 мм, работающего при повышенных температурах.

Эпоксидные клеи отличаются хорошей адгезией ко многим материалам: металлам, керамике, стеклам. В зависимости от отвердителя могут затвердевать при комнатной температуре. Рабочие температуры до 300 °С.

Компаунды представляют собой смеси органических изоляционных веществ в вязком состоянии. Для улучшения электрических и механических свойств в смеси вводят наполнители. За счет повышения температуры или введения отвердителей происходят полимеризация и переход смеси в твердое состояние.

Компаунды предназначены для пропитки пористых диэлектриков и для заливки достаточно больших полостей между деталями. Как пропиточные, так и заливочные компаунды служат для увеличения электрической и механической прочности изделий, защиты от внешней среды и улучшения теплоотдачи. Наиболее распространенными являются полиуретановые, кремнийорганические и эпоксидные компаунды.

Достаточно широкое применение в электро- и радиотехнике приобрели *волокнистые диэлектрические материалы*. По виду исходного сырья они делятся на материалы из:

растительных волокон (бумага, картон, хлопчатобумажная пряжа, ткани);

животных волокон (натуральный шелк);

искусственных волокон (ацетатный, вискозный шелк);

неорганических волокон (стекловолокно, асбест).

Все волокнистые материалы содержат поры объемом до 40...50%, благодаря чему они имеют высокую гигроскопичность и низкие

электроизоляционные свойства. Для устранения этого недостатка их подвергают сушке и пропитке. Наиболее распространенными материалами являются бумага, картон, нити, ткани. На их основе изготавливают текстильные диэлектрические материалы и слоистые пластики.

Бумага изготавливается из целлюлозы, представляющей собой полимерное органическое вещество ($C_6H_{10}O_5$), которое получают из древесины хвойных пород. По области применения бумагу подразделяют на конденсаторную - толщиной 0,004...0,022 мм и кабельную - толщиной 0,05 мм. Эти сорта бумаги отличаются малой толщиной, высокой плотностью и малым содержанием воды. Конденсаторная бумага имеет $\varepsilon = 3,7$ и $tg\delta=(2...3)\cdot 10^{-3}$ и используется для изготовления бумажных, металобумажных, проходных конденсаторов. Кабельная бумага применяется для изоляции телефонных и телеграфных кабелей связи. Для улучшения свойств бумагу пропитывают, благодаря чему электрическая прочность увеличивается почти в 10 раз и достигает значения $E_{пр}=(250...300)$ МВ/м.

Пряжа хлопчатобумажная, получаемая из длинных волокон хлопчатника, применяется для изоляции проводов и шнуров путем обмотки и оплетки. На основе пряжи изготавливают ткани и ленты.

Натуральный шелк получают из нитей шелкопряда диаметром 0,01...0,015 мм и используют для изоляции проводов и изготовления тканей. Шелковая изоляция механически более прочна, нежели хлопчатобумажная, и позволяет уменьшить толщину изоляции.

Искусственный шелк (вискозный или ацетатный) получают переработкой эфиров целлюлозы, позволяющих получать тонкие нити. По электрическим свойствам изоляция из вискозного шелка лучше, чем хлопчатобумажная, а из ацетатного - превосходит даже натуральный шелк.

Синтетические волокна типа капрон, лавсан и др. применяют в случаях, когда необходима повышенная механическая прочность изоляции гибких проводников и шнуров.

Стекловолокно и асбест, являясь волокнистыми диэлектрическими материалами, относятся к классу неорганических диэлектриков.

Стекловолокно применяют при повышенных температурах и влажности. Обладает хорошими электроизоляционными свойствами, достаточно хорошей механической прочностью и малой гигроскопичностью. Из стекловолокна толщиной 0,07...0,28 мм ткнут стеклоленты, ткани.

Недостатком материала является недостаточная эластичность ($\Delta l/l\sim 2\%$) и малая сопротивляемость к истиранию.

Асбест ($3MgO\cdot 2SiO_2\cdot 2H_2O$) - единственный в природе неорганический волокнистый материал. Он обладает низкими диэлектрическими свойствами, но имеет существенное преимущество - нагревостойкость до 400 °С, что и определяет его применение в термоэлектрических приборах.

Лакоткани получают путем пропитки хлопчатобумажных (ЛХ), шелковых (ЛШ) и стеклотканей лаками. Их толщина составляет 0,15...0,25 мм. Электрические свойства ЛШ характеризуются $\rho_v=10^{10}$ Ом-м, $\varepsilon=4$, $tg\delta=0,05...0,15$, $E_{пр}=35$ МВ/м. Шелковая лакоткань тоньше, менее чувствительна к перегибам и имеет $E_{пр}=70$ МВ/м. Стеклолакоткани с кремнийорганической пропиткой

используют при высоких температурах. Применяют лакоткани для изоляции обмоток трансформаторов, деталей при монтаже, изоляции жгутов и т.д.

Широко распространенными диэлектрическими материалами конструкционного назначения являются *слоистые пластики*.

Диэлектрические свойства слоистых пластиков, изготавливаемых на основе волокнистых и текстильных диэлектрических материалов, приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Основные электрофизические параметры слоистых пластиков

Материал	Основа	ρ_v , Ом·м	ϵ	$tg\delta$	$E_{пр}$ МВ/м	$T_{раб}$, °С
Гетинакс	Бумага	$10^8 \dots 10^{11}$	6...7	0,035...0,08	33	до 150
Текстолит	Хлопчато- бумажная ткань	$10^6 \dots 10^8$	8	0,07	4...8	125
Стекло- текстолит	Стекло- ткань	10^{11}	7	0,02	18	180

Слоистые пластики изготавливают путем горячей прессовки исходного материала (основы), пропитанного фенолформальдегидными или другими смолами либо кремнийорганическим лаком (в случае получения стеклотекстолита). Пропитанный материал нарезают, собирают в пачку нужной толщины и прессуют. Пропиточный материал заполняет поры между волокнами и слоями и при отверждении прочно связывает отдельные слои и одновременно повышает диэлектрические свойства.

Гетинакс используют для изготовления печатных плат низкочастотной аппаратуры, предварительно облицовывая его с одной или двух сторон медной фольгой.

Текстолит стоек к ударным нагрузкам, поэтому его применяют в переключателях, выключателях и для изготовления фасонных изделий путем механической обработки.

Стеклотекстолит применяют для изготовления печатных плат и различных деталей.

Неорганические диэлектрические материалы

Неорганические диэлектрические материалы представляют собой не менее разнообразную группу, нежели органические. Основой для их изготовления являются природные материалы и вещества. По виду исходного материала и методам получения представляется возможным их классифицировать на три группы, неравнозначные по количеству материалов:

- природные и синтетические слюдяные материалы;
- стекла;
- керамика.

Диэлектрические свойства материалов первой группы представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Количественные параметры слюдяных диэлектрических материалов

Материал	ρ_v , Ом·м	ε	$tg\delta$	$E_{пр}$ МВ/м	$T_{раб}$, °С
Мусковит $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	$10^{12} \dots 10^{14}$	6...7	$3 \cdot 10^{-4}$	200	500...600
Флогопит $K_2O \cdot 6MnO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	$10^{11} \dots 10^{12}$	5...6	$15 \cdot 10^{-4}$	100	800...900
Фторфлогопит $KMg_3[Si_3AlO_{10}]F_2$	$10^{14} \dots 10^{15}$	6...7,5	$2 \cdot 10^{-4}$	300	1100
Микалекс	10^{12}	6...8,5	$(3 \dots 10) \times 10^{-3}$	10...20	300...350
Новомикалекс	$10^{10} \dots 10^{12}$	7,5...8	$8 \cdot 10^{-4}$	30	600

Слюда встречается в природе в виде кристаллов, способных расщепляться на пластины. Важнейшими модификациями слюды являются мусковит и флогопит. Из мусковита изготавливают конденсаторную слюду в виде пластин размером (7...60)х(4...50) мм толщиной $(25 \dots 55) \pm 5$ мкм и используют в качестве диэлектрика в разнообразных слюдяных конденсаторах (КСО, КСГ, СГМ).

Фторфлогопит - синтетическая слюда, которую получают искусственно, выращиванием кристаллов из расплава и используют в качестве изоляционных экранов в электронных лампах и в конденсаторах при рабочих температурах до 700 °С.

Микалекс получают на основе тонко размолотых порошков мусковита и легкоплавкого стекла и изготавливают в виде листов и стержней с последующей механической обработкой. Применяется в виде держателей мощных ламп, панелей, гребенок, корпусов катушек индуктивности, плат, переключателей и т.д. Допускает запрессовку металлических контактов.

Новомикалекс является смесью фторфлогопита и стекла и обладает лучшими свойствами, чем микалекс. Область применения та же, что и у микалекса.

Вторая группа неорганических диэлектрических материалов более разнообразна как по типам материалов, так и по областям их применения.

Стеклами называют неорганические квазиаморфные термопластичные вещества, представляющие собой смеси различных оксидов. Основой стекол являются стеклообразующие оксиды SiO_2 , B_2O_5 , P_2O_5 , которые совместно с оксидами щелочных (Na_2O , K_2O), щелочноземельных (BaO , CaO) и оксидов металлов (PbO , ZnO , Al_2O_3) составляют исходный продукт для варки стекол различного состава, а поэтому и различного назначения. По составу стекла классифицируются на:

- оксидные - на основе SiO_2 , GeO_2 , B_2O_5 , P_2O_5 ;
- галогенидные - на основе галогенидов (в основном BeF_2);
- халькогенидные - на основе сульфидов, селенидов, теллуридов.

По виду оксидов стекла классифицируют на силикатные, боросиликатные, алюмосиликатные, фосфатные и т.д.

Обобщенная технологическая схема производства стекол может быть представлена рядом операций:

- приготовление смеси (шихты) исходных материалов в необходимой пропорции;
- варка стекол в стекловаренных печах при температуре 1300...2100 °С, когда летучие вещества (H_2O , CO_2 , SO_3) удаляются, а оставшиеся оксиды реагируют между собой, образуя стекломассу;
- формование изделий методом выдувания, вытягивания, литья, прессования и достаточно быстрое охлаждение с целью получения аморфной структуры материала;
- отжиг для снятия напряжений, появляющихся из-за быстрого и неравномерного охлаждения;
- дополнительная обработка в виде шлифования, полирования, закалки, металлизации.

Изделия массового потребления, такие, как кинескопы, изоляторы, баллоны и ножки электровакуумных приборов, изготавливаются на автоматах.

Свойства стекол сильно зависят от их химического состава и режимов термообработки. В табл.3.6 приведены диэлектрические свойства стекол и коэффициент линейного расширения α_l , характеризующий стойкость к тепловым импульсам и способность сварки с металлами. При большой разнице α_l стекла и металла в месте сварки возникают трещины.

Таблица 3.6

Количественные параметры некоторых типов стекол и ситалла

Материал стекла	ρ_v , Ом·м	ε	$tg\delta$	$\alpha_l \times 10^6$, град ⁻¹
Бесщелочные	$10^{11} \dots 10^{13}$	4,2...7,5	$(2 \dots 10) \cdot 10^{-4}$	0,5...2
Щелочные натриевые	$10^6 \dots 10^7$	5,7...7,5	$(3 \dots 7) \cdot 10^{-3}$	2,6...5
Щелочные калиевые и калиево-натриевые	$10^8 \dots 10^{10}$	7...11	$(1,5 \dots 3) \cdot 10^{-3}$	2,6...9
Щелочные с содержанием оксидов тяжелых металлов	$10^9 \dots 10^{11}$	3,2...12,8	$(0,4 \dots 1,2) \cdot 10^{-3}$	2,1...3
Кварцевое	10^{14}	3,8	10^{-4} при 10^4 МГц	0,5
Ситалл СТ-50-1	$10^{12} \dots 10^{18}$	7,9...8	$4,5 \cdot 10^{-3}$ при 10^4 МГц	5

Примечание. Значение $tg\delta$ приведены для частоты 50 Гц за исключением оговоренных значений в таблице.

Следует отметить, что диэлектрические потери в стеклах обусловлены потерями от сквозной проводимости и релаксационными потерями, связанными с ионно-релаксационной поляризацией.

Стекла находят очень широкое применение в технике, поэтому целесообразно рассмотреть типы технических стекол с точки зрения их применения.

Кварцевое стекло характеризуется высокой прозрачностью в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра.

Используется в физических приборах, баллонах ламп высокого давления, для изготовления химической посуды, в качестве изолирующих слоев при производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Электровакуумные стекла используются для изготовления баллонов и ножек электровакуумных ламп. Подразделяются по коэффициенту линейного расширения α_l : на платиновые $\alpha_l=(8,5...9,5)\cdot 10^{-6}$ град⁻¹; молибденовые $\alpha_l=(4,6...5,2)\cdot 10^{-6}$ град⁻¹; вольфрамовые $\alpha_l=(3,5...4,2)\cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Могут спаиваться с металлами с близкими значениями α_l .

Изоляторные стекла обладают хорошими изоляционными свойствами, термо- и химически стойкие, хорошо металлизуются. Используются для изготовления установочных деталей, изоляторов и т.д.

Конденсаторные стекла применяются в качестве диэлектриков высокочастотных конденсаторов.

Оптические стекла имеют повышенные прозрачность и коэффициент преломления и применяются в физических и оптических приборах и устройствах. Свинцовое стекло применяют для защиты от радиации и изготовления хрустальных изделий.

Увиолетовые стекла - прозрачны для ультрафиолетовых лучей за счет малого содержания Fe_2O_3 и применяются для изготовления баллонов спектральных ламп.

Рентгеновские стекла прозрачны для рентгеновских лучей за счет наличия в составе элементов с малым атомным весом и применяются для изготовления рентгеновских трубок.

Лазерные стекла используются в оптических квантовых генераторах благодаря преимуществам перед монокристаллами: технологичность, однородность, легкость изготовления. Однако срок их службы меньше, чем рубиновых элементов.

Халькогенидные стекла - бескислородные сплавы сульфидов, селенидов, теллуридов мышьяка, сурьмы, фосфора, висмута и т.д. Благодаря тенденции к кристаллизации имеют весьма разнообразные свойства и широкий диапазон удельного сопротивления - $\rho_v = (0,1...10)^{12}$ Ом·м, значение которого может управляться электрическим напряжением или импульсами.

Стекловолокно применяют в качестве световодов, нагревостойкой изоляции, а также для изготовления стеклотканей, стекловаты и как наполнитель в пресс-порошках.

Стеклоэмали применяют для защиты поверхностей металлов от коррозии, для покрытия трубчатых резисторов, в качестве диэлектрика конденсаторов малой емкости.

Стекла с проводящей поверхностью обладают низким значением $\rho_s=(10...40)$ Ом и применяются в качестве обогревающих, незапотеваящих стекол, посуды для нагрева жидкостей, для фотоэлементов, а при больших ρ_s - в качестве пленочных резисторов. Стекла изготавливают на основе SnO_2 .

Цветные стекла используют в оптических и электроосветительных приборах. Цветность достигается за счет введения добавок: NiO - красный, GeO и UO_3 - желтый, Cr_2O_3 - зеленый, CuO - голубой, CaO - синий, MnO - фиолетовый и коричневый.

Ситаллы - стеклокристаллические материалы, получаемые путем стимулированной кристаллизации стекол специального состава. Кристаллизация осуществляется с помощью катализаторов, обеспечивающих образование тонкокристаллической структуры. Размер кристаллов (1...2) мкм, а процент кристаллизации - от 30 до 95%. Обладают прекрасными электроизоляционными свойствами и применяются в качестве подложек интегральных микросхем.

Керамические материалы

Достаточно широкий набор неорганических диэлектрических материалов, используемых в технике, представлен изделиями из керамики. Для современной радиокерамики характерны: высокая нагревостойкость, негигроскопичность, хорошие электроизоляционные свойства, механическая прочность, стабильность во времени и стойкость к внешним воздействиям.

Керамика представляет собой многофазную систему, главными фазами которой являются кристаллическая и стекловидная. Кристаллическая фаза определяет электромеханические свойства, а стекловидная - технологичность изготовления деталей.

Изготовление керамических изделий является очень сложным процессом, при проведении которого необходимо обеспечить заданный химический и минералогический состав керамики, минимизировать содержание газовой фазы и добиться необходимой точности размеров изделий. Все это требует тщательности проведения технологических операций. Процесс производства начинается с приготовления массы, компоненты которой подбирают по составу, размалывают и перемешивают в шаровых мельницах для получения однородности. Из полученной массы изготавливают заготовки изделий одним из методов:

- прессованием сухого порошка - при изготовлении плоских изделий небольшого размера;
- формованием на гончарном станке или в гипсовых формах - для изделий больших размеров и достаточно сложной формы;
- выдавливанием через мунштук или протяжкой с последующей механической обработкой - для изделий удлиненной формы (трубок, стержней, каркасов, колодок и т.д.);
- штампованием - для изделий массового производства и разнообразной конфигурации;
- литьем жидкой массы в специальные формы - при изготовлении изделий больших размеров и сложной конфигурации,

Обязательной операцией технологического процесса является обжиг заготовок - наиболее ответственная операция, так как время обжига, температура и состав среды (окислительная, восстановительная) определяют окончательную

пригодность изделия. Обжиг проводят в туннельных печах со строго заданным температурным градиентом и тщательным соблюдением скорости движения. Для улучшения качественного вида, механической прочности и электроизоляционных свойств изделия иногда покрывают глазурью. Для обеспечения возможности пайки проводят металлизацию керамики методом вжигания серебра.

Керамические диэлектрические материалы делятся на пассивные и активные. Пассивную керамику по назначению и электрическим свойствам делят на установочную и конденсаторную.

Установочная керамика должна иметь $\varepsilon < 10$, повышенную механическую прочность и хорошие электроизоляционные свойства. Применяется для изготовления опорных, проходных, подвесных изоляторов, ламповых панелей, каркасов катушек, деталей радиоламп. Большинство видов установочной керамики относится к высокочастотным диэлектрикам и имеют $\operatorname{tg} \delta \sim 2 \cdot 10^{-3}$ на частоте 1 МГц.

Конденсаторная керамика применяется для изготовления конденсаторов высокого и низкого напряжения и подразделяется на керамику с повышенным (более 12) и высоким (более 900) значением диэлектрической проницаемости ε .

Наиболее широкое распространение среди пассивных видов керамики получили материалы с кристаллической фазой системы $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$. К ним относятся радиофарфор, алюминоксид, ультрафарфор, корундомуллитовая и цельзиановая керамики. Основные свойства некоторых типов керамики приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Основные параметры некоторых типов керамики

Параметры	Тип керамики				
	муллитокремнеземистая (радиофарфор)	корундовая (ультрафарфор)		корундомуллитовая	цельзиановая
		УФ-46	УФ-53		
ρ_v , Ом·м	10^{10}	$10^{10} \dots 10^{12}$	$10^{11} \dots 10^{12}$	$10^{10} \dots 10^{11}$	10^{14}
ε	7...7,5	8...8,2	8...8,5	7...7,5	6,5...7
$\operatorname{tg} \delta$	$(3 \dots 4) \cdot 10^{-3}$	$(0,8 \dots 1) \cdot 10^{-3}$	$(3 \dots 5) \cdot 10^{-4}$	$(1,6 \dots 1,8) \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$E_{пр}$, МВ/м	18...20	20...25	25...30	30...35	35...45
α_1 град ⁻¹	$(5 \dots 6) \cdot 10^{-6}$	$(4,2 \dots 5,5) \cdot 10^{-6}$	$(4,5 \dots 5) \cdot 10^{-6}$	$(3,3 \dots 3,5) \cdot 10^{-6}$	$(2,1 \dots 2,2) \times 10^{-6}$
$TK_{\varepsilon, 1}$ град ⁻¹	$(20 \pm 10) \cdot 10^{-5}$	$(11 \pm 3) \cdot 10^{-5}$	$(11 \pm 2) \cdot 10^{-5}$	$(1,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$(6,5 \pm 0,5) \times 10^{-5}$

Примечание: химический состав муллита – $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, корунда – α -модификация Al_2O_3 , цельзиана - $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Некоторые виды керамики относятся к классу активных диэлектриков, свойства которых зависят от внешних воздействий и применяются в основном как сегнето- и пьезоэлектрики.

Активные диэлектрики нашли широкое применение в технике благодаря своим особым, управляемым свойствам. В силу ряда причин не представляется возможным рассмотрение явлений в активных диэлектриках, поэтому ограничимся лишь кратким упоминанием об основных их типах.

По явлениям, вызывающим поляризацию, активные диэлектрики делятся на сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и электреты.

Сегнетоэлектрики - материалы, обладающие в определенном интервале температур спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешним электрическим полем. Имеют высокое значение ϵ , что связано с их доменной структурой.

Пьезоэлектрики генерируют электрические заряды под действием механических напряжений или, наоборот, изменяют свои размеры под действием электрического поля.

Электреты - материалы, которые после поляризации электрическим полем могут длительно сохранять поляризованное состояние и создавать в окружающем их пространстве электрическое поле. Их можно представить в виде аналогов постоянных магнитов. К активным диэлектрикам относятся также пироэлектрики, электролюминофоры и материалы квантовой электроники.

Пироэлектрики характеризуются возникновением на их поверхности электрических зарядов при изменении температуры.

Электролюминофоры - материалы, излучающие свет под действием внешнего электрического поля.

Материалы квантовой электроники - широкий класс веществ, применяемых в качестве активных элементов квантовой электроники в виде активированных диэлектриков. Для этой цели используют твердые кристаллические и аморфные, жидкие и газообразные диэлектрики, содержащие специальные примеси, обеспечивающие излучение.

3.3. Конденсаторы

Конденсатором называют элемент электрической цепи, предназначенный для использования его емкости. Он способен накапливать электрические заряды на металлических электродах (обкладках) при приложении напряжения между ними.

Простейшим типом конденсатора является плоский конденсатор, состоящий из двух металлических пластин, между которыми располагается слой или пленки из диэлектрического материала. Количественным параметром, отражающим способность конденсатора накапливать электрические заряды, т.е. запасать электрическую энергию, является емкость конденсатора. Она определяется отношением заряда на обкладках конденсатора к напряжению, приложенному между ними. Величина емкости зависит от материала диэлектрика, геометрических размеров обкладок и расстояния между ними. Поэтому в основу классификации конденсаторов положено деление на группы по виду применяемого диэлектрика и

конструктивным особенностям. Вид диэлектрика определяет основные электрические параметры, а конструктивные особенности – область применения.

Классификация конденсаторов по различным признакам

Существуют различные классификационные признаки деления конденсаторов на группы и классы, как и у резисторов. Наиболее устоявшимися являются:

- по назначению – общего и специального назначения;
- по характеру изменения емкости – постоянные, переменные и подстроечные;
- по конструкции – пакетные, рулонные, дисковые, трубчатые, монолитные секционированные;
- по способу монтажа – для навесного и печатного монтажа, для микромодулей и микросхем
- по характеру защиты от внешних воздействий – незащищенные, защищенные, изолированные, изолированные, уплотненные и герметизированные;
- по виду диэлектрика – с органическим, неорганическим, газообразным и оксидным диэлектриком.

Конденсаторы общего назначения широко используются во всех видах аппаратуры. К этому классу относят низковольтные конденсаторы, подразделяемые на низкочастотные и высокочастотные, к которым не предъявляют особых требований.

К конденсаторам специального назначения относят высоковольтные, помехоподавляющие, проходные, разделительные, блокировочные, пусковые, импульсные, дозиметрические и др.

Постоянные конденсаторы изготавливаются на номинальные значения емкости в соответствии с определяемыми нормативными документами шестью рядами номинальных значений и допусками на отклонение от номинала. Значение емкости постоянных конденсаторов фиксировано, в процессе эксплуатации не регулируется и охватывает диапазон от единиц пФ до сотен тысяч мкФ.

Конденсаторы переменной емкости используются для первоначальной настройки колебательных контуров, электрических фильтров и т.п. Изменение значения емкости возможно в достаточно больших пределах от (3...5) до (1200...30000) пФ.

Подстроечные конденсаторы используются для незначительного изменения емкости при разовой и периодической регулировки аппаратуры в процессе ее эксплуатации. Диапазон регулирования емкости от 0,4 до 450 пФ.

Переменные и подстроечные конденсаторы изготавливаются с керамическим или воздушным диэлектриком, либо вакуумные. Изменение емкости таких конденсаторов может быть механическим за счет изменения площади перекрытия пластин при углах поворота (90...180) градусов.

В нелинейных конденсаторах на основе сегнетоэлектриков и сегнтокерамики регулирование емкости осуществляется подачей на обкладки внешнего напряжения. От его величины, точнее от напряженности поля в диэлектрике зависит значение диэлектрической проницаемости, а, следовательно, и емкость конденсатора. Такие конденсаторы называют варикондами. Их применяют для настройки колебательных

контуров. Изменяя емкость вариконда можно изменять резонансную частоту контура.

В термоконденсаторах, конструктивно являющиеся варикондами, изменение емкости осуществляется за счет изменения диэлектрической проницаемости, значение которой, а значит и емкость, зависят от температуры. Такие конденсаторы используются в кварцевых генераторах для стабилизации частоты.

В полупроводниковых конденсаторах используется $p-n$ – переход при приложении запирающего (обратного) напряжения. От его величины зависит ширина перехода, т.е. расстояние между проводящим и полупроводящим электродами. Это эквивалентно изменению толщины диэлектрика плоского конденсатора. Меняя величину приложенного напряжения можно изменять или регулировать значение емкости. Такие конденсаторы называются варикапами.

Значение емкости подстроечных конденсаторов может изменяться в (2...5) раз от номинала.

Варианты конструкций конденсаторов

Конструктивные особенности конденсаторов определяются как типом диэлектрического материала, так и конкретным назначением и применением в различных видах аппаратуры и изделий.

Для конденсаторов постоянной емкости одним из первых конструктивных решений были рулонная и пакетная конструкции (рисунок 3.14, 3.15). Такие типы конструкции характерны для бумажных, металобумажных, пленочных, слюдяных, стеклоэмалевых и некоторых других типов конденсаторов.

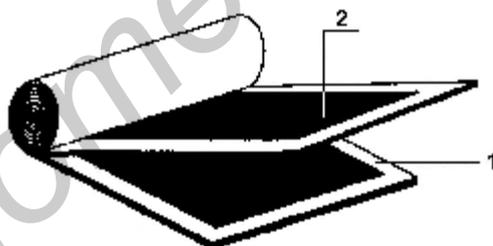


Рисунок 3.14 – Рулонная конструкция

- 1 – лента из конденсаторной бумаги;
- 2 – металлическая фольга.

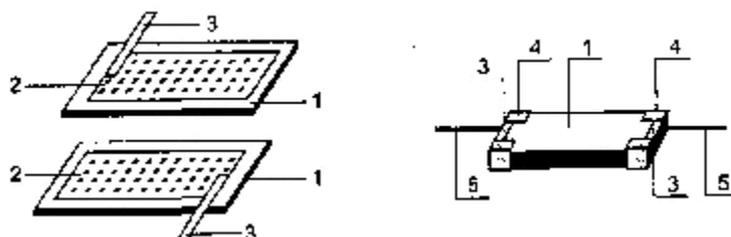


Рисунок 3.15 – Пакетная конструкция

- 1 – диэлектрический материал;
- 2 – металлические обкладки;
- 3 – контактные полоски из фольги;
- 4 – металлические обжимы;
- 5 – гибкие выводы.

В рулонных конструкциях в качестве диэлектрика используется лента из конденсаторной бумаги толщиной (5...6) мкм, либо пленка из органического диэлектрика (полистирол, фторопласт). Для электродов используют различные металлы (Al, Zn и др.) в виде фольги толщиной (10...20) мкм, либо пленки толщиной до 1 мкм, нанесенной на диэлектрик. Чередующиеся слои из металла и диэлектрика свертываются в круглый или прямоугольный рулон, который помещают в металлический корпус для обеспечения механической прочности конструкции. Значения емкости конденсаторов рулонной конструкции может достигать (10...30) мкФ.

Пакетная конструкция также представляет собой чередование металлических и диэлектрических слоев или пленок. Их собирают в пакет, который опрессовывается, покрывается влагозащитной эмалью или корпусируется специальными видами пластмасс.

Для конденсаторов на основе различных видов керамики наиболее характерны дисковая (рисунок 3.16), трубчатая (рисунок 3.17) и секционированная (рисунок 3.18) конструкции.

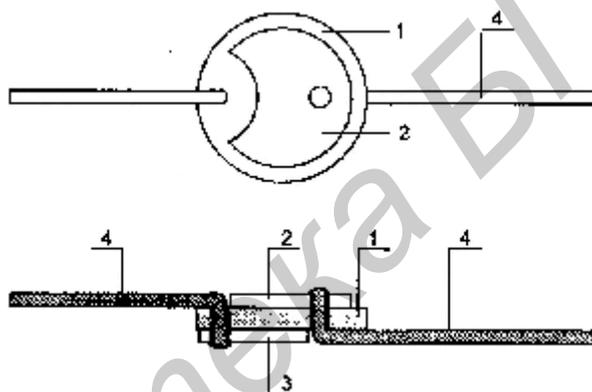


Рисунок 3.16 – Дисковая конструкция

- 1 – керамический диск;
- 2,3 – серебряные обкладки;
- 4 – гибкие выводы.

Дисковая конструкция представляет собой керамический диск, на обе стороны которого наносятся обкладки из серебра, вжигаемого в керамику. Величина емкости определяется площадью обкладок, значением диэлектрической проницаемости, которая может иметь значения до 90 и рассчитывается по формуле для плоского конденсатора.

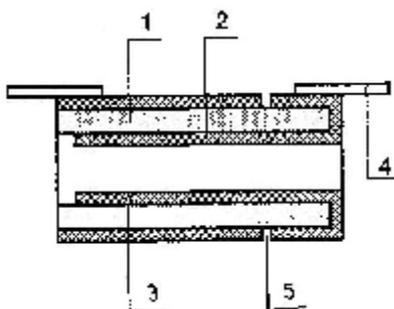


Рисунок 3.17 – Трубчатая конструкция

- 1 – керамическая трубка; 2,3 – серебряные обкладки;
- 4 – выводы; 5 – изолирующий пояс;

Трубчатая конструкция представляет собой керамическую трубку с толщиной стенок порядка 0,25 мм. На внешнюю и внутреннюю поверхность наносятся серебряные электроды. Внутренний электрод выводят на внешнюю поверхность с целью присоединения гибких выводов с внешней поверхности. На трубку с электродами наносится защитное покрытие из диэлектрического материала.

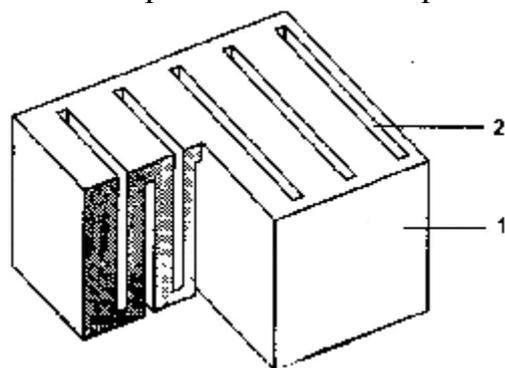


Рисунок 3.18 – Секционированная конструкция

- 1 – керамическая заготовка;
- 2 – прорезы для размещения металлических электродов

Секционированная конструкция изготавливается горячим литьем керамики в виде прямоугольной заготовки с прорезами навстречу друг другу с противоположных сторон заготовки. Толщина стенок между прорезами порядка 100 мкм, а ширина прорезей – порядка (130...150) мкм. Прорезы заполняются серебряной пастой, после вжигания которой в керамику получают металлические электроды. Наиболее часто такие конденсаторы используют в качестве навесных компонентов гибридных интегральных схем. Вся конструкция покрывается защитной диэлектрической пленкой за исключением контактных поверхностей, присоединяемых к контактными площадкам ГИС пайкой.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком являются полярными, т.е. имеют анод и катод. В качестве диэлектрика в них используется оксидный слой, с хорошими диэлектрическими свойствами, получаемый электрохимическим путем на аноде, т.е. на металлической обкладке из алюминия, тантала, ниобия. Толщина оксидного слоя очень мала, что увеличивает емкость конденсатора. Второй обкладкой конденсатора (катодом) является электролит, который пропитывает бумажную или тканевую прослойку в жидкостных алюминиевых и танталовых конденсаторах.

В танталовых объемно пористых конденсаторах используют жидкий или гелеобразный электролит. В оксидно-полупроводниковых конденсаторах второй обкладкой является полупроводник, в частности, двуокись марганца.

Особенностью конструкции оксидных (электролитических) конденсаторов является наличие корпуса (кожуха), материал которого должен быть устойчив к действию электролита. К металлическому корпусу присоединяется один из выводов конденсатора – катодный. Такие конденсаторы конструктивно герметизированы.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком относятся к низковольтным. Преимуществом такого типа конденсаторов является возможность получения больших значений емкости (от единиц до сотен тысяч микрофарад) при малых габаритах. Они используются в фильтрах источников питания, цепях развязки,

шунтирующих и переходных цепях полупроводниковых устройств на низких частотах.

По способу монтажа и характеру защиты от внешних воздействий конденсаторы не отличаются от рассмотренных ранее резисторов.

Деление конденсаторов постоянной емкости и система обозначения

Конденсаторы постоянной емкости по виду диэлектрика подразделяются на группы с неорганическим, органическим, газовакуумным и пленочным типом диэлектрического материала.

Из-за большого разнообразия типов конденсаторов целесообразно, опуская характеристики каждого типа, представить их деление в виде схемы (рисунок 3.19)

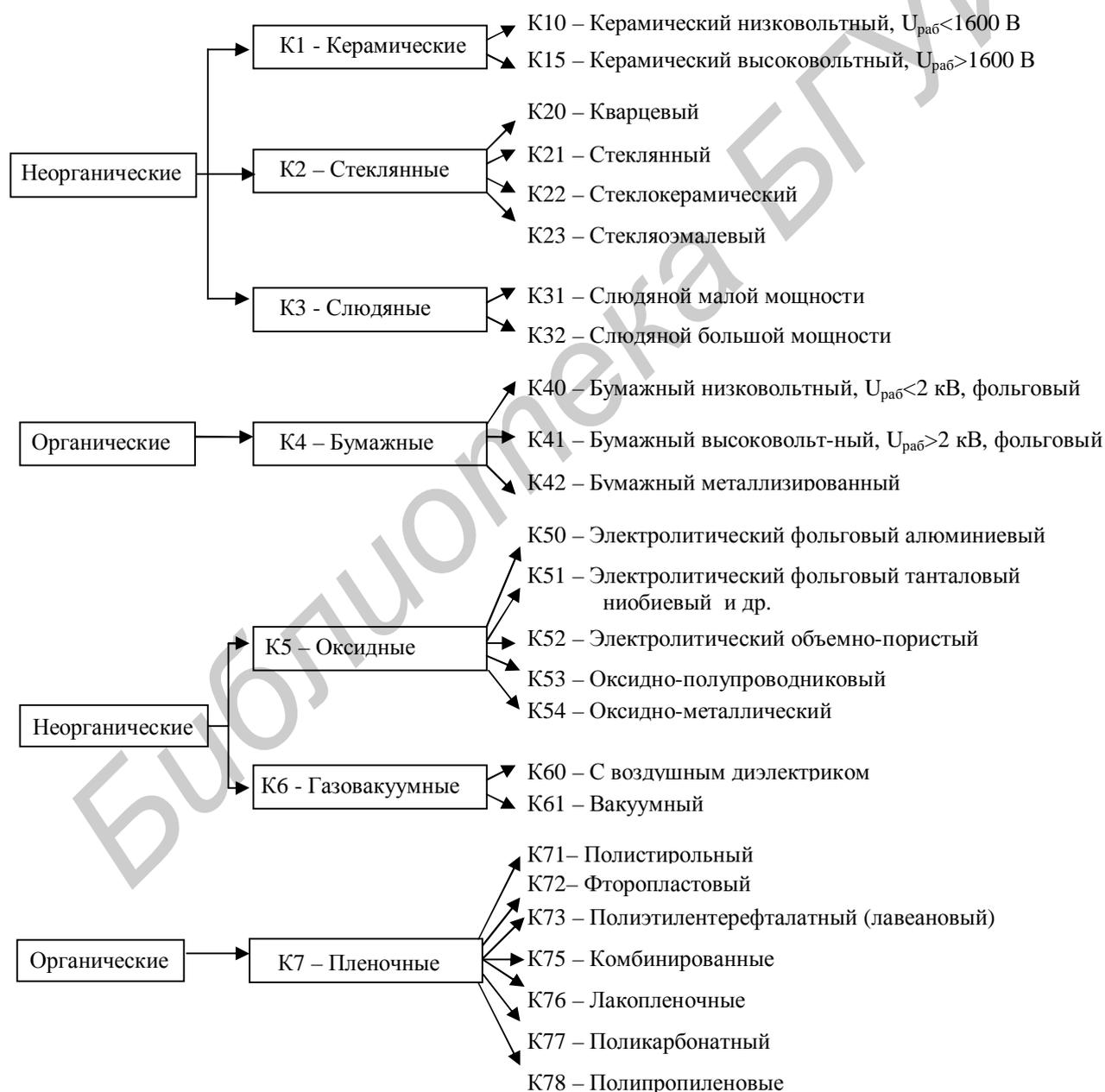


Рисунок 3.19 – Классификационная схема конденсаторов

В системе обозначений конденсаторов постоянной емкости стоит буква К (конденсатор). На втором месте – двузначное число, определяющее группу конденсаторов, первая цифра которого отражает тип диэлектрика, а вторая – особенности диэлектрика или эксплуатации. Затем через дефис ставится порядковый номер разработки в данной группе конденсаторов.

Например, К10-8 – керамический, конденсатор постоянной емкости, низковольтный с порядковым номером разработки 8.

Полное условное обозначение конденсаторов постоянной емкости состоит из следующих элементов:

- первый элемент – обозначение подкласса и группы;
- второй элемент – обозначение основных параметров и характеристик в следующей последовательности: конструктивное исполнение, номинальное напряжение, номинальная емкость, допускаемое отклонение емкости, группа и класс по температурной стабильности емкости, номинальная реактивная мощность;
- третий элемент – обозначение климатического исполнения;
- четвертый элемент – обозначение документа на поставку.

Например, К75-10-250 В-0,47 мкФ $\pm 5\%$ - В...ТУ – конденсатор постоянной емкости, комбинированный с номером разработки 10, на номинальное напряжение 250 В, номинальной емкостью 0,47 мкФ, допуском $\pm 5\%$, всеклиматического исполнения и номером технических условий.

Система обозначения подстроечных и переменных конденсаторов отличается от системы для конденсаторов постоянной емкости.

Для подстроечных конденсаторов первым идет буквенное обозначение КТ, для переменных – КП, а для нелинейных – КН. Затем следует цифра, определяющая тип диэлектрика: 1 – вакуумные; 2 – воздушные; 3 – газонаполненные; 4 – твердый диэлектрик; 5 – жидкий диэлектрик. Для нелинейных конденсаторов – варикондов – цифра 1, а для термоконденсаторов – цифра 2. После буквенных и цифровых обозначений через дефис идет цифра, отражающая номер разработки в данной группе конденсаторов.

Например, КТ4-21 – подстроечный конденсатор с твердым диэлектриком и 21 номером разработки; КП1-3 – переменный конденсатор вакуумный с номером разработки 3.

В существующей аппаратуре могут встречаться ранее разработанные типы конденсаторов, обозначение которых буквенное, отражающее материал диэлектрика и конструктивные особенности. Среди достаточно широко применяемых являются:

- КТ – керамические трубчатые;
- КД – керамические дисковые;
- КМ – керамические малогабаритные пакетные;
- КПМ – керамические пластинчатые малогабаритные;
- КС – стеклоэмалевые;
- СКМ – стеклокерамические многослойные;
- ДС – дисковые стеклоэмалевые;
- КСО – слюдяные опрессованные;
- СГМ – слюдяные герметизированные малогабаритные;
- БМ – бумажные малогабаритные;

МБМ – металлобумажные малогабаритные;
ЭМ – электролитические малогабаритные;
ЭТО – электролитические танталовые объемные;
ПМ – полистирольные малогабаритные и т.д.

Маркировка конденсаторов включает сокращенную буквенно-цифровую кодировку. Она отражает сокращенное обозначение (тип) конденсатора, номинальное рабочее напряжение, номинальную емкость и допуск на отклонение либо в процентах, либо буквенным индексом в соответствии с рядами номинальных значений и допусков. Иногда указывается группа по ТКЕ (температурный коэффициент емкости).

Буквенно-цифровая маркировка характерна для конденсаторов достаточно больших размеров. Для конденсаторов малых размеров применяется цветовая кодировка номинальной емкости, допустимого отклонения (допуска) от номинала, номинального значения рабочего напряжения и группы ТКЕ. Она наносится на корпус конденсатора в виде цветных точек или полосок.

Сокращенное обозначение типов конденсаторов и их маркировка подробно излагаются в специальной литературе и нормативных документах на поставку изделий.

Контрольные вопросы

1. Дать определение термина "диэлектрические материалы" (ДМ).
2. Как делятся ДМ по агрегатному состоянию?
3. Достоинства газообразных ДМ и области их применения.
4. Перечислите классы основных жидких ДМ.
5. Каковы методы получения полимерных ДМ?
6. Перечислите основные полимерные термопластичные ДМ.
7. Каковы области применения пластмасс, пенопластов, эластомеров, компаундов?
8. Как классифицируются лаки по применению?
9. Перечислите основные типы волокнистых ДМ.
10. Каков основной недостаток волокнистых ДМ и как он устраняется?
11. Что такое слоистые пластики, как они называются и получают?
12. Перечислите основные классы неорганических ДМ.
13. Перечислите типы технических стёкол.
14. Что такое ситаллы и где они применяются?
15. Какие типы керамики используются в электротехнических изделиях и для чего?
16. Как делятся типы керамики по применению и, по какому параметру их подразделяют?
17. Каковы основные операции процесса изготовления керамических изделий.
18. Чем изолируются обмоточные провода?
19. Чем изолируются гибкие монтажные провода?
20. Какие ДМ используют в качестве диэлектриков конденсаторов?
21. Какие существуют варианты конструкций конденсаторов постоянной емкости?

Глава 4 ПОЛУПРОВОДНИКИ

4.1. Типы, основные свойства и количественные параметры полупроводников

Собственные и примесные полупроводники

Полупроводник - вещество, основным свойством которого является сильная зависимость его электропроводности от воздействия внешних факторов. К внешним факторам относят температуру, электромагнитное излучение (свет), электрическое поле и т.д.

Согласно зонной теории твердого тела, каждое вещество может с полной определенностью характеризоваться энергетической диаграммой, которая представляет собой часть энергетического спектра электронов данного вещества.

Обычно рассматривают и изображают только свободную и валентную зоны, разделенные запрещенной для электронов зоной энергий.

Свободная зона соответствует энергетическим уровням электронов вещества, находящихся в возбужденном состоянии. При отсутствии внешнего возбуждения она не содержит электронов и поэтому называется свободной. Когда в ней находятся возбуждённые электроны, её называют *зоной проводимости*.

Валентная зона содержит энергетические уровни, на которых находятся все валентные электроны вещества, что наблюдается при отсутствии внешнего возбуждения.

Запрещённая зона – это те значения энергии, которые не могут иметь электроны данного вещества ни при каких условиях.

Рассматривая энергетическую диаграмму полупроводника (рисунок 4.1) и помня о том, что ширина запрещенной зоны невелика, можно отметить, что уже при нормальной температуре (300 К) часть электронов (n_i) за счет теплового возбуждения переходит в зону проводимости, оставляя в валентной зоне вакантные места - дырки (p_i), по которым под действием внешнего поля могут направленно перемещаться электроны валентной зоны.

Это явление рассматривается как движение дырок в полупроводнике под действием внешнего поля, тогда как фактически - это движение электронов валентной зоны по вакантным энергетическим уровням.

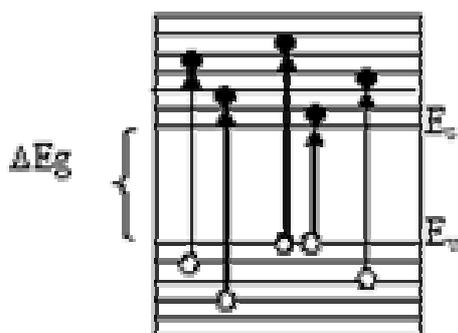


Рисунок 4.1 – Энергетическая диаграмма собственного полупроводника

Таким образом, и электроны свободной зоны с концентрацией (n_i), соответствующей окружающей температуре, и дырки валентной зоны (p_i) являются свободными носителями зарядов. Их называют *собственными носителями*, а вещество - *собственным полупроводником*. Собственные носители зарядов, возникающие в результате теплового возбуждения в условиях термодинамического равновесия, называют *равновесными*, а процесс их образования - *тепловой генерацией*.

Вполне естественно, что концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике равны, т.е. $n_i = p_i$.

Следует иметь в виду, что одновременно с процессом возбуждения носителей идет обратный процесс возвращения электронов свободной зоны в валентную, называемый *рекомбинацией*. При заданной температуре генерационные процессы уравниваются процессами рекомбинации, т.е. наступает термодинамическое равновесие, при котором устанавливаются равновесные концентрации носителей зарядов, определяемые соотношениями:

$$n_i = 2N_c \cdot e^{-\frac{\Delta E_z}{2kT}}, \quad (4.1)$$

$$p_i = 2N_v \cdot e^{-\frac{\Delta E_z}{2kT}}, \quad (4.2)$$

где N_c , N_v - число энергетических уровней, разрешенных для нахождения на них электронов, или эффективная плотность состояний в свободной и валентной зонах; k - постоянная Больцмана; T - температура; ΔE_z - ширина запрещенной зоны. Множитель 2 свидетельствует о том, что, согласно принципу Паули, на одном уровне может находиться два электрона.

При наложении внешнего электрического поля электропроводность собственных полупроводников обеспечивается обоими типами носителей зарядов, поэтому их иногда называют полупроводниками с биполярной проводимостью. Удельная проводимость собственного полупроводника будет определяться выражением:

$$S_i = q \cdot n_i \cdot u_n + q \cdot p_i \cdot u_p = q \cdot n_i (u_n + u_p), \quad (4.3)$$

где u_n , u_p - подвижности носителей заряда.

Подвижности электронов и дырок не одинаковы и обычно $u_n > u_p$, поэтому электропроводность собственных полупроводников имеет слабо преобладающий электронный характер.

В полупроводниках с достаточно широкой запрещенной зоной при нормальных температурах отсутствуют собственные носители зарядов. В рабочем интервале температур их электропроводность обеспечивается за счет электронов примесных атомов.

Примесями могут быть чужеродные атомы; собственные - избыточные по стехиометрическому составу; дефекты кристаллической решетки в виде пустых узлов, атомов или ионов в междоузлиях; дислокации - нарушения периодичности структуры и т.д.

Обычно примеси вводят в вещество специально, чтобы обеспечить нужный тип и величину проводимости. *Введение примесей называют легированием* полупроводника. Различают примеси внедрения, когда чужеродные атомы

закрепляются в междоузлиях, и примеси замещения, когда они замещают матричные атомы в узлах решетки.

Концентрация примесных атомов на 3-6 порядков меньше концентрации собственных. Поэтому атомы примеси, с отличающимся от матричных строением электронных оболочек, находятся на больших расстояниях друг от друга и, как правило, не могут взаимодействовать между собой и образовывать примесные энергетические зоны. В результате энергетическое положение электронов атомов примеси на энергетической диаграмме (рисунок 4.2) представляется в виде одного уровня, расположенного в запрещенной зоне полупроводника. Причем обычно он расположен либо у дна свободной зоны, либо близко к потолку валентной зоны.

Атомы примеси способны легко отдавать электроны в свободную зону либо захватывать электроны из валентной зоны, достраивая тем самым свою наружную оболочку до устойчивого состояния. Примесные атомы, отдающие электроны в свободную зону называются *донорами*, а полупроводник – *донорным полупроводником*. Примесные атомы, захватывающие электроны валентной зоны называют *акцепторами*, а полупроводник – *акцепторным полупроводником*.

Донорные атомы, отдавшие электрон, становятся положительно заряженными ионами. Акцепторные атомы, захватившие электрон, становятся отрицательно заряженными ионами.

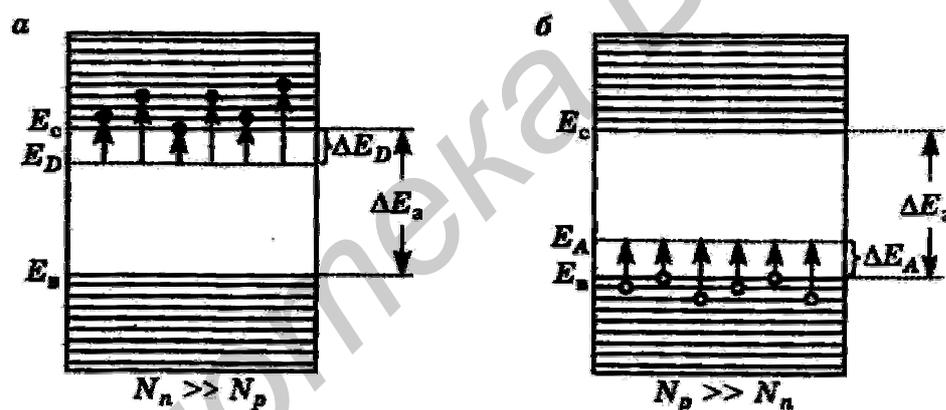


Рисунок 4.2 - Энергетические диаграммы примесных полупроводников: а — донорного; б — акцепторного; E_D, E_A — энергетические уровни электронов примесных атомов; $\Delta E_D, \Delta E_A$ — энергии активации электронной и дырочной проводимости

Поскольку энергии активации электронов примесных атомов очень малы ($\Delta E_D, \Delta E_A \sim 0,1 \dots 0,01$ эВ), то уже при нормальных температурах в зоне проводимости донорного полупроводника появляются свободные электроны, способные обеспечить его электропроводность. При этом вакансии донорных атомов являются связанными и не влияют на электропроводность. В случае акцепторного полупроводника электроны валентной зоны захватываются атомами примеси. Оставшиеся в валентной зоне дырки являются свободными и обеспечивают электропроводность, а захваченные электроны находятся в связанном состоянии и не влияют на электропроводность.

Из приведенного следует, что в донорном полупроводнике свободными носителями заряда являются электроны, поэтому он называется *электронным или*

n-типа. В акцепторном полупроводнике свободными носителями заряда являются дырки, и полупроводник называется *дырочным*, или *p*-типа.

Сравнивая собственные и примесные полупроводники, следует подчеркнуть, что в последних электропроводность проявляется при более низких температурах, поскольку $\Delta E_D, \Delta E_A \ll E_3$.

При нормальной температуре (300 К) практически все примесные атомы находятся в ионизированном состоянии. Следовательно, концентрация свободных носителей зарядов примесных полупроводников будет равна концентрации введенных атомов примеси (N_D, N_A).

Удельная проводимость примесных полупроводников определяется выражениями

$$S_n = q \cdot n \cdot u_n \text{ и } S_p = q \cdot p \cdot u_p, \quad (4.4)$$

а концентрация носителей определяется соотношениями

$$n \approx \sqrt{N_D \cdot N_C} \cdot e^{-\frac{\Delta E_D}{2kT}}, \quad (4.5)$$

$$p \approx \sqrt{N_A \cdot N_B} \cdot e^{-\frac{\Delta E_A}{2kT}}. \quad (4.6)$$

При достаточно высоких температурах наряду с примесными электронами (дырками) в полупроводнике появляются собственные носители обоих типов и суммарная концентрация свободных носителей возрастает. Однако, в электронном полупроводнике электронов значительно больше, чем дырок, поэтому электроны называют *основными*, а дырки - *неосновными* носителями заряда. В акцепторном полупроводнике основными носителями являются дырки, а неосновными - электроны.

Из приведенных выражений для расчета концентрации носителей зарядов и удельной проводимости следует, что их численные значения зависят от температуры T (внешний фактор), ширины запрещенной зоны ΔE_3 , глубины залегания примеси $\Delta E_D, \Delta E_A$ и подвижностей носителей зарядов u_n, u_p .

Из приведенных выражений также следует, что температурная зависимость концентрации $n(p) = f(T)$ определяется в основном экспоненциальным членом выражений (4.5), (4.6). Поэтому, в координатах $\ln(n), (p) = f(1/T)$ можно представить в виде прямой линии, по тангенсу угла наклона которой можно определить ширину запрещенной зоны ΔE_3 , которая является *энергией активации собственной проводимости*, и *энергию активации примесной проводимости* $\Delta E_D, \Delta E_A$.

В общем случае температурная зависимость концентрации носителей заряда примесного полупроводника имеет три характерных участка (рисунок 4.3).

При низких температурах (участок 1) тепловой энергии достаточно для ионизации примесных атомов. Поэтому с ростом температуры увеличивается концентрация примесных носителей заряда и наклон прямой на графике определяется энергией ионизации примесных атомов, т.е. глубиной залегания примеси $\Delta E_D, \Delta E_A$.

На втором участке, т.е. при повышенных температурах, все примесные атомы ионизированы. Следовательно, концентрация свободных носителей, равная концентрации примесных атомов ($n = N_D$ или $p = N_A$), не изменяется с ростом

температуры до тех пор, пока тепловой энергии недостаточно для возбуждения электронов собственных атомов полупроводника.

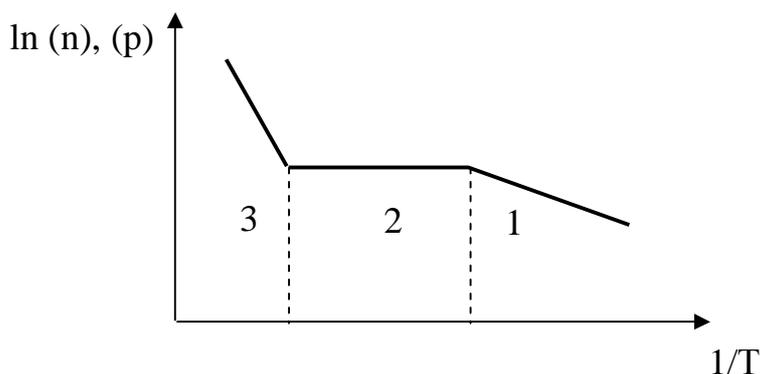


Рисунок 4.3 - Температурная зависимость концентрации носителей заряда примесного полупроводника

На третьем участке при высоких температурах концентрация растёт за счёт генерации собственных носителей зарядов и наклон прямой определяется шириной запрещённой зоны полупроводника ΔE_3 .

Обычно для определения ΔE_D , ΔE_A , ΔE_3 пользуются экспериментально измеренной зависимостью удельной проводимости S от температуры. При этом необходимо учесть температурную зависимость подвижности носителей заряда.

При движении носителей заряда в полупроводнике под действием внешнего поля происходит их столкновение (рассеяние) с атомами и различными дефектами кристаллической решетки. При этом скорость их движения может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от механизма рассеяния.

В реальных кристаллах действуют одновременно несколько механизмов рассеяния, приводящих к изменению подвижности носителей заряда. Однако, вклад каждого типа рассеяния может весьма сильно меняться с изменением температуры, концентрации дефектов в исследуемом образце и других факторов.

Обычно в полупроводниках рассматривают два основных механизма рассеяния: на ионах примеси и на тепловых колебаниях решетки. С изменением температуры роль каждого из этих механизмов меняется.

При низких температурах основную роль играет рассеяние на ионах примеси, приводящее к увеличению подвижности. С повышением температуры преобладающим становится рассеяние на тепловых колебаниях решетки, снижающее подвижность.

Установлено, что с ростом температуры подвижность носителей заряда растет пропорционально $T^{3/2}$, что соответствует рассеянию на ионах примеси, затем она переходит через максимум и уменьшается пропорционально $T^{-3/2}$, что соответствует рассеянию на тепловых колебаниях решетки. Графически температурная зависимость подвижности имеет вид, представленный на рисунке 4.4.

Из графика видно, что подвижность зависит и от концентрации примеси. С ростом концентрации ($N_2 > N_1$) подвижность носителей уменьшается ($u_2 < u_1$) за счет столкновения самих носителей между собой. Причем максимум подвижности с увеличением концентрации примесных атомов сдвигается в сторону больших

температур, поскольку при малых концентрациях рассеяние на примеси более вероятно, нежели рассеяние на тепловых колебаниях решетки.

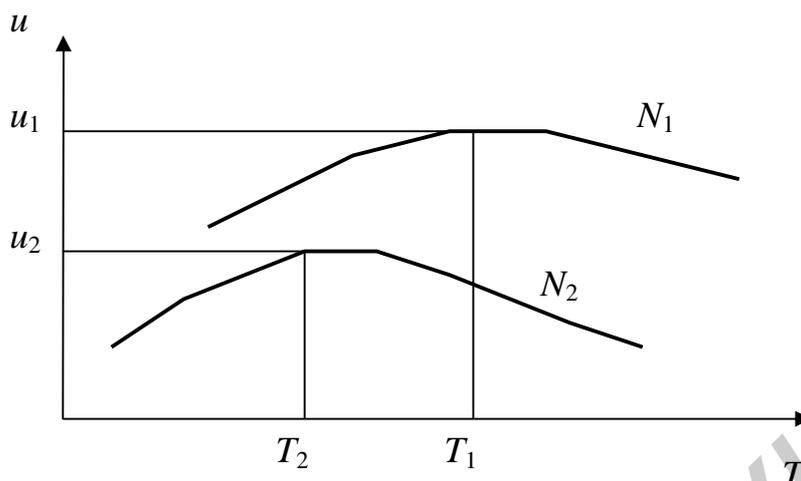


Рисунок 4.4 - Температурная зависимость подвижности носителей заряда в полупроводниках

Температурная зависимость удельной проводимости примесных полупроводников

При изучении электропроводности полупроводников следует подчеркнуть, что удельная проводимость, как практически измеряемая величина, содержит информацию об основных количественных параметрах исследуемого материала. Это связано с тем, что удельная проводимость зависит от концентрации носителей заряда, их подвижности и ширины запрещённой зоны (для собственного полупроводника), либо энергии активации примеси (для примесного полупроводника).

Если учесть, что температурная зависимость подвижности является степенной функцией медленно меняющейся с температурой, то можно сказать, что температурная зависимость удельной проводимости определяется, в основном, температурной зависимостью концентрации носителей заряда, изменяющейся по экспоненциальному закону.

Для примесного полупроводника ход температурной зависимости удельной проводимости аналогичен температурной зависимости концентрации, хотя имеет некоторые особенности.

Графически температурная зависимость удельной проводимости примесного полупроводника представлена на рисунке 4.5.

При низких температурах в полупроводнике отсутствуют собственные носители заряда, и проводимость определяется только примесными носителями, концентрация которых с ростом температуры экспоненциально растёт. Поэтому в полулогарифмическом масштабе удельная проводимость линейно зависит от обратной температуры. Наклон прямой до точки «а» определяется энергией активации примесных носителей заряда, т.е. ΔE_D , либо ΔE_A , причём

$$tg b \sim \Delta E_D, \Delta E_A.$$

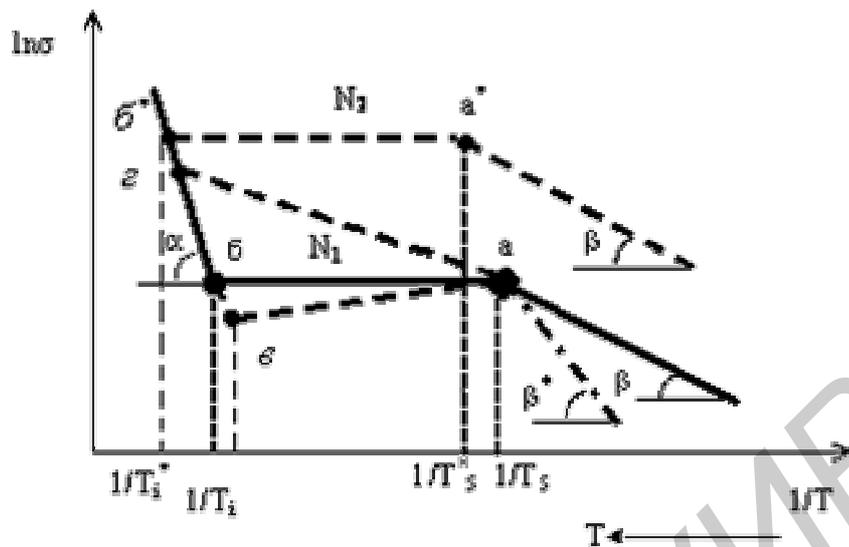


Рисунок 4.5 - Температурная зависимость удельной проводимости примесного полупроводника

Следовательно, чем глубже находятся энергетические уровни примесных носителей заряда, тем круче участок примесной проводимости, что на рисунке 4.5 показано штрих-пунктирной линией, для которой $(\Delta E_D^*, \Delta E_A^*) > \Delta E_D, \Delta E_3$, что следует из соотношения:

$$\operatorname{tg} b^* > \operatorname{tg} b.$$

В точке «а» все примесные атомы оказываются ионизированными. Концентрация свободных носителей с дальнейшим ростом температуры остаётся постоянной и равной концентрации примесных атомов N_D или N_A , а, следовательно, и удельная проводимость практически не изменяется с изменением температуры. На графике такому положению соответствует участок $a-b$. Однако, если в диапазоне температур $1/T_s-1/T_i$ подвижность с ростом температуры изменяется, то удельная проводимость будет либо уменьшаться - участок $a-в$, либо увеличиваться – участок $a-z$, в зависимости от того какой механизм рассеяния носителей преобладает или доминирует.

Поскольку температуры истощения примеси T_s достаточно низкие (100...150) К, а температуры T_i перехода к собственной проводимости очень высокие (400...500) К, то в этом интервале температур, обычно, удельная проводимость слегка увеличивается за счёт роста подвижности, а затем уменьшается из-за рассеяния носителей на тепловых колебаниях решётки, приводящих к уменьшению подвижности. Фактически, участок $a-b$ не является линейным как показано на рисунке 4.5. Однако, изменение удельной проводимости на этом участке за счет температурной зависимости подвижности в области рабочих температур незначительна. Поэтому, в первом приближении, этими изменениями можно пренебречь, или для получения нужного значения σ , учесть на этапе изготовления полупроводникового материала.

При достижении температуры T_i начинается генерация собственных носителей заряда, поэтому концентрация свободных носителей увеличивается и, следовательно, растёт удельная проводимость. Поскольку рост концентрации идёт

по экспоненциальному закону, наклон прямой собственной проводимости (участок б-г-б*) пропорционален ΔE_3 , причём

$$\operatorname{tga} \sim \Delta E_3.$$

Изменение концентрации примесных атомов приводит к параллельному смещению графика, что показано пунктирной линией, для которой $N_2 > N_1$.

Следует подчеркнуть, что диапазон рабочих температур приборов находится в области (240...300) К, поэтому концентрации свободных носителей, а значит и удельная проводимость, будут определяться только концентрацией примесных атомов N_D, N_A , введенных в полупроводник в процессе легирования.

Таким образом, задавая концентрацию примеси N_D, N_A , можно получить требуемое значение удельной проводимости σ в пределах трех порядков ее величины.

По температурной зависимости удельной проводимости оказывается возможным экспериментальное определение энергии активации примеси $\Delta E_D, \Delta E_A$ и ширины запрещенной зоны ΔE_3 , поскольку

$$\Delta E_D, \Delta E_A \sim \operatorname{tg} b, \text{ а } \Delta E_3 \sim \operatorname{tga}.$$

Фотопроводимость полупроводников

Фотопроводимостью называют увеличение электрической проводимости вещества под действием электромагнитного излучения, в том числе света.

При поглощении света собственным полупроводником энергия фотона E_ϕ захватывается электроном валентной зоны (рисунок 4.6), и если при этом

$E_\phi = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq \Delta E_3$, где h – постоянная Планка; ν, λ – частота и длина волны

падающего света, c – скорость света в вакууме, то электрон, поглотивший фотон, способен перейти из зоны проводимости в свободную зону. В результате образуется электронно-дырочная пара свободных носителей заряда, называемых фотоносителями, которые при приложении внешнего поля обеспечивают появление фототока I_ϕ . Образование фотоносителей и появление фотопроводимости называется *внутренним фотоэффектом*.

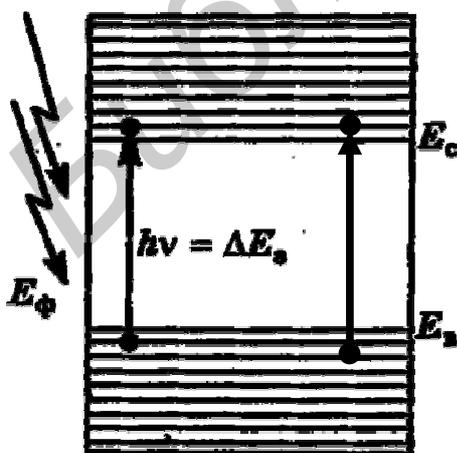


Рисунок 4.6 - Образование (генерация) фотоносителей в полупроводнике

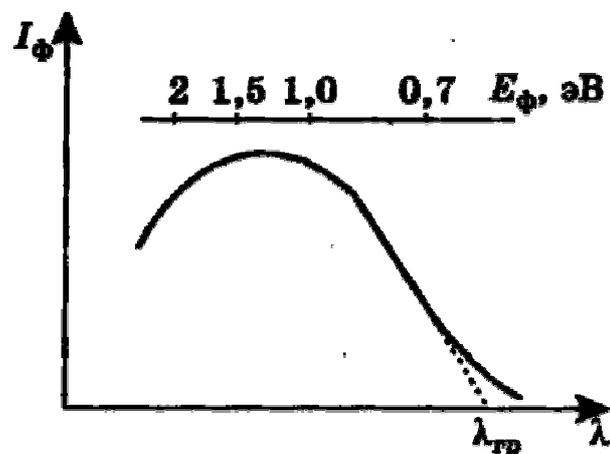


Рисунок 4.7 - Спектральная характеристика фотопроводимости

Зависимость фототока от длины волны падающего света (рисунок 4.7) называется спектральной характеристикой фотопроводимости.

Пороговая длина волны $\lambda_{гр}$, при которой появляется фотопроводимость, называется красной границей фотоэффекта. При этой длине волны $E_{\phi} = \Delta E_3$. Так как $\Delta E_3 \sim (1...3)$ эВ, то фотопроводимость обнаруживается в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра, в частности, для германия $\Delta E_3 = 0,72$ эВ, $\lambda = 1,8$ мкм. По моменту появления фотопроводимости, зная E_{ϕ} и λ , можно экспериментально определить ширину запрещенной зоны ΔE_3 и наоборот, зная ΔE_3 , можно использовать полупроводники для индикации излучения, т.е. для определения λ .

Размытие спектральной характеристики в области $\lambda_{гр}$ объясняется влиянием на электроны тепловых колебаний решетки ($E_э = E_{\phi} + E_T \geq \Delta E_3$) и некоторым изменением ΔE_3 за счет изменения расстояния между атомами при их тепловых колебаниях.

Фотопроводимость зависит от интенсивности облучения, т.е. от потока квантов света Φ (рисунок 4.8). С ростом Φ увеличивается число носителей, в то же время растет вероятность их рекомбинации. Поэтому зависимость удельной проводимости σ_{ϕ} от интенсивности облучения Φ не линейна и определяется выражением

$$\text{и } S_{\phi} = B \cdot \Phi^x \quad (4.8)$$

где $B = \text{const}$, а $1 > x > 0$.

Показатель степени x называется *квантовым выходом*, который показывает число фотоэлектронов, возникающих при поглощении одного фотона.

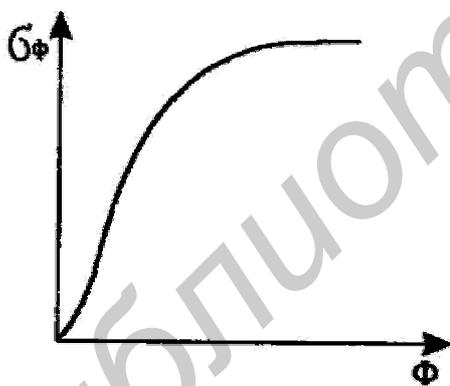


Рисунок 4.8 - Зависимость удельной фотопроводимости от интенсивности облучения

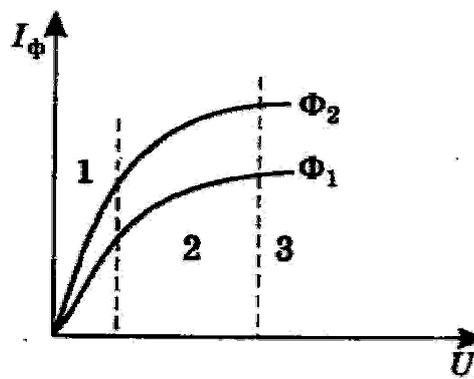


Рисунок 4.9 - Вольт-амперная характеристика фотопроводимости

Величина фототока I_{ϕ} зависит также от приложенного напряжения (рисунок 4.9). На участке 1 выполняется закон Ома, т.е. ток пропорционален напряжению. На участке 2 рост фототока замедляется, так как за время жизни между генерацией и рекомбинацией не все носители успевают достичь анода, дрейфуя под действием приложенного напряжения. При высоких значениях приложенного напряжения наступает насыщение (участок 3), т.е. все генерированные фотоносители участвуют в переносе тока. С ростом количества падающих фотонов растет число фотоносителей, поэтому кривая для Φ_2 расположена выше, чем для $\Phi_1 < \Phi_2$.

Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях

Зависимость удельной проводимости σ от напряженности внешнего электрического поля E представлена на рисунке 4.10. Она обусловлена зависимостью подвижности и концентрации носителей от напряженности внешнего поля. В области слабых полей с ростом E увеличивается скорость направленного движения носителей. В то же время увеличивается их рассеяние. Поэтому эти процессы могут компенсировать друг друга и σ слабо зависит от E . В слабых полях фактически соблюдается закон Ома.

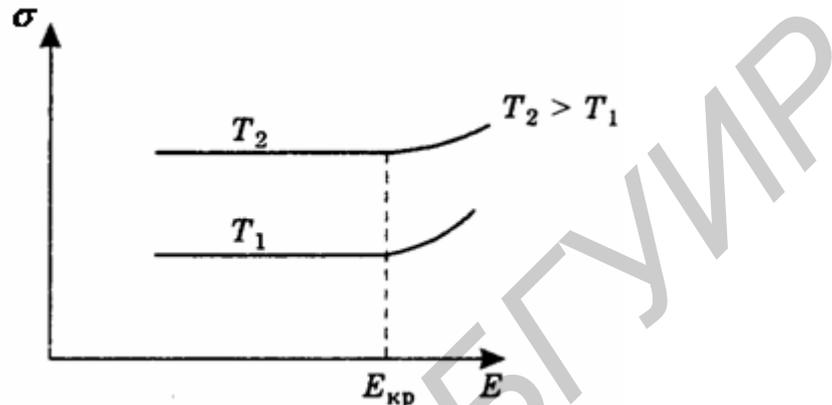


Рисунок 4.10 – Зависимость удельной проводимости полупроводников от напряженности внешнего электрического поля

В сильных полях при $E_{кр} \sim (10^6 \dots 10^7)$ В/м начинают появляться избыточные носители за счет ударной ионизации, сначала с примесных уровней, а затем из узлов кристаллической решетки. Поэтому σ растет по экспоненциальному закону. С ростом температуры кривая смещается вверх, а наклон ее возрастающей части становится более пологим.

Подводя итоги рассмотрения свойств полупроводников, следует отметить, что их электропроводность, зависящая от внешних факторов, определяется количественными параметрами, к которым относятся:

- ширина запрещенной зоны ΔE_3 или энергия активации собственной проводимости;
- энергия активации примесной проводимости $\Delta E_D, \Delta E_A$;
- концентрация носителей зарядов (n_i, N_D, N_A);
- подвижности носителей зарядов u_n, u_p .

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводник? Определение.
2. Что такое собственный, примесный полупроводник?
3. Нарисуйте энергетические диаграммы собственных и примесных полупроводников.
4. Какими носителями заряда обеспечивается электропроводность собственных и примесных полупроводников?
5. Что такое основные и неосновные носители зарядов в полупроводниках?
6. Что такое подвижность носителей заряда и в каких единицах она измеряется?
7. Какие существуют основные механизмы рассеяния носителей заряда и как зависит подвижность носителей зарядов от температуры?
8. Напишите формулы для расчёта удельной проводимости собственных и примесных полупроводников.
9. Почему энергетическое положение электронов примесных атомов изображается на энергетической диаграмме в виде отдельного уровня, а не энергетической зоной?
10. Как следует понимать термины "температура истощения примеси T_s " и "температура перехода к собственной проводимости T_i "?
11. Что такое энергия активации собственной и примесной проводимости? Чему равны эти энергии?
12. Что такое фотопроводимость полупроводников и за счёт чего появляются фотоносители?
13. Чему равна энергия активации фотоносителей в собственном полупроводнике?
14. Как зависит фототок насыщения от интенсивности светового потока?
15. Что такое квантовый выход фотоэлектронов?
16. Объясните, почему зависимость фототока от напряжения между электродами не линейна?
17. Что такое красная граница фотоэффекта?
18. Как влияет электрическое поле на электропроводность полупроводников?
19. В каких приборах используется явление электропроводности полупроводников под действием внешнего электрического поля?
20. Перечислите количественные параметры, характеризующие основные электрофизические свойства полупроводников.

4.2. Полупроводниковые материалы

Полупроводниковый материал - материал, предназначенный для использования его полупроводниковых свойств.

Полупроводниковые материалы могут быть разделены на три группы:

- простые полупроводники - химические элементы, которыми являются B - бор, Si - кремний, Ge - германий, P - фосфор, As - мышьяк, S - сера, Sb - сурьма, Te - теллур, I - йод, Se - селен;

- полупроводниковые химические соединения типа: $A^{IV}B^{IV}$ - SiC и др.; $A^{III}B^V$ - $InSb$, $GaAs$ и др.; $A^{II}B^{VI}$ - CdS , $ZnSe$ и др.; оксиды - Cu_2O , TiO_2 и др.;

- многофазные полупроводниковые материалы с полупроводящей или проводящей фазой из карбида кремния, графита и т.д.

Для промышленного изготовления полупроводниковых приборов, элементов и интегральных схем используют как монокристаллические, так и поликристаллические материалы. Наибольшее распространение получили монокристаллы, поскольку они обладают более совершенной структурой. Они хорошо изучены, явления в них поддаются расчетам, и поэтому они обеспечивают идентичность параметров приборов на их основе. Однако, природных монокристаллических полупроводниковых материалов, годных для промышленного использования, нет. Поэтому их получают искусственным путем, различными методами кристаллизации из исходных веществ.

Методы получения монокристаллов

По фазовому состоянию и компонентному составу исходной фазы методы получения монокристаллов делятся на три группы:

выращивание из расплава;
выращивание из раствора;
выращивание из газовой фазы.

В пределах каждой группы классификация методов обусловлена характером движущей силы кристаллизации, которой могут быть градиент температуры, давление, концентрация.

В методах выращивания из расплава чаще всего движущей силой кристаллизации является градиент температур на границе раздела исходная фаза - растущий монокристалл.

Наиболее широкое распространение получили методы Киропулоса, Бриджмена, Стокбаргера, Чохральского, зонная плавка в тигле и бестигельная зонная плавка.

Сущность выращивания монокристалла из расплава по методу Киропулоса сводится к следующему (рисунок 4.11). Расплав исходного вещества в тигле имеет на поверхности температуру на $150\text{ }^\circ\text{C}$ выше температуры плавления. В него погружают трубку, охлаждаемую воздухом до температуры на $70\text{ }^\circ\text{C}$ ниже температуры плавления: При этом на конце трубки начинается рост поликристаллической полусферы, которая поднимается над расплавом до тех пор, пока смачиваемый участок не уменьшится до диаметра охлаждающей трубки.

Из этой шейки начинается рост монокристаллической полусферы, которую медленно вытягивают, получая монокристаллический слиток.

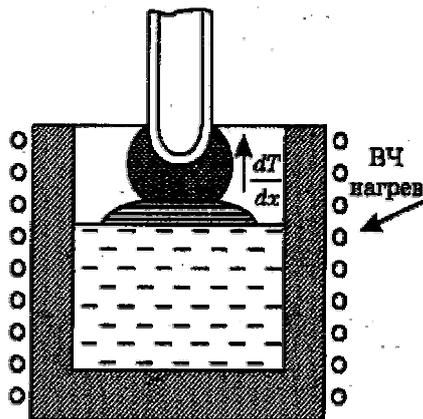


Рисунок 4.11- Схема выращивания монокристаллов из расплава

Этим методом получают монокристаллы широкозонных полупроводников GaP , $GaAs$, InP и др., а также щелочно-галлоидные кристаллы $CaCl_2$, $SrCl_2$, KBr , NaI и др.

Метод Чохральского является усовершенствованным методом Киропулоса и основан на перемещении кристалла в температурном градиенте. Отличие состоит в том, что в расплав опускается капилляр, в котором кристаллизуется поликристаллическая затравка, а монокристаллический слиток вытягивается одновременно с вращением вокруг оси капилляра.

Для выращивания монокристаллов с заданной кристаллографической ориентацией в расплав медленно опускают монокристаллическую затравку нужной ориентации. Затравку выдерживают в расплаве, пока она не оплавится с поверхности. С этого момента затравку, вращая, медленно поднимают. За ней тянется жидкий столбик расплава, удерживаемый поверхностным напряжением. В области низких температур над тиглем происходит кристаллизация расплава, образующего единое целое с затравкой и повторяющего ее кристаллографическую ориентацию.

Скорость роста кристалла определяется градиентом температуры на границе раздела расплав-монокристалл, которая должна быть равна скорости вытягивания монокристалла. Если скорость вытягивания мала, то диаметр кристалла увеличивается и возможен поликристаллический рост. Быстрый подъем приводит к уменьшению диаметра кристалла и его разрыву. Поэтому скорость вытягивания должна быть оптимальной и равномерной. Увеличение градиента температуры, как и уменьшение скорости вытягивания, приводит к увеличению концентрации дефектов в растущем кристалле. Обычно процесс роста монокристаллов медленный и составляет 1...2 мм/мин.

Метод Чохральского является основным для получения монокристаллов Ge и Si .

На перемещении тигля или ампулы с исходным веществом в температурном градиенте печи основаны методы Стокбаргера и Бриджмена. Методы используют

для получения монокристаллов галогенидов металлов NaF , LiF , PbF_2 и т.д. и для получения соединений PbS , $PbSe$ и т.д.

В случае тугоплавких соединений типа $A^{II}B^{IV}$ с высокой упругостью паров кристаллизацию осуществляют в среде инертного газа под давлением до тысяч МПа.

В полученных слитках полупроводников присутствуют примеси Ni , Ca , Cu , Mn , As , Fe в небольших количествах. Для очистки монокристаллов от примесей используют зонную очистку (плавку). Плавка называется зонной, так как расплавляется не весь образец, а узкая его часть (рисунок 4.12).

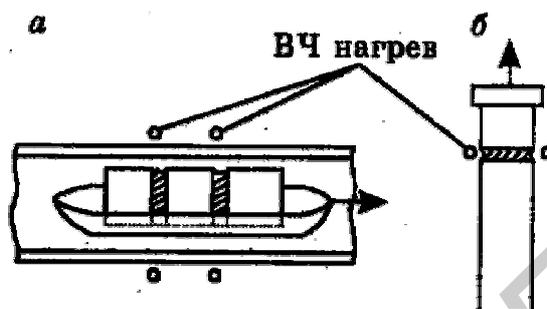


Рисунок 4.12 - Зонная очистка монокристаллов:
а – тигельная; б – бестигельная

Физической основой зонной очистки является тот факт, что большинство примесей обладают лучшей растворимостью в жидкой фазе, чем в твердой. Поэтому примеси вместе с расплавленной зоной уносятся к одному краю слитка, от которого отрезается загрязненная часть длиной 20...25 мм. Оставшийся очищенный слиток разрезается на пластины толщиной (0,35...0,5) мм, называемыми подложками. Их используют для изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Степень очистки для получения собственной проводимости полупроводника должна быть очень высокой. Если учесть, что количество примесных носителей заряда соответствует концентрации атомов примеси - 10^{19} м^{-3} , а число собственных атомов - 10^{28} м^{-3} , то на один миллиард атомов основного вещества приходится один атом примеси.

Очистка кремния методом зонной тигельной плавки оказывается невозможной, так как он реагирует с углеродом (тигель графитовый) и расплавляется кварцевая трубка. Поэтому очистка Si производится методом бестигельной зонной плавки, когда монокристаллический слиток располагают вертикально и создают высокочастотным нагревом расплавленную зону, перемещаемую вверх по слитку. Нижняя часть образца не отрывается от верхней вследствие большого поверхностного натяжения жидкого кремния.

Выращивание монокристаллов из жидкой фазы проводится в пересыщенных растворах. Пересыщение создают путем охлаждения раствора, насыщенного при высокой температуре. Рост монокристаллов начинается на затравках, подвешенных в ванне, чем обеспечивается ориентированный рост кристалла. В процессе роста раствор перемешивается. Движущей силой

кристаллизации является градиент температуры и концентрация атомом проводника. Скорость роста составляет 100...300 монослоев в секунду.

Этим методом получают кристаллы полупроводников сложного состава.

Достоинством методов выращивания из газовой фазы являются более низкие температуры кристаллизации и малые пересыщения, а, следовательно, более высокое совершенство структуры кристалла, малое содержание дефектов, а также простота оборудования.

Существует несколько групп методов выращивания монокристаллов из газовой фазы:

- молекулярных пучков (напыление, сублимация);
- химических реакций;
- химического переноса.

При использовании *молекулярных пучков* вещество нагревается в вакууме до температуры большей, чем температура испарения. При этом образуется направленный прямолинейный поток атомов или молекул, который осаждается на поверхность кристаллизации. Осажденные или адсорбированные частицы испаренного вещества мигрируют по поверхности и, если встречают участок активного роста кристалла, то достраивают его, если нет, то десорбируются и уходят в газовую фазу.

Обычно крупные кристаллы этими методами получить не удастся из-за резкого перепада температуры между испарителем и подложкой. На последней образуется много зародышей и вырастают мелкие кристаллы или поликристаллические материалы.

Методы химических реакций очень разнообразны, однако суть их сводится к тому, что при выращивании кристалла состав газовой фазы отличается от состава растущего кристалла. Частицы газовой фазы, хемосорбируясь на поверхность кристаллизации, в результате химических реакций термического разложения, восстановления, окисления и т.д. образуют основной продукт, т.е. частицы, встраивающиеся в кристалл, а побочные вещества десорбируются с поверхности и уходят в газовую фазу.

Методы химического переноса или методы, газотранспортных реакций заключаются в том, что твердое вещество, взаимодействуя с газом-носителем, переходит в газообразное состояние и переносится в другую часть системы с иными условиями. В результате обратной реакции происходит разложение газообразного соединения с выделением конечного продукта для растущего кристалла.

Достоинством метода является то, что вещество не испаряется, т.е. процесс происходит при низких температурах, что позволяет получить совершенные по структуре кристаллы, а также сравнительно легко управлять скоростью их роста.

Газами-носителями являются H_2 , пары H_2O , сухой кислород. Методы химических реакций и переноса широко используются для *выращивания монокристаллических пленок на монокристаллических подложках*. Этот процесс называется *эпитаксией*.

В процессе роста пленки ее кристаллографическая ориентация в точности повторяет кристаллографическую ориентацию подложки. В результате получается многослойная монокристаллическая структура.

При проведении эпитаксии осуществляется легирование растущего слоя атомами примеси, что позволяет получить монокристаллические слои нужного типа проводимости и любого удельного сопротивления (рисунок 4.13).

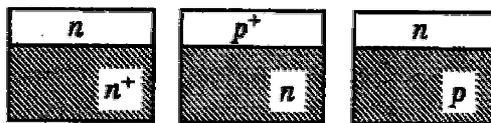


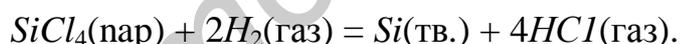
Рисунок 4.13 – Примеры эпитаксиальных структур

Получение и основные характеристики наиболее применяемых полупроводниковых материалов

Кремний. Является основным материалом современного производства полупроводниковых приборов и микросхем. Это один из наиболее распространенных элементов (26%) на Земле.

Кристаллический кремний имеет решетку типа алмаза. Каждый его атом соединен валентными связями с четырьмя соседними, расположенными в вершинах тетраэдра. Постоянная решетки $a = 5,42 \cdot 10^{-10}$ м.

Основными материалами для получения чистого *Si* являются галогениды $SiCl_4$, $SiHCl_3$, SiI_4 и силан SiH_4 . Чаще всего используют метод восстановления парами цинка тетрахлорида кремния при температуре порядка 1000 °С. При этом происходит реакция



Также используется термическое разложение силана (пиролиз):



Дальнейшая очистка кремния проводится методом бестигельной зонной плавки.

Для получения кремния *p*-типа проводят легирование акцепторными примесями - алюминием или бором. Энергия активации примеси $\Delta E_{Al} = 0,057$ эВ, $\Delta E_B = 0,045$ эВ.

Кремний *n*-типа получают легированием донорными примесями *As* - мышьяк, *Sb* - сурьма, *P* - фосфор. Энергия активации примеси $\Delta E_{As} = 0,049$ эВ, $\Delta E_{Sb} = 0,039$ эВ, $\Delta E_P = 0,44$ эВ. В зависимости от концентрации примеси удельное сопротивление меняется от 10^2 до 10^{-2} Ом·см.

Достоинством кремния является большая ширина запрещенной зоны $\Delta E_z = 1,12$ эВ, что обеспечивают работу приборов при достаточно высоких температурах - 120...200 °С. Недостатками являются низкие значения подвижностей электронов и дырок и высокая стоимость. Кремний используют для изготовления мощных диодов, транзисторов, тиристоров, интегральных схем, солнечных батарей, тензопреобразователей и т.д.

Германий. Из исходного сырья получают тетрахлорид германия $GeCl_4$ и путем дальнейшей переработки - двуоксид германия GeO_2 , из которого восстановлением в водородной печи при температуре 650...700 °С получают элементарный германий

в виде серого порошка. Возможен также процесс разложения $GeCl_4$ в парах цинка при температуре порядка 900 °С:



Полученный порошок Ge спекают в слитки, из которых методами зонной плавки или выращиванием из расплава получают монокристаллы германия.

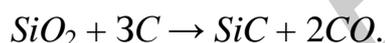
Германий является высокочастотным материалом и используется в ВЧ и СВЧ транзисторах, а также в тензо-, магниточувствительных и холловских датчиках. Обладает хорошими оптическими свойствами и используется в фотодиодах, фототранзисторах.

Из него изготавливают оптические линзы с большой светосилой для ИК-спектра, оптические фильтры, модуляторы света и т.д.

Недостатками являются малый диапазон рабочих температур из-за малой ширины запрещенной зоны ($\Delta E_3 = 0,72$ эВ) и высокая стоимость.

Число полупроводников на основе химических соединений велико. Они могут обладать самыми разнообразными электрофизическими свойствами, в ряде случаев превосходящими свойства простых полупроводников.

Карбид кремния - соединение типа $A^{IV}B^{IV}$, получают в электрических печах путем восстановления диоксида кремния углеродом при температуре до 2000 °С:



В печи образуются сросшиеся пакеты кристаллов SiC , называемые друзами. Из них дроблением получают порошок SiC и методом возгонки в вакууме получают монокристаллический карбид кремния.

Из монокристаллов изготавливают выпрямители на рабочие температуры до 500 °С, световоды. Из порошка SiC изготавливают варисторы для автоматики и вычислительной техники, нагреватели высокотемпературных печей.

Соединения типа $A^{III}B^V$ обладают рядом ценных свойств и широко используются в технике. К ним относятся фосфиды - AlP , GaP , InP ; арсениды - $AlAs$, $GaAs$, $InAs$; антимониды - $AlSb$, $GaSb$, $InSb$. Основной метод получения — метод химических реакций, т.е. непосредственное взаимодействие компонентов в вакууме или в атмосфере инертного газа.

Арсенид галлия $GaAs$ является очень перспективным материалом благодаря тому, что это широкозонный полупроводник ($\Delta E_3 = 1,43$ эВ), имеющий высокое значение подвижности электронов $u_n = 0,85$ м²/В·с. Поэтому приборы на основе $GaAs$ по частотным свойствам превосходят германиевые, а по рабочим температурам (до 450 °С) - кремниевые. Из арсенида галлия изготавливают туннельные диоды с отрицательным сопротивлением, применяемые в генераторах, смесителях, усилителях СВЧ диапазона (до 10¹¹ Гц). Кроме того, арсенид галлия используют для фотоэлементов, дозиметров рентгеновского излучения, в полупроводниковых лазерах.

Антимонид индия $InSb$ получают сплавлением в определенном соотношении In и Sb с последующей зонной очисткой. Монокристаллы получают методом вытягивания из расплава.

Из-за малой ширины запрещенной зоны ($\Delta E_3 = 0,18$ эВ) уже при 20 °С его электропроводность не примесная, а собственная. Материал обладает самой высокой подвижностью электронов $u_n = 7,8$ м²/В·с и хорошими оптическими

свойствами. Фотопроводимость охватывает широкую область спектра, имея максимальное значение при $\lambda = 6,7$ мкм и доходя до 8 мкм.

Антимонид индия используют для изготовления фотоэлементов высокой чувствительности, датчиков Холла и оптических фильтров, в термоэлектрических генераторах и холодильниках.

Соединения $A^{II}B^{VI}$ представляют собой сульфиды, селениды и теллуриды типа ZnS , $CdSe$, $CdTe$ и т.д. В основном их используют для изготовления фоторезисторов и в качестве люминофоров. Для этих же целей используют соединения $A^{IV}B^{VI}$ - PbS , A^VB^{VI} - Bi_2S_3 .

Из оксидных соединений чаще всего используют закись меди Cu_2O для изготовления выпрямителей и фотоэлементов. А на основе TiO_2 изготавливают терморезисторы.

Большое разнообразие полупроводниковых материалов не позволяет в данном пособии рассмотреть более подробно их свойства. Поэтому в табл.4.1 приведены лишь некоторые количественные характеристики, позволяющие оценивать и сравнивать их свойства.

Таблица 4.1

Количественные параметры полупроводниковых материалов

Тип химического соединения	Материал	ΔE_g , эВ	u_n , м ² /В·с	u_p , м ² /В·с	n_i , м ⁻³	N_C , м ⁻³	N_V , м ⁻³	ϵ	ρ_{vs} , Ом·м
	<i>Ge</i>	0,67	0,39	0,19	$1,75 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{25}$	$5,17 \cdot 10^{24}$	16,3	0,615
	<i>Si</i>	1,11	0,135	0,048	$8,2 \cdot 10^{15}$	$2,8 \cdot 10^{25}$	$1,04 \cdot 10^{25}$	11,7	$4,15 \cdot 10^3$
$A^{IV}B^{IV}$	<i>SiC</i>	2,8...3,1	0,01...0,05	0,002...0,005	-	-	-	6,5...7,5	-
$A^{III}B^V$	<i>GaAs</i>	1,43	0,86	0,04	$2 \cdot 10^{12}$	$2,39 \cdot 10^{23}$	$8,84 \cdot 10^{24}$	12	$3,47 \cdot 10^6$
	<i>GaSb</i>	0,69	0,4	0,065	$1,95 \cdot 10^{18}$	$4,63 \cdot 10^{23}$	$6,09 \cdot 10^{24}$	15	$6,88 \cdot 10^2$
	<i>InAs</i>	0,36	3,0	0,024	$2,3 \cdot 10^{21}$	$1,17 \cdot 10^{23}$	$4,74 \cdot 10^{24}$	12,5	$0,9 \cdot 10^{-3}$
	<i>InSb</i>	0,18	7,8	0,075	$2 \cdot 10^{22}$	$3,83 \cdot 10^{22}$	$1,16 \cdot 10^{25}$	18	$4 \cdot 10^{-5}$
	<i>GaP</i>	2,25	0,012	0,012	$5,9 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^{24}$	$1,79 \cdot 10^{25}$	10	$4,4 \cdot 10^{14}$
	<i>InP</i>	1,28	0,4	0,065	$3 \cdot 10^{13}$	$4,63 \cdot 10^{23}$	$6,32 \cdot 10^{24}$	12,1	$4,5 \cdot 10^5$
$A^{II}B^{VI}$	<i>CdS</i>	2,53	0,035	0,0015	$3,3 \cdot 10^3$	$2,24 \cdot 10^{24}$	$1,46 \cdot 10^{25}$	8,9	-
	<i>CdSe</i>	1,74	0,05	-	$2,65 \cdot 10^{10}$	$1,17 \cdot 10^{24}$	$9,88 \cdot 10^{25}$	10,6	-
	<i>CdTe</i>	1,5	0,06	-	$5,5 \cdot 10^{11}$	$9,12 \cdot 10^{23}$	$5,17 \cdot 10^{24}$	10,9	-
$A^{IV}B^V$	<i>PbS</i>	0,37	0,055	0,06	$6,2 \cdot 10^{20}$	$7,9 \cdot 10^{23}$	$7,9 \cdot 10^{23}$	170	$8,75 \cdot 10^{-2}$

На основе полупроводниковых материалов изготавливаются различные приборы, работа которых основана на использовании их основного свойства - зависимости электропроводности:

- от температуры – термисторы, позисторы;
- от электрического поля – варисторы;
- от электромагнитного излучения – фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и т.д.;

- от механических нагрузок - тензорезисторы.

Возможность создания в одном полупроводниковом материале двух областей (слоев) с разной электропроводностью позволяет получать *p-n*-переход, обладающий выпрямляющими свойствами. Это используется для маломощных и мощных выпрямителей. Система *p-n*-переходов позволяет изготавливать *p-n-p* и *n-p-n* транзисторы и на их основе усилители и генераторы, а также интегральные схемы различного назначения.

Кроме того, полупроводниковые материалы используются для преобразования различных видов энергии. С этой целью изготавливают солнечные батареи, термоэлектрические генераторы, различные датчики. Возникающее рекомбинационное свечение *p-n*-переходов при низких напряжениях применяется в полупроводниковых лазерах и индикаторах излучения, в том числе и радиоактивного.

На основе полупроводниковых материалов изготавливают нагреватели и различного вида датчики - Холла, температуры, магнитного поля, давления и т.д.

Благодаря использованию полупроводниковых материалов приборы на их основе имеют:

- большой срок службы;
- малые габариты и вес;
- просты и надежны по конструкции;
- высокую механическую прочность;
- малую потребляемую мощность;
- малую инерционность.

Выпуск полупроводниковых приборов экономически выгоден при массовом производстве.

Контрольные вопросы

1. Перечислите химические элементы являющиеся простыми полупроводниками.
2. Назовите наиболее известные полупроводниковые химические соединения.
3. Дайте сравнительную характеристику свойств *Ge* и *Si*.
4. В чем сущность метода выращивания монокристаллов из расплава?
5. Перечислите методы выращивания монокристаллов из газовой фазы.
6. Для чего нужна очистка монокристаллов и как она осуществляется?

4.3. Приборы и компоненты электроники на основе полупроводниковых материалов.

Основными полупроводниковыми материалами для изготовления широкого спектра различных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем являются германий, кремний, арсенид галлия и различные полупроводниковые химические соединения.

Современная промышленность выпускает большое количество полупроводниковых приборов разного типа и назначения. Поскольку полупроводниковые приборы достаточно подробно изучаются в специальных курсах, хорошо обеспеченных учебной литературой, целесообразно ограничиться самым общим рассмотрением существующих групп (типов) полупроводниковых приборов.

По физическому принципу работы, конструктивно-технологическим особенностям и назначению приборы и компоненты электроники на основе полупроводниковых материалов для наглядности могут быть представлены одной из возможных классификационных схем (рисунок 4.14).

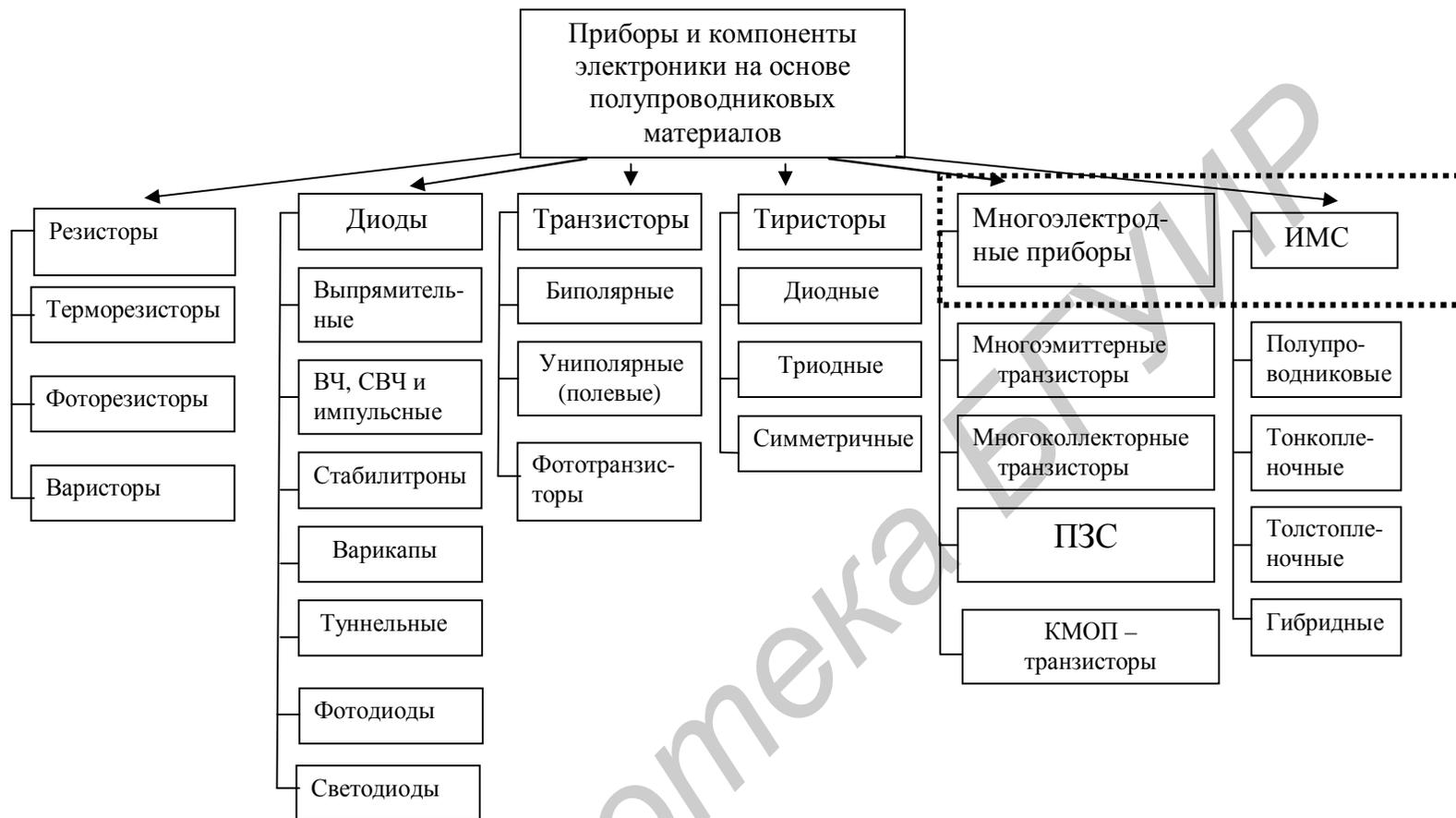


Рисунок 4.14 - Классификационная схема приборов и компонентов электроники на основе полупроводниковых материалов

Полупроводниковые резисторы

Основным свойством полупроводников является сильная зависимость электропроводности от внешних факторов: температуры, света, приложенного напряжения, магнитного поля, механических напряжений.

Компоненты электронной техники в зависимости от внешнего воздействия, меняющего электропроводность, получили названия: терморезисторы, фоторезисторы, варисторы, магниторезисторы, тензорезисторы или тензомеры. Как правило они имеют резко выраженную нелинейную вольт-амперную характеристику. Наиболее широкое применение в технике получили термо-, фоторезисторы и варисторы.

Терморезистором называют резисторы, сопротивление которых значительно изменяется при изменении температуры. Различают терморезисторы прямого и косвенного подогрева.

При прямом подогреве сопротивление меняется за счет прохождения тока через термочувствительный элемент и, естественно, при изменении температуры окружающей среды. При косвенном подогреве сопротивление терморезистора изменяется при прохождении тока через специальный подогреватель вблизи термочувствительного элемента, а также при изменении температуры окружающей среды.

Сопротивление терморезистора при нагревании уменьшается, если температурный коэффициент сопротивления (ТКС) отрицательный. Такие терморезисторы называют *термисторами*. При положительном ТКС, когда с ростом температуры сопротивление увеличивается, терморезисторы называют *позисторами*.

В терморезисторах в качестве термочувствительного элемента используются сложные системы, исходными компонентами которых являются оксидные полупроводники типа Mn_3O , Co_3O_4 , CuO , CoO , NiO .

Сокращенное условное обозначение терморезисторов состоит из сочетания букв и цифр. Согласно новой системе буквы СТ означают сопротивление термочувствительное. Цифра, следующая за буквенным обозначением, отражает вид материала, из которого изготовлен термочувствительный элемент:

- 1 – кобальто-марганцевый;
- 2 – медно-марганцевый;
- 3 – медно-кобальто-марганцевый;
- 4 – никель-кобальто-марганцевый;
- 5 – титанат бария, легированный германием;
- 6 – легированные твердые растворы в системе $BaTiO_3$ - $BaSnO_3$;
- 8 – твердые растворы в системах V_2O_3 - Me_2O_3 ($Me=Ti, Al, Cr$);
- 9 – на основе двуокиси ванадия VO_2 ;
- 10 – на основе системы $(Ba, Sr)TiO_3$;
- 11 – на основе системы $(Ba, Sr)(Ti, Sn)O_3$, легированной церием.

Следующая цифра, стоящая после дефиса, обозначает номер конструктивного типа терморезистора. На корпусе терморезистора могут быть указаны номинальное сопротивление и допустимое отклонение от номинала.

Полупроводниковые терморезисторы ранних выпусков обозначаются буквами, отражающими материал термочувствительного слоя или знак ТКС:

ММТ – медно-марганцевые терморезисторы;

КМТ – кобальто-марганцевые терморезисторы;

ТР – терморезистор с отрицательным ТКС;

ТРП – терморезистор с положительным ТКС (позистор).

Цифра, стоящая после дефиса, отражает порядковый номер конструктивной разработки конкретного типа терморезистора.

Терморезисторы применяются в качестве стабилизаторов напряжения, измерителей СВЧ-мощности, в системах регулирования с глубокой обратной связью и т.п.

Фоторезисторами называют резисторы, сопротивление которых значительно изменяется под действием светового излучения. Принцип работы фоторезистора основан на использовании внутреннего фотоэффекта. При поглощении энергии квантов света появляются свободные фотоносители, в результате чего изменяется (уменьшается) сопротивление фоторезистора. Чувствительность к электромагнитному излучению (свету) находится в области от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона. Она зависит от свойств материала светочувствительного элемента.

Основными материалами для фоторезисторов являются сернистый свинец (*PbS*), сернистый кадмий (*CdS*), селенистый кадмий (*CdSe*). *PbS* обладает высокой чувствительностью в инфракрасной области спектра, *CdS* – в видимой области, *CdSe* – в красной и ближней инфракрасной областях.

Сокращенное обозначение фоторезисторов, как и терморезисторов, содержит буквы СФ (сопротивление фоточувствительное), затем цифру, обозначающую материал фоточувствительного слоя:

1 – *PbS*;

2 – *CdS*;

3 – *CdSe*.

Перед цифрой может стоять буква Г, обозначающая герметизированную конструкцию. Через дефис стоят цифры, характеризующие конструктивное оформление фоторезистора.

В более ранних сокращенных обозначениях стоят буквы ФС (фотосопротивление), затем буквы А (1), К (2), Д (3), отражающие материал фоточувствительного слоя и затем цифры, отражающие тип конструкции.

Фоторезисторы используются как датчики освещенности в системах регулирования и телеметрии. В комбинации со светодиодами они образуют элемент, называемый *оптроном*. Он позволяет осуществлять коммутацию и передавать сигналы при отсутствии электрической связи между светодиодом и фоторезистором.

Варисторами называют резисторы, сопротивление которых значительно изменяется от приложенного к ним напряжения. По характеру изменения сопротивления варисторы делят на постоянные и переменные. Основными материалами для изготовления варисторов являются карбид кремния (*SiC*) и селен (*Se*) со связующими кристаллы полупроводника веществами. При приложении напряжения к варистору происходят изменения в структуре материала, т.е.

уменьшаются зазоры между частицами полупроводника. В результате сопротивление варистора уменьшается.

Сокращенное обозначение варистора состоит из сочетания букв и цифр. Буквы означают подкласс варисторов: ВР – варисторы постоянные; ВРП – варисторы переменные. Цифра, стоящая через дефис означает порядковый номер разработки.

В более ранних обозначениях первым элементом является сочетание букв СН – сопротивление нелинейное. Второй элемент – цифра, отражающая тип полупроводникового материала: 1 – карбид кремния; 2 – селен. Цифра через дефис отражает вид конструкции: 1 – цилиндрическая; 2 – дисковая. Четвертый элемент – цифра, стоящая после второго дефиса, обозначает порядковый номер разработки.

В полное условное обозначение, помимо указанных индексов входит классификационное напряжение и допуск на номинал резистора.

Варисторы используются для стабилизации напряжения и защиты от перенапряжения линий электропередач. В автоматике и радиоэлектронике их используют для преобразования частоты и напряжения, регулирования усиления в измерительных устройствах вторичного питания, для подстройки частоты в телевизионных приемниках и т.д.

Диоды

Полупроводниковый диод представляет собой двухэлектродный прибор с выпрямляющим переходом, благодаря которому обеспечивается протекание тока при одной полярности приложенного напряжения, а при другой полярности – ток практически не протекает. В качестве выпрямляющего перехода используют контакт двух областей одного и того же материала с разным типом проводимости, т.е. *p-n*-переход. Часто используется гетеропереход, т.е. контакт двух областей из разных полупроводниковых материалов с разным значением ширины запрещенной зоны. Также используется выпрямляющий контакт металла с полупроводником.

По исходному материалу диоды подразделяются на кремниевые, германиевые и на основе арсенида галлия.

По конструктивно-технологическим особенностям диоды делят на точечные, плоскостные, диффузионные, эпитаксиальные и т.д.

В приведенной классификационной схеме представлено деление диодов по назначению и физическим особенностям функционирования.

Выпрямительные диоды являются наиболее распространенным классом полупроводниковых диодов. Они предназначены для преобразования переменного тока в постоянный при создании источников питания электронных устройств. Как правило, они работают на частоте 50 Гц, а верхняя граница рабочих частот не превышает 20 кГц.

По величине выпрямленного тока выпрямительные диоды делят на три группы:

- маломощные (на токи до 1А);
- средней мощности (на токи от 1А до 10А);
- мощные (на токи свыше 10А).

Помимо выпрямительных диодов в виде дискретного компонента используются выпрямительные блоки и столбы. Блоки состоят из нескольких выпрямительных диодов, соединенных по определенной схеме и изготовленных в виде конструктивно

законченного устройства. Выпрямительные столбы за счет последовательного соединения диодов используются в высоковольтных выпрямителях.

ВЧ, СВЧ и импульсные диоды отличаются от выпрямительных конструктивно-технологическими особенностями, позволяющими снизить барьерную емкость и облегчить преобразования сигналов на частотах от 20 до 600 МГц, а также работать в быстродействующих системах, в которых время переключения составляет около 0,1 нс.

Стабилитроном называют полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации напряжения. Это достигается за счет работы на обратной ветви вольт-амперной характеристики в режиме лавинного и туннельного пробоя. В результате обратный ток через диод (ток стабилизации) может изменяться в определенных пределах, а падение напряжения на стабилитроне остается практически постоянным, т.е. стабильным.

Разновидностью стабилитрона является *стабистор* – полупроводниковый диод, в котором для стабилизации напряжения используется прямая ветвь вольт-амперной характеристики. Для увеличения напряжения стабилизации стабисторы соединяют последовательно, монтируют в одном корпусе или формируют в одном кристалле.

Варикапом называют полупроводниковые диоды, у которых величина емкости *p-n*-перехода зависит от значения обратного напряжения. Это позволяет использовать варикапы в качестве элементов с электрически управляемой емкостью, что часто необходимо для изменения резонансной частоты колебательных контуров и фильтров в определенных пределах. Для разных типов варикапов емкость может изменяться от нескольких единиц до нескольких сотен пикофарад.

Туннельные диоды обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой, на которой имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Это позволяет использовать туннельные диоды для усиления, генерирования, переключения и преобразования электрических колебаний. Благодаря такому применению туннельные диоды относят к активным элементам электроники. Туннельные диоды обладают малой инерционностью, поэтому предельная частота может достигать сотен ГГц, а приборы могут быть отнесены к сверхвысокочастотным.

Разновидностью туннельных диодов являются *обращенные диоды*, у которых вольт-амперная характеристика имеет практически горизонтальный участок вместо участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Другой особенностью обращенных диодов является то, что проводящему состоянию соответствует обратная ветвь, а закрытому – прямая ветвь вольт-амперной характеристики. Благодаря своим особым свойствам и материалу из арсенида галлия, у которого высокая подвижность электронов, обращенные диоды могут применяться в СВЧ-диапазоне.

Фотодиодами называют полупроводниковые диоды, в которых величина обратного тока изменяется с помощью света (рисунок 4.15). При отсутствии светового потока и при обратном смещении через *p-n*-переход протекает небольшой обратный ток, называемый темновым током. При падении света на одну из областей диодной структуры происходит световая генерация электронно-дырочных пар фотоносителей. Если при этом внешняя цепь замкнута, обратный ток фотодиода возрастает. Если внешняя цепь разомкнута, то в результате генерации носителей и

их накопление в n - и p -областях структуры на электродах фотодиода возникает фото-ЭДС, значение которой зависит от величины светового потока.

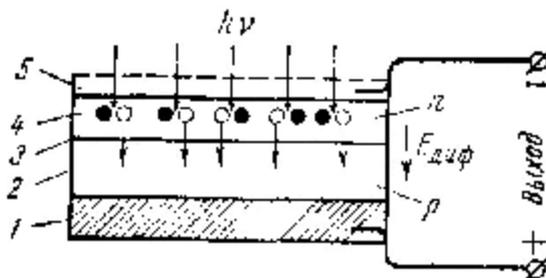


Рисунок 4.15 – Структура и схема включения фотодиода

- 1 – металлическая подложка (электрод);
- 2 – полупроводник p -типа;
- 3 – p - n -переход;
- 4 – полупроводник n -типа;
- 5 – полупрозрачный металлический электрод.

Таким образом, фотодиоды могут работать в фотодиодном или фотогальваническом режиме. В фотодиодном режиме при изменении светового потока изменяется ток в цепи и напряжение на диоде, т.е. возможно регулирование электрических параметров цепи с помощью светового потока.

В фотогальваническом режиме внешний источник питания отсутствует. Возникающая на электродах фото-ЭДС является результатом прямого преобразования световой энергии в электрическую. Фотодиоды, работающие в таком режиме, называют *фотоэлементами*. Их используют в устройствах преобразования световой энергии в электрическую, в частности, солнечных батареях, а также в устройствах автоматики для коммутации сигналов электрических устройств.

Светоизлучающие диоды (светодиоды), являющиеся по сути обратными аналогами фотоэлементов, осуществляют прямое преобразование электрической энергии в световую (рисунок 4.16).

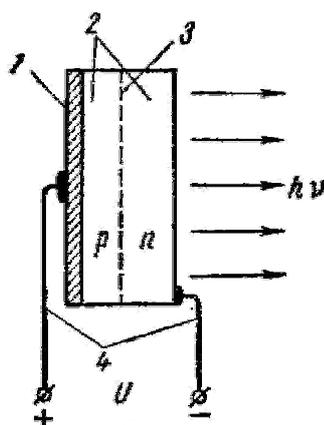


Рисунок 4.16 – Структура и схема включения светодиода

- 1 – сплошной серебряный электрод;
- 2 – p -область и n -область SiC ;
- 3 – p - n -переход;
- 4 – выводы.

Физической основой работы светодиодов является рекомбинационное свечение *p-n* – перехода. При рекомбинации электронно-дырочных пар носителей заряда выделяется энергия, практически равная ширине запрещенной зоны полупроводника. В результате рекомбинации световые кванты энергии излучаются во внешнюю среду.

Оптоэлектрическими свойствами обладают полупроводниковые материалы на основе химических соединений типа $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$. Для получения видимого излучения необходимы полупроводники с широкой запрещенной зоной. Поэтому в светодиодах используется карбид кремния ($\Delta E_3 = 2,8 \dots 3,1$ эВ), излучающий в области желто-зеленого свечения, фосфид галлия ($\Delta E_3 = 2,25$ эВ), дающий красное свечение, арсенид галлия ($\Delta E_3 = 1,43$ эВ) и др.

Светодиоды используют в качестве световых индикаторов, буквенно-цифровых индикаторов в виде матриц. Благодаря специальному расположению светодиодных структур и соответствующему управлению получают изображение букв и цифр, в том числе в виде бегущих строк.

Комбинация источник и приемник излучения позволяет получить компонент электронной техники, называемый *оптопарой*. В ней светодиод преобразует электрический сигнал в световой. Этот сигнал через оптическую среду передается на фотоприемник, где снова преобразуется в электрический сигнал. Таким образом, электрический сигнал на входе светодиода преобразуется в электрический сигнал на выходе фотоприемника. В результате двойного преобразования электрического сигнала устраняется прямая электрическая связь между источником сигнала и приемником, что часто необходимо для развязки электрических цепей.

В качестве фотоприемников, кроме фотодиодов, используют фоторезисторы, фототранзисторы, фототиристоры.

Транзисторы

Транзисторами называют трехэлектродные полупроводниковые приборы, подразделяемые по функционированию на два принципиально различных класса: биполярные и униполярные (полевые) транзисторы.

Биполярные транзисторы по структуре представляют собой три области полупроводникового монокристалла, отличающиеся типом и концентрацией носителей заряда. Из-за разных концентраций носителей заряда на границах областей образуются два взаимосвязанных электронно-дырочных перехода (рисунок 4.17). Переход между базой и эмиттером называется эмиттерным, а между базой и коллектором – коллекторным. Протекание токов и, следовательно, функционирование (работа) транзистора обеспечивается двумя типами носителей заряда: электронами и дырками. Именно по этой причине такие приборы называют биполярными транзисторами.

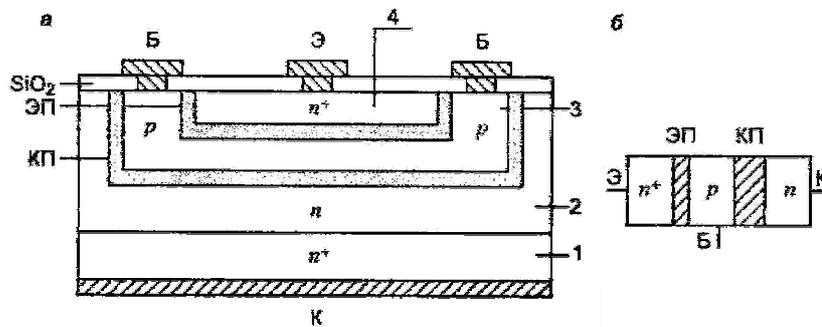


Рисунок 4.17 – Биполярный транзистор:

а – структура; б – упрощенная модель

- 1 – подложка n^+ -типа;
- 2 – область коллектора n -типа;
- 3 – область базы p -типа;
- 4 – область эмиттера n^+ -типа;
- ЭП – эмиттерный переход;
- КП – коллекторный переход.

Существует два типа биполярных транзисторов, отличающихся структурой, т.е. чередованием областей: $n-p-n$ и $p-n-p$ - транзисторы. Области и, следовательно, электроды транзистора имеют устоявшиеся названия. Центральная область монокристаллической структуры называется базой с концентрацией носителей заряда $N_6 \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$. К базе с одной стороны примыкает область с высокой концентрацией примеси $N_3 \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$, называемая эмиттером, а с другой - область с низкой концентрацией примеси $N_{\kappa} \approx (10^{15} \dots 10^{16}) \text{ см}^{-3}$, называемая коллектором.

Судя по приведенным значениям концентрации носителей заряда их количество в каждой из областей изменяется примерно на два порядка, т.е. в сто раз.

Наличие трех областей с различной концентрацией носителей заряда и электронно-дырочных переходов с взаимосвязанными токами через переходы позволяет преобразовывать электрические сигналы и осуществлять их усиление по току, напряжению и мощности. По этой причине транзисторы называют активными элементами электрических схем в отличие от резисторов, конденсаторов и др., называемых пассивными элементами.

Принципиальное отличие *униполярных (полевых) транзисторов* от биполярных заключается в том, что протекание тока (функционирование или работа транзистора) обеспечивается только одним типом носителей заряда, т.е., либо электронами, либо дырками, тогда как в биполярных транзисторах протекание токов обеспечивается обоими типами носителей заряда. Управление протеканием тока обеспечивается за счет электрического поля перпендикулярного поверхности полупроводника и направлению тока в транзисторе. По этой причине униполярные транзисторы стали называть полевыми транзисторами.

По структуре полевые транзисторы представляют собой трехэлектродные полупроводниковые приборы с каналом для протекания тока между двумя сильнолегированными областями полупроводника, называемые истоком и стоком. Управляющий электрод, отделенный разными способами от канала, называется затвором. Между одним из электродов и затвором подается напряжение, величина и знак которого определяют толщину канала, а следовательно и величину тока,

определяющего полностью или частично открытое (закрытое) состояние. В зависимости от типа носителей заряда в канале различают n - и p -канальные полевые транзисторы.

По способу управления проводимостью канала и структуре различают три разновидности полевых транзисторов:

- с управляющим p - n переходом;
- с управляющим переходом металл-полупроводник;
- с изолированным затвором.

В транзисторах с управляющим p - n переходом (рисунок 4.18) в сильнолегированной области полупроводника (n^+), края которой являются истоком и стоком, создается область с противоположным типом электропроводности (p). В результате образуется p - n переход, почти полностью перекрывающий n -канал между стоком и истоком. При подаче напряжения на переход, являющийся затвором, толщина перехода изменяется, в результате чего меняется толщина канала, а значит и его проводимость. Т.о. управление проводимостью канала осуществляется за счет электрического поля, создаваемого в p - n переходе.

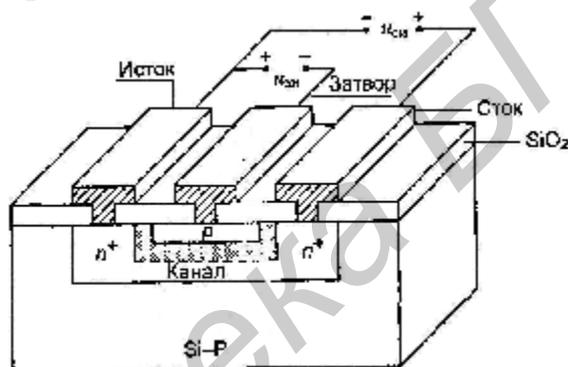


Рисунок 4.18 – Структура транзистора с управляющим p - n -переходом

В транзисторах с управляющим переходом металл-полупроводник (рисунок 4.19) также создаются две сильнолегированные области (n^+) полупроводника (сток и исток), соединенные тонким слоем (каналом) такой же проводимости.

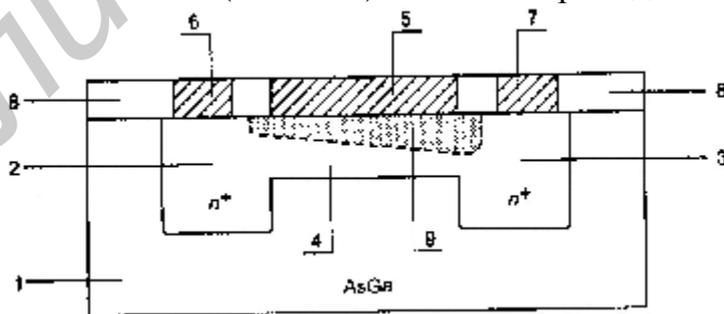


Рис 4.19 – Схема транзистора с управляющим переходом металл-полупроводник

- 1 – подложка;
- 2,3 – область истока и стока;
- 4 – область полупроводника n -типа;
- 5- металлический электрод затвора;
- 6,7 – металлические электроды истока и стока;
- 8 – слой диэлектрика;
- 9 – обедненный слой полупроводника n -типа.

На поверхность полупроводника над каналом наносится металлический электрод затвора, образующий с полупроводником выпрямляющий контакт, называемый барьером Шоттки. В области контакта металл-полупроводник в полупроводнике образуется область, обедненная носителями заряда. Толщина обедненного слоя зависит от напряжения, подаваемого на затвор. При изменении напряжения на затворе изменяется толщина канала, а следовательно, проводимость или величина тока между истоком и стоком. Принцип действия транзистора с управляющим переходом металл-полупроводник практически не отличается от принципа действия транзистора с управляющим $p-n$ переходом.

Полевые транзисторы с изолированным затвором (рисунок 4.20) принципиально отличаются от рассмотренных тем, что в них используется физическое явление, называемое эффектом поля. Сущность его заключается в том, что к поверхности полупроводника, отделенного от металлического электрода тонким слоем диэлектрика (SiO_2), под действием напряжения на электроде притягиваются или отталкиваются (индуцируются) носители заряда. Тем самым, в приповерхностном слое по отношению к объему полупроводника образуется область обогащенная или обедненная свободными носителями зарядов. Это приводит к увеличению или уменьшению проводимости приповерхностного слоя.

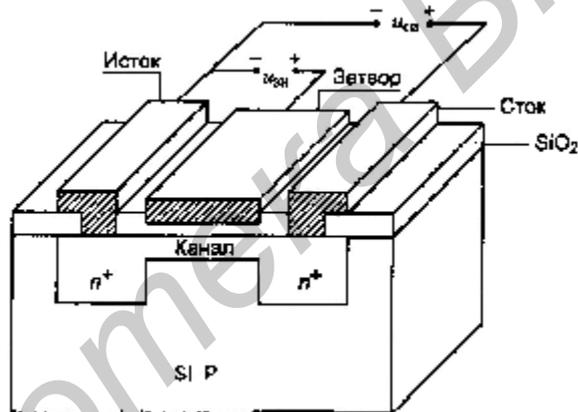


Рисунок 4.20 – Структура транзистора с изолированным затвором и каналом n -типа

Транзисторы с изолированным затвором по структуре представляют собой две сильнолегированные области полупроводника, являющиеся стоком и истоком. На поверхности полупроводника формируется тонкий слой диэлектрика. На диэлектрик наносится пленка металла, являющаяся затвором транзистора.

Приповерхностная область полупроводника между истоком и стоком является каналом, над которым расположен затвор. Канал может быть в виде тонкого слоя полупроводника с такой же концентрацией и типом носителей зарядов как в областях истока и стока. Такие по структуре транзисторы называются *со встроенным каналом*, толщина и проводимость которого регулируется напряжением на затворе.

Если между истоком и стоком отсутствует встроенный канал, то протекание тока между истоком и стоком обеспечивается за счет индуцированных электрическим полем затвор – подложка носителей заряда, тип которых такой же как в областях истока и стока. В результате между истоком и стоком возникает

канал с высокой проводимостью. Такие транзисторы называются *с индуцированным каналом*.

По материалу (типу) подзатворного диэлектрика различают транзисторы – МОП – металл-оксид-полупроводник и МДП – металл-диэлектрик-полупроводник.

В МОП-транзисторах подзатворный диэлектрик формируется в виде оксида полупроводникового материала, на основе которого изготовлен транзистор. В кремниевых транзисторах диэлектриком является оксид кремния – SiO_2 .

В МДП-транзисторах подзатворным диэлектриком может быть подходящий диэлектрический материал, в том числе и комбинированный из разных диэлектрических материалов.

Особенностью и достоинством всех полевых транзисторов является незначительный ток в управляющей цепи затвора, тогда как в биполярных транзисторах ток во входной цепи достаточно большой.

Полевые транзисторы по ряду других параметров также превосходят биполярные. Они занимают меньшую площадь подложки, что значительно повышает степень интеграции. Технология создания полевых транзисторов значительно проще, чем биполярных. Благодаря таким преимуществам выпуск интегральных микросхем на основе кремниевых полевых транзисторов составляет около 80% общего выпуска.

Фототранзистором называют транзистор, который управляется световыми сигналами, в отличие от традиционного, управляемого электрическими сигналами.

Биполярный фототранзистор (рисунок 4.21) имеет прозрачное окно, через которое световой поток облучает область базы.

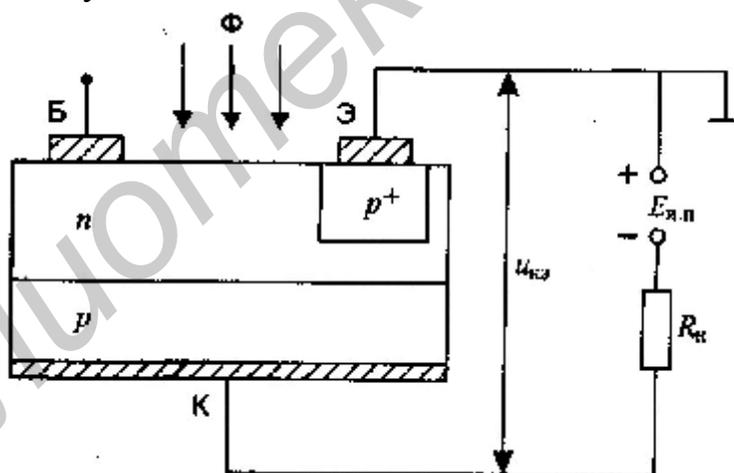


Рисунок 4.21 – Схематическое устройство фототранзистора

- Ф – световой поток;
- Б – базовый электрод;
- Э – эмиттерный электрод;
- К – коллекторный переход.

Под действием света происходит генерация электронно-дырочных пар, называемых фотонесителями. За счет напряжения коллектор-эмиттер переход эмиттер-база включен в прямом направлении, поэтому дырки диффундируют из базы в область коллектора, увеличивая коллекторный ток. Поскольку переход коллектор-база включен в обратном направлении, электроны остаются в базе и компенсируют положительный заряд ионизированных доноров в $p-n$ – переходе. В

результате потенциальный барьер эмиттерного перехода снижается, что приводит к увеличению потока (инъекции) дырок в базовую область. За счет этого увеличивается поток дырок к коллектору. Благодаря этому коллекторный ток в много раз превышает первоначальный фототок, обеспечиваемый фотоносителями за счет световой генерации.

При отсутствии светового потока в транзисторе протекает небольшой темновой ток коллектор-эмиттер. При облучении базы светом световой ток коллектора значительно возрастает за счет дополнительных носителей заряда. Величина светового тока фототранзистора увеличивается с увеличением светового потока. Таким образом, фототранзистор является приемником светового излучения и одновременно усилителем фототока. Вывод базы может быть использован для обычного электрического управления фототранзистором.

Основные классификационные признаки транзисторов

Промышленностью выпускается большое количество биполярных транзисторов различного типа и назначения. Основными классификационными признаками являются:

- назначение;
- тип исходного полупроводникового материала;
- рассеиваемая мощность;
- предельная частота.

По назначению биполярные транзисторы подразделяются на транзисторы широкого применения и специального назначения. Это отражается в условных обозначениях транзисторов.

Исходными полупроводниковыми материалами для изготовления транзисторов являются кремний, германий, арсенид галлия и соединения индия.

Соответственно, существуют четыре группы транзисторов, называемых по типу полупроводникового материала: кремневые, германиевые, арсенидгаллиевые и на основе соединений индия.

подавляющее большинство транзисторов изготавливается из кремния со структурой n-p-n.

По рассеиваемой мощности транзисторы подразделяются на три группы:

- малой мощности - менее 0,3 Вт;
- средней мощности - от 0,3 Вт до 1,5 Вт;
- большой мощности - более 1,5 Вт.

Мощные транзисторы характеризуются большими рабочими напряжениями и токами коллектора. Для этого используются многоэмиттерные транзисторы с одним общим базовым и коллекторным выводами. Такие транзисторы позволяют получать отдаваемую мощность в нагрузку до 200 Вт в диапазоне частот до 30 МГц.

Мощные транзисторы нуждаются в специальном теплоотводе, для чего кристалл транзистора крепят на массивном металлическом основании корпуса, а также используется специальный радиатор для отвода тепла.

По предельной частоте, независимо от рассеиваемой мощности, транзисторы делятся на четыре группы:

- низкочастотные – до 3 МГц;
- средней частоты – от 3 МГц до 30 МГц;
- высокочастотные – от 30 МГц до 120 МГц;
- СВЧ диапазона – свыше 120 МГц.

Современные технологические возможности позволяют создавать транзисторы с граничной частотой 10 ГГц при отдаваемой мощности в нагрузку 1 Вт.

Система условных обозначений транзисторов

Условные обозначения отражают определенную информацию о свойствах транзистора и состоят из буквенных и цифровых элементов обозначения.

Первый элемент характеризует полупроводниковый материал и может быть буквенным для транзисторов широкого применения либо цифровым для транзисторов специального назначения, а именно:

- Г (или 1) – германий;
- К (или 2) – кремний;
- А (или 3) – арсенид галлия;
- И (или 4) – соединения индия;

Второй элемент обозначения – буква Т для биполярных транзисторов и буква П – для полевых транзисторов.

Третий элемент обозначения – цифра, отражающая мощность и частотные свойства:

- 1 – маломощный низкочастотный;
- 2 – маломощный средней частоты;
- 3 – маломощный высокочастотный (до 30 МГц);
- 4 – средней мощности низкочастотный;
- 5 – средней мощности средней частоты;
- 6 – средней мощности высокочастотный;
- 7 – большой мощности низкочастотный;
- 8 – большой мощности средней частоты;
- 9 – большой мощности высокочастотный.

Четвертый и пятый элементы – цифры от 01 до 99, указывающие порядковый номер разработки данного типа транзистора.

Шестой элемент обозначения буквенный от А до Я отражает отличие транзистора по какому-либо параметру, характерному или наиболее важному для данного типа транзисторов.

Приведенная система обозначений транзисторов шестиэлементная, а для вновь разрабатываемых транзисторов используется семиэлементная система обозначений. В ней первый и второй элементы такие же, как и в существующей системе, а третий элемент, отражающий мощность и частотные свойства транзистора, несколько изменен. В частности, уменьшено количество групп транзисторов по этим параметрам. Выделено три группы маломощных (до 1 Вт) и три группы мощных (свыше 1 Вт) транзисторов. Исключено разделение на общепринятые частотные диапазоны, а введено только три значения граничной частоты.

В новой системе третий элемент в виде цифры означает:

- 1 – маломощный (до 1 Вт) с граничной частотой до 30 МГц;

- 2 – маломощный с граничной частотой до 300 МГц;
- 3 – маломощный с граничной частотой свыше 300 МГц;
- 4 – мощный (свыше 1 Вт) с граничной частотой до 30 МГц;
- 5 – мощный с граничной частотой до 300 МГц;
- 6 – мощный с граничной частотой свыше 300 МГц.

Четвертый, пятый и шестой элементы – цифры от 001 до 999, указывающие порядковый номер разработки данного типа транзистора, определяемого первыми тремя элементами обозначения.

Седьмой элемент характеризует отличие по какому-либо параметру.

Тиристоры

Полупроводниковые приборы с тремя и более электронно-дырочными переходами называются тиристорами. На вольт-амперной характеристике тиристора имеется один или два участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, что позволяет управлять состоянием тиристора, которое может быть открытым или закрытым. В открытом состоянии через тиристор протекает большой ток, а в закрытом – очень маленький. Таким образом, тиристор может работать в режиме ключа (открыт - закрыт), либо в режиме выпрямительного диода. Существует несколько разновидностей тиристорov:

- диодный или динистор;
- триодный или тринистор;
- симметричный или симистор.

Динистор (рисунок 4.22) имеет четырехслойную структуру с чередующимся типом электропроводности ($n-p-n-p$), т.е. три электронно-дырочных перехода и два электрода. Крайние области структуры называют эмиттерами (Э_1 , Э_2), а примыкающие к ним $p-n$ -переходы называют эмиттерными (ЭП_1 , ЭП_2). Средние области n - и p -типа называют базами (Б_1 , Б_2), а $p-n$ -переход между ними называют коллекторным переходом. Контакт к внешнему n -слою называют катодом (К), а контакт к внешнему p -слою называют анодом (А). В зависимости от величины и знака напряжения на аноде динистор переключается из закрытого в открытое состояние и наоборот. Т.е. динистор является переключательным электронным прибором.

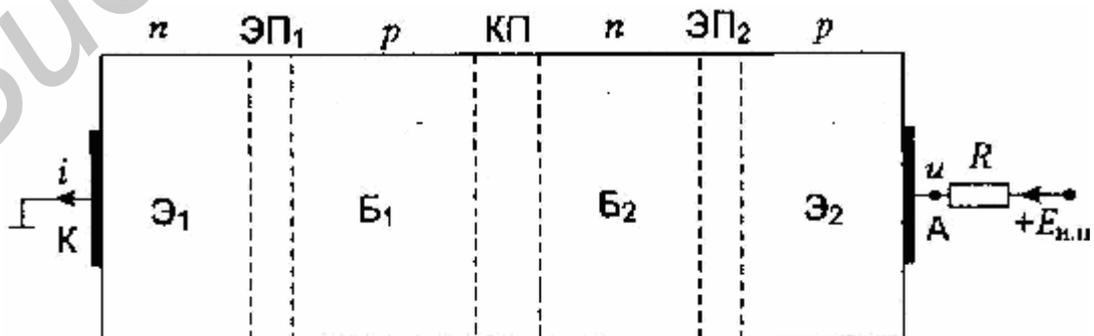


Рисунок 4.22 – Схематическое устройство динистора

Тринистор (рисунок 4.23) имеет дополнительный управляющий электрод от одной из внутренних областей $n-p-n-p$ структуры (динистора). Это позволяет управлять режимом работы тринистора.

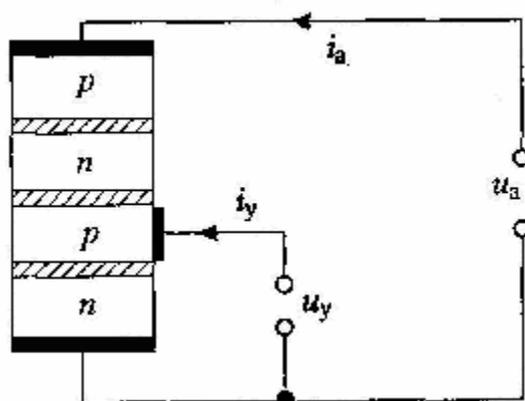


Рисунок 4.23 – Схематическое устройство тринистора

Тринисторы могут запираются либо путем снижения анодного напряжения, либо путем подачи на управляющий электрод коротких импульсов обратного напряжения. Изменяя напряжение на управляющем электроде, можно менять величину постоянной составляющей выпрямленного тока при использовании тиристора в качестве выпрямителя переменного тока.

Симистор (рисунок 4.24) имеет пятислойную структуру $n-p-n-p-n$ и, соответственно, четыре $p-n$ -перехода.

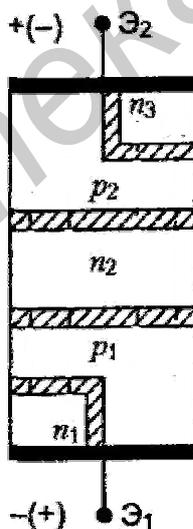


Рисунок 4.24 – Схематическое устройство симистора

За счет этого вольт-амперная характеристика имеет два участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. К наружным областям формируются два электрода. В зависимости от знака и величины напряжения на электродах ток через симистор может протекать либо в одном либо в другом направлении. Т.е. симистор является переключательным прибором, работающим как при положительном, так и при отрицательном напряжении на аноде.

При наличии третьего управляющего электрода к центральной области структуры симистора можно управлять напряжением включения симистора путем подачи импульса тока в цепь управляющего электрода.

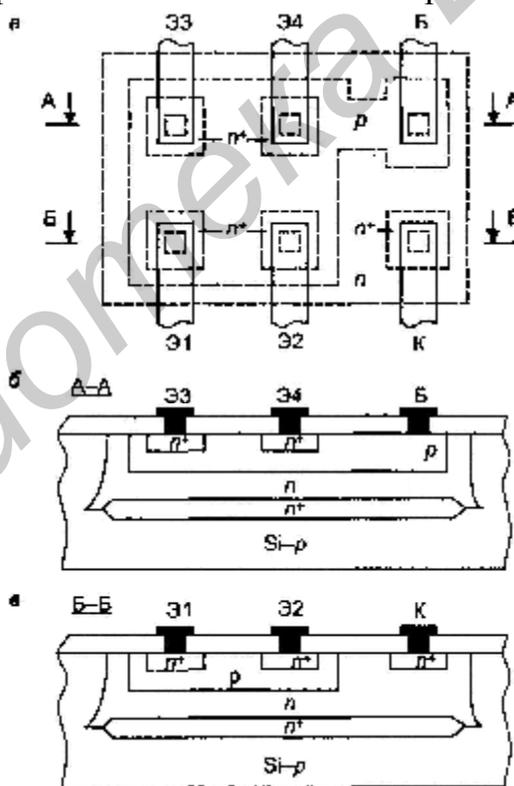
Симистор с двумя электродами называют *дианом*, а с тремя электродами – *трианом*.

Не зависимо от типа, тиристоры применяются в различных схемах радио-, промышленной электроники и автоматики.

Многоэлектродные полупроводниковые приборы

Поскольку существуют двухэлектродные (диоды) и трехэлектродные (транзисторы) полупроводниковые приборы, изготавливаемые как в дискретном, так и в интегральном исполнении, представляется логичным выделить в отдельную группу многоэлектродные (больше трех) полупроводниковые приборы. К этой группе могут быть отнесены многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы, комплементарные пары транзисторов, приборы с зарядовой связью и интегральные микросхемы (ИМС), являющиеся новым и весьма разнообразным классом современных компонентов приборов и устройств электроники, в том числе вычислительной техники. В связи с особой значимостью ИМС в приведенной классификационной схеме, они выделены в отдельную группу приборов.

Многоэмиттерные транзисторы (МЭТ) не выпускаются в виде дискретных приборов, а являются интегральными элементами микроэлектроники (рисунок 4.25).



**Рисунок 4.25 – Топология и структура МЭТ:
а – топология; б, в – структура транзистора.**

По структуре они аналогичны биполярным транзисторам, изготовленным по планарной технологии, обеспечивающей расположение выводов (эмиттеров) от областей транзистора на поверхности подложки. Отличие состоит в том, что в базовом слое формируются несколько эмиттерных областей (до 8 эмиттеров).

Поэтому, в первом приближении, МЭТ можно рассматривать как совокупность отдельных транзисторов, имеющих общую базу и коллектор.

Такие структуры являются основными элементами цифровых интегральных схем транзистор-транзисторной логики (ТТЛ).

Многоколлекторные транзисторы (МКТ) как и МЭТ являются интегральными элементами микроэлектроники (рисунок 4.26).

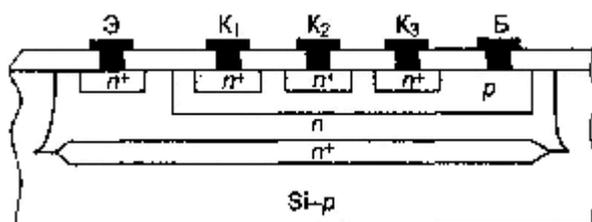


Рисунок 4.26 – Структура МКТ

По структуре МКТ аналогичны МЭТ. Различие состоит в том, как используются элементы структуры. В МКТ общим для всех транзисторов эмиттерным слоем является эпитаксиальный *n*-слой. В базовом слое, общим как и в случае МЭТ, формируются высоколегированные *n*⁺-области, выполняющие роль коллекторов транзистора.

По сути МКТ – это МЭТ, работающий в инверсном режиме. Число коллекторов не превышает трех-пяти.

МКТ являются основой одного из классов цифровых интегральных схем интегральной инжекционной логики, называемых схемами И²Л.

Комплементарными парами транзисторов называются структуры, представляющие собой сочетание транзисторов с каналами *n*- и *p*-типа, соединенных последовательно. Такие структуры необходимы для решения специфических задач схемотехники.

Они изготавливаются в едином технологическом цикле либо на биполярных, либо на полевых транзисторах. Технология изготовления комплементарной пары на биполярных транзисторах значительно сложнее, чем на полевых транзисторах. Поэтому предпочтение отдается комплементарным МДП или МОП структурам, которые в электронике называются КМОП-структурами или КМОП-транзисторами.

В таких структурах транзистор с *n*-каналом формируется в кремневой подложке *n*- типа. Транзистор с *p*-каналом изготавливают в специальном кармане *n*-типа (рисунок 4.27).

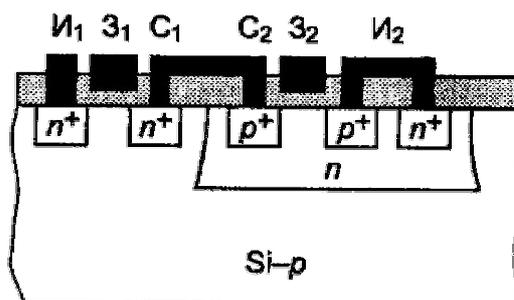


Рисунок 4.27 – Структура комплементарной пары транзисторов

Другими способами создания КМОП-транзисторов на единой подложке является КНС технология (кремний на сапфире) или создание КНД структур (кремний на диэлектрике). Сущность методов заключается в том, что на диэлектрической подложке эпитаксиальным выращиванием формируется либо «островки» - локальные области, либо тонкий слой монокристаллического кремния.

В локальных областях, либо эпитаксиальном сплошном монокристаллическом слое формируются МДП-структуры с каналом n - или p -типа, т.е. комплементарная пара транзисторов.

Следует отметить, что технологические приемы электроники позволяют достаточно просто получать на одной подложке сочетание МОП-транзисторов с биполярными и обеспечивать их совместную работу в низковольтных схемах без специальных согласующих элементов. Обычно комплементарные транзисторы с каналами n - или p -типа соединены последовательно. В связи с этим комплементарные пары с достаточной условностью можно отнести к многоэлектродным полупроводниковым приборам. Electroдами являются два истока, два затвора и объединенный сток.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС), представляют собой совокупность взаимодействующих МДП-структур (рисунок 4.28).

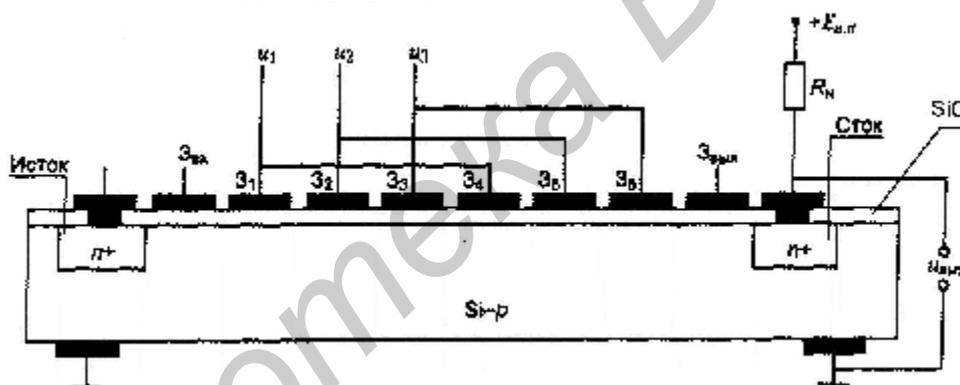


Рисунок 4.28 – структура ПЗС

Металлические электроды из алюминия расположены на предварительно окисленной поверхности полупроводниковой подложки в виде последовательной горизонтальной цепочки. Количество МДП-структур, расположенных на микронных расстояниях друг от друга, может достигать нескольких тысяч. Поэтому ПЗС с полным правом можно считать большой интегральной схемой.

Под каждым металлическим электродом (затвором) за счет внешнего напряжения затвор-исток создается локальной приповерхностный заряд, называемый зарядовым пакетом. Он может длительное время сохраняться (запоминаться) или перемещаться от одной МДП-структуры к другой за счет изменения напряжения на металлических электродах.

Таким образом, ПЗС представляет собой управляемое запоминающее устройство (ЗУ) сигналов, представленных в зарядовой форме. На основе ПЗС возможно суммирование, вычитание, умножение аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразование сигналов. Такие операции широко используются в ЭВМ. С помощью ПЗС могут запоминаться и аналоговые сигналы.

Управление зарядовыми пакетами может осуществляться с трех- или двухфазным питанием, подаваемым на затворы МДП-структур. Зарядовый пакет под затвором может создаваться путем локального освещения поверхности, на которой сформированы МДП-структуры. Образующийся заряд пропорционален освещенности. При разной освещенности поверхности ПЗС совокупность зарядов под затворами будет отражать изображение, спроектированное на ПЗС.

При таком управлении ПЗС осуществляется преобразование оптического изображения в электрический сигнал, что широко используется в телевидении.

Одно из достоинств ПЗС состоит в малой потребляемой мощности. В режиме хранения информации мощность практически не потребляется. Ток в МДП-структурах ПЗС протекает только тогда, когда происходит передача или запись заряда. При этом максимальная мощность за период при передаче одного пакета в типичных режимах работы не превышает 4мкВт/бит.

Контрольные вопросы

1. Назовите наиболее известные полупроводниковые приборы.
2. Какие полупроводниковые материалы используют для изготовления мощных диодов и транзисторов?
3. Какие материалы используют для изготовления ВЧ- и СВЧ-транзисторов?
4. Какие элементы электроники изготавливают на основе полупроводниковых химических соединений?
5. В каких приборах используется SiC?
6. Изобразите типовой профиль биполярного транзистора.
7. Какие существуют типы биполярных транзисторов?
8. Изобразите профиль МДП-транзистора.
9. Перечислите компоненты электроники, в основе работы которых используется зависимость электропроводности от внешних факторов.

4.4. Интегральные микросхемы

Усложнение функций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) существенно обостряют проблемы надежности, потребляемой мощности, габаритов, веса и стоимости изделий. Современные задачи электроники невозможно решать на основе *дискретной* элементной базы. Поэтому возникла необходимость замены дискретных компонентов принципиально новыми элементами – *интегральными микросхемами* (ИМС). Для их создания потребовалось использование качественно новых физических принципов работы. В результате были получены специфические элементы, не имеющие аналогов в дискретной полупроводниковой электронике. К таким элементам следует отнести многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы, приборы с зарядовой связью и т.д. Кроме того, повышение функциональной сложности потребовало создания приборов и устройств на основе принципиально новых схемотехнических решений.

Таким образом, современные ИМС сочетают в себе физические, конструктивно-технологические и схемотехнические аспекты электроники.

Под интегральными микросхемами понимают совокупность нескольких взаимосвязанных компонентов (*R, C, D, T* и т.д.), выполняющих определенную функцию преобразования информации и изготавливаемых в едином технологическом цикле на одной и той же несущей конструкции, называемой подложкой.

Термин - "интегральная микросхема" - отображает факт объединения (интеграции) отдельных радиоэлементов (компонентов) в конструктивно единое изделие, а также факт усложнения функций, выполняемых этим изделием, по сравнению с функциями отдельных компонентов. *Компоненты ИС не могут быть выделены* в качестве самостоятельных изделий (деталей) и поэтому называются интегральными элементами в отличие от дискретных компонентов, конструктивно обособленных в виде деталей и приборов.

Идея интеграции компонентов зародилась в недрах дискретной транзисторной техники, прогрессивные методы которой – *групповой метод и планарная технология* - положены в основу изготовления ИС. Сущность группового метода изготовления транзисторов, хорошо освоенного в дискретной транзисторной технике, состоит в том, что на одной полупроводниковой пластине одновременно изготавливается множество транзисторов, расположенных регулярно в приповерхностном слое пластины, являющейся одновременно и подложкой. Затем пластина разрезается на отдельные кристаллы, каждый из которых закрепляется в отдельном корпусе и становится дискретным элементом, используемым в схемах РЭА.

При создании ИМС групповой метод и интеграция элементов заключаются в том, что на одной полупроводниковой пластине *одновременно, т.е. в едином технологическом цикле*, изготавливаются множество функционально законченных узлов, содержащих необходимые элементы (*R, C, D, T*). Разрезав пластину на кристаллы и поместив их в корпус, получают готовый функциональный узел в виде конструктивно единого электронного устройства - ИМС.

Элементы ИС находятся на различной глубине от поверхности и чтобы соединить их между собой необходимо обеспечить расположение выводов и электродов всех элементов в единой плоскости. Это достигается за счет *планарной*

технологии, позволяющей располагать выводы интегральных элементов на поверхности полупроводниковой пластины. Благодаря этому элементы ИС соединяются в схему не пайкой, а тонкими металлическими полосками, наносимыми на поверхность пластины.

Классификация и типы интегральных микросхем

Существует несколько *признаков*, по которым осуществляется разделение микросхем на группы и классы. Таковыми являются *конструктивно-технологический, функциональный и степень интеграции*.

По конструктивно-технологическому способу изготовления и получаемой при этом структуре различают два принципиально разных типа ИС – *полупроводниковые и плёночные*. В свою очередь полупроводниковые ИС подразделяются на микросхемы на основе биполярных и на основе МДП транзисторов. Плёночные ИМС делятся на тонкоплёночные и толстоплёночные. Плёночные ИС являются основой изготовления гибридных микросхем – ГИС. По смешанной технологии изготавливают совмещённые ИС, основой которых являются полупроводниковые ИС.

Приведённая классификация является наиболее общей и для наглядности может быть представлена в виде схемы (рисунок 4.29).

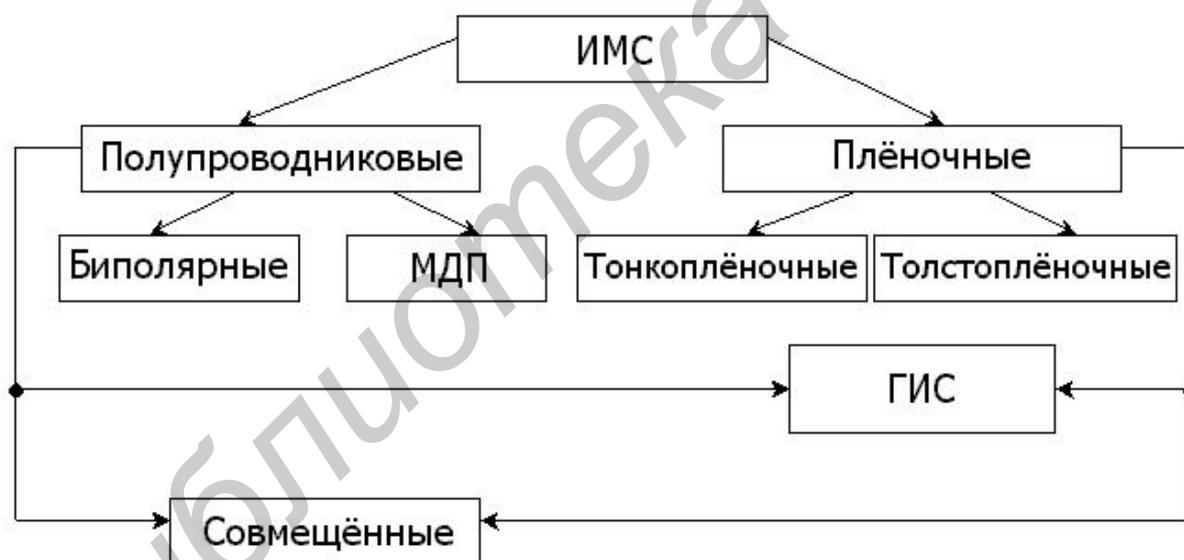


Рисунок 4.29 – Классификация ИМС

По функциональному назначению или виду обрабатываемого сигнала ИМС подразделяются на два общих класса - цифровые и аналоговые ИС. В отдельные группы ИМС, работающие одновременно и с кодоимпульсными сигналами и с непрерывно меняющимися во времени сигналами следует выделить аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, а также принципиально новый класс больших интегральных схем - микропроцессоры (МП).

Микропроцессорами в современной микроэлектронике называют функционально законченное устройство, которое выполняет операции над данными в соответствии с программой, поступающей на его вход. Т.е., функционирование

МП. определяется не жесткой электрической схемой, а программой, находящейся в запоминающем устройстве. МП являются сложным многофункциональным устройством разнообразным как по своим возможностям, так и по архитектуре и характеризуются большим количеством параметров.

По степени интеграции, т.е. по количеству элементов на одном кристалле, характеризующему функциональную сложность ИС, различаются простые ИС, средние ИС, большие ИС - БИС и сверхбольшие ИС - СБИС.

Для количественной характеристики степени интеграции иногда используют условный коэффициент $k = \lg N$, где N - степень интеграции. Для простых ИС $k \leq 1$, т.е. $N \leq 10$ элементов на кристалл. Для средних ИС $1 < k \leq 2$, т.е. до 100 элементов на кристалл. Если $2 < k \leq 3$, то ИС называют большими, а если $k > 3$, т.е. более 1000 элементов на кристалле, то такие микросхемы относятся к классу СБИС. Современные СБИС изготавливаются с плотностью активных элементов на кристалле, превышающей 10^6

Уровень *технологической сложности* ИС характеризуется *плотностью упаковки*, т.е. количеством элементов (чаще всего транзисторов) на единицу площади кристалла. В настоящее время этот показатель достигает величины $(4...5) \cdot 10^6$ элементов на мм^2 .

Приведённое деление ИМС по различным классификационным признакам является наиболее общим и устоявшимся к настоящему времени. Однако оно не может претендовать на универсальность подхода и охвата всех типов ИМС. Существуют и более детальные классификации по технологическим особенностям, на основе типа используемых транзисторов, по выполняемым функциям и т.п. Их подробное рассмотрение является предметом специальных курсов.

Полупроводниковые ИС на биполярных и МДП-транзисторах

Основой полупроводниковой ИС является *монокристаллическая подложка*, в приповерхностной области которой различными технологическими приемами формируются элементы ИС. До 96% выпускаемых полупроводниковых ИМС используют в качестве подложки кремниевые полупроводниковые пластины диаметром до 200-250 мм. Длительность процесса изготовления ИС по планарной технологии составляет от 8 до 15 дней и включает до 1500 операций для БИС.

Основным элементом биполярных ИС является *n-p-n* транзистор, в процессе изготовления которого изготавливаются другие элементы схемы. Так, например, в качестве диода используют один из *p-n* переходов; резистор формируют одновременно с базовым слоем и он имеет ту же глубину залегания. В качестве конденсатора используют обратно смещенные *p-n* переходы коллектор-база. От приложенного напряжения изменяется заряд перехода, что эквивалентно изменению заряда конденсатора при изменении приложенного напряжения.

Существенным недостатком биполярных ИС является необходимость изоляции элементов схемы друг от друга и большое количество технологических операций.

Физическое разделение элементов ИС позволяет осуществить КНС-технология (кремний на сапфире). На сапфировой подложке, являющейся диэлектриком, эпитаксиальным выращиванием создаются *p* и *n* островки, в которых методами локальной диффузии формируются *p-n* переходы, т.е. биполярные транзисторы с

различным типом проводимости. Такая пара транзисторов называется комплементарной.

Недостатков, связанных со сложностью технологии и необходимостью изоляции элементов лишены ИС на основе МДП-транзисторов.

Основным элементом МДП ИС является транзистор с индуцированным каналом *p*-типа, *n*-типа и комплементарной пары транзисторов с каналами *p*- и *n*-типа, сформированной на общей полупроводниковой или диэлектрической подложке.

В качестве резисторов в МДП ИС используют транзисторы по схеме двухполюсника, а роль конденсатора выполняет МОП-структура, у которой слой диэлектрика получают одновременно с подзатворным слоем транзистора, а полупроводниковая обкладка одновременно со стоком и истоком.

Достоинством МДП-ИС является заметное упрощение конструкции и технологии производства, высокая надёжность и более низкая стоимость по сравнению с биполярными ИС. Благодаря электрической самоизоляции элементов МДП ИС снимаются проблемы с технологией создания изолирующих областей структур, и тем самым увеличивается эффективность использования поверхности пластины и значительно повышается плотность упаковки. Перечисленные преимущества создали предпосылки преимущественного изготовления ИС на МДП-транзисторах. Более 80% общего выпуска полупроводниковых ИМС приходится на МДП ИС.

Одним из достоинств МДП ИС является возможность их совмещения с биполярными схемами различных типов.

Пленочные ИС

Плѐночные ИС изготавливаются на *диэлектрических подложках*, что снимает вопросы изоляции элементов друг от друга и исключает их взаимное влияние и паразитные связи. Этим пленочные ИС выгодно отличаются от полупроводниковых. Особенность плѐночных ИС заключается в изготовлении на подложке только пассивных элементов, поскольку активные элементы в плѐночном варианте промышленным путѐм не изготавливаются.

Элементы пленочных ИС формируются в виде пленок резистивных, проводящих и диэлектрических материалов, нанесенных на поверхность подложки. В зависимости от способа их нанесения и связанной с этим их толщиной различают тонкоплѐночные (до 1-2 мкм) ИС и толстоплѐночные ИС (от 10 до 20 мкм) ИС. Структуры обоих типов ИС принципиально не отличаются.

Толстоплѐночные ИС изготавливаются путем нанесения паст различного состава заданной толщины через трафареты-маски, определяющие геометрию элементов схемы. Состав паст определяется типом формируемой пленки - резистивная, проводящая или диэлектрическая. Механический способ нанесения паст не позволяет делать толщину пленки менее 10-20 мкм (обычно 50-100 мкм) и не обеспечивает достаточно малых допусков на требуемые размеры и, соответственно, номиналы резисторов и конденсаторов. Достоинство толстоплѐночных ИС - простота технологии.

Тонкопленочные ИС (ТкИС) имеют более сложную технологию и требуют более сложного технологического оборудования. Элементы ИС получают осаждением на диэлектрическую подложку проводящих резистивных и диэлектрических материалов в вакууме из паровой фазы. Толщина пленок менее 1 мкм, поскольку, с одной стороны, для создания пленки более 1 мкм требуется много времени, а с другой стороны, пленки большой толщины отслаиваются от подложки. Конфигурацию элементов ИС получают при осаждении пленки на подложку из паровой фазы (задают с помощью трафарет-маски), либо маску в виде выращенного окисного слоя. Особенностью ТкИС является малая скорость роста пленок, что позволяет регулировать ее толщину, обеспечивая тем самым малые допуски на номиналы элементов, т.е. обеспечивается достаточно высокая прецизионность.

Поскольку плёночные ИС содержат только пассивные элементы, поэтому их дополняют дискретными компонентами, располагая их на той же подложке и соединяя с пленочными элементами пайкой или сваркой. Дискретными компонентами могут быть активные элементы - диоды и транзисторы, а также конденсаторы и резисторы больших номиналов.

Гибридные ИС

Микросхема, представляющая собой комбинацию пленочных пассивных элементов и дискретных активных компонентов называется гибридной ИС. Дискретные компоненты называют навесными, подчеркивая их обособленность от основного технологического цикла.

Тонкопленочные R и C по сравнению с диффузионными элементами полупроводниковых ИС имеют преимущества: 1) малые паразитные емкости и последовательное сопротивление, 2) широкий диапазон номиналов, 3) высокую воспроизводимость, 4) резисторы высокого удельного сопротивления занимают меньшую площадь, 5) нет необходимости в изолирующих переходах, 6) паразитные эффекты в пленочных элементах прямо пропорциональны их площади, тогда как у диффузионных элементов зависят как от площади, так и от напряжения.

ГИС имеют ряд преимуществ перед полупроводниковыми ИС, что обусловило их широкое производство и применение. Они характеризуются простотой изготовления, малой трудоемкостью, непродолжительностью производственного цикла и низкой стоимостью. Возможно многоуровневое расположение пассивных элементов. Использование в качестве навесных элементов полупроводниковых ИС значительно расширяет функциональные возможности БИС. Плёночная технология позволяет создавать прецизионные R и C , что необходимо в схемах с повышенной точностью элементов, в частности в схемах СВЧ. Исключаются трудности изоляции элементов и уменьшаются тем самым паразитные связи, что также свидетельствует в пользу СВЧ. При разработке мощных ИС толстопленочная технологи обеспечивает лучшее рассеяние тепла. Возможна подгонка номиналов элементов с точностью от 1 до 0,1 и 0,01%.

Расширение функциональной сложности ГИС за счет навесных ПП ИС и даже БИС делает их не конкурентом, а дополнением, расширяющим возможности полупроводниковых ИС.

Совмещенные ИС

Основой изготовления совмещенных ИС является *полупроводниковая пластина*, в которой по планарно-эпитаксиальной технологии в приповерхностной области формируются активные элементы-транзисторы, а пассивные элементы изготавливаются по пленочной технологии путем нанесения или осаждения пленок резистивных и проводящих материалов на предварительно окисленную (изолированную) поверхность полупроводниковой пластины. Совмещенные ИС выгодно сочетают достоинства полупроводниковых ИС с одним из главных достоинств плёночных ИС, а именно - высокой точностью и широким диапазоном номиналов сопротивлений и конденсаторов. Такие ИС выгодны, если требуются высокие значения номиналов сопротивлений и конденсаторов, при необходимости максимального использования достоинств полупроводниковых ИС.

Технология полупроводниковых ИС основана на использовании базовых процессов полупроводниковой микроэлектроники - эпитаксии, легирования диффузией или имплантацией, фотолитографии, окисления и травления. Полупроводниковые слои с нужным типом проводимости получают либо в самой исходной пластине, либо в эпитаксиальном слое путем легирования поочередно донорными и акцепторными примесями. В результате образуются слои с разным типом проводимости и *p-n* переходы на границах слоев. Отдельные слои используются в качестве резисторов, одной из обкладок МДП конденсаторов, а *p-n* переходы используют в качестве транзисторов, диодов или диффузионных конденсаторов. Геометрия слоев определяется фотолитографией.

В настоящее время, доминирующее положение занимают полупроводниковые ИС. Основным их достоинством является высокая степень интеграции, и, следовательно, высокая функциональная сложность ИС. Объем выпуска ПП ИС более чем на порядок превышает выпуск ГИС.

Контрольные вопросы

1. На какие классы делят ИМС по конструктивно-технологическому признаку?
2. На какие классы делятся ИМС по функциональному назначению?
3. Что такое степень интеграции, и, на какие классы делят ИМС по этому признаку?
4. Что является основой изготовления биполярных ИС?
5. Назовите основной элемент биполярных ИС.
6. Назовите основной элемент МДП интегральных схем.
7. Как изготавливаются пленочные ИС?
8. Что такое гибридные ИС и каковы их основные достоинства перед биполярными ИС?

Глава 5. МАГНЕТИКИ

5.1. Природа магнетизма и магнитные свойства веществ.

Магнетик - вещество, основным свойством которого является способность намагничиваться.

Магнитные свойства всех веществ обусловлены магнитными свойствами атомов, которые в свою очередь определяются магнитными свойствами электронов, поскольку магнетизм других частиц - нейтронов, протонов весьма незначительный.

Электрон обладает орбитальным и спиновым магнитными моментами, которые, геометрически складываясь, создают результирующий момент атома. Следует подчеркнуть, что на полностью заполненных электронами орбитах спиновый и орбитальный моменты скомпенсированы и, таким образом, магнитный момент атома определяется только электронами на не полностью заполненных внутренних орбитах.

Суммарный магнитный момент всех атомов в единице объема называется намагниченностью J . Намагниченность $J = 0$, когда вещество не намагничено, т.е. в пространстве, окружающем вещество, отсутствует внешнее магнитное поле. При помещении вещества в магнитное поле с напряженностью H происходит ориентация магнитных моментов атомов и намагниченность определяется соотношением $J = k_m H$, где k_m - безразмерная величина, которая называется *магнитная восприимчивость*. Она характеризует способность веществ намагничиваться во внешнем магнитном поле с напряженностью H .

На практике способность веществ намагничиваться принято характеризовать *относительной магнитной проницаемостью* $m = (1 + k_m)$, которая фактически является коэффициентом пропорциональности, связывающим магнитную индукцию в веществе с напряженностью внешнего поля H . Магнитная проницаемость μ показывает во сколько раз магнитная индукция B поля в веществе больше, чем магнитная индукция B_0 в вакууме.

В соответствии с численными значениями k_m и μ , а также характером их зависимости от напряженности внешнего поля H и температуры T различают следующие основные типы магнитных явлений и магнетиков:

- диамагнетизм – диамагнетики $k_m \approx -10^{-5} < 0, m < 1$;
- парамагнетизм - парамагнетики $k_m \approx (10^{-3} \dots 10^{-6}) > 0, \mu \sim 1$;
- ферромагнетизм - ферромагнетики $k_m \sim 10^6 \gg 0, m \gg 1$;
- антиферромагнетизм - антиферромагнетики $k_m \sim (10^{-3} \dots 10^{-5}) > 0, \mu > 1$;
- ферримагнетизм - ферримагнетики $k_m \sim (10^3 \dots 10^5) > 0, m \gg 1$.

Диамагнитный эффект заключается в том, что под действием внешнего магнитного поля возникающий в веществе магнитный момент направлен противоположно направлению внешнего поля. Следовательно, магнитная восприимчивость – величина отрицательная, очень мала и часто не зависит от

напряженности поля и температуры. Диамагнетизм проявляется в веществах, в которых орбитальные и спиновые моменты атомов полностью скомпенсированы. К ним относятся водород, инертные газы, цветные и благородные металлы.

Парамагнитный эффект наблюдается в веществах с некомпенсированными орбитальным и спиновым магнитными моментами, когда отсутствует магнитный атомный порядок. При отсутствии внешнего поля векторы магнитных моментов разориентированы и суммарный момент равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля возникает преимущественная ориентация магнитных моментов вдоль него. Однако k_m очень мала и существенно зависит от температуры. К веществам данного класса относятся щелочные, щелочно-земельные и некоторые переходные металлы.

Ферромагнитный эффект заключается в том, что при температуре ниже точки Кюри даже в отсутствие внешнего поля существует ферромагнитный атомный порядок. Ему соответствует параллельное расположение спиновых моментов. Это означает, что при напряженности поля $H = 0$ ферромагнетик находится в состоянии самопроизвольного или спонтанного намагничивания. Магнитная восприимчивость $k_m \gg 0$ и существенно зависит от напряженности внешнего поля и температуры. К ферромагнетикам относятся Fe, Ni, Co, Cd , их соединения и сплавы, а также некоторые сплавы Mn, Ag, Al .

Ферромагнетики характеризуются:

- кристаллическим строением и доменной структурой при температурах ниже точки Кюри;
- нелинейной зависимостью μ и k_m , от H и температуры;
- способностью даже в слабых полях намагничиваться до насыщения, когда магнитные моменты всех атомов соразориентированы по направлению внешнего поля;
- магнитным гистерезисом, т.е. отставанием намагниченности от внешнего поля H ;
- температурой Кюри T_K , выше которой теряются магнитные свойства, т.е. разрушается ферромагнитный атомный порядок.

Антиферромагнитный эффект характеризуется наличием антиферромагнитного атомного порядка, когда магнитные моменты соседних атомов ориентированы антипараллельно и скомпенсированы так, что при $H=0$ результирующий магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего поля магнитные моменты атомов устанавливаются по его направлению. Поэтому k_m положительна, но очень мала и сильно зависит от температуры.

Ферримагнитный эффект - это некомпенсированный антиферромагнетизм, который характеризуется ферримагнитным атомным порядком. Это означает, что магнитные моменты атомов антипараллельны и некомпенсированы. Эффект проявляется в том, что вещество по кристаллической структуре состоит из двух подрешеток, создающих встречные некомпенсированные моменты. Для таких веществ $k_m \gg 0$ и зависит от температуры, причем при некоторой T_N , называемой температурой (точкой) Нееля, наступает компенсация встречных магнитных моментов и вещество теряет магнитные свойства. Точка Кюри для

некоторых ферромагнетиков может совпадать с точкой Нееля, а может быть и несколько выше.

При температурах выше точки Кюри для ферромагнетиков и выше точки Нееля для антиферромагнетиков и ферримагнетиков нарушается соответствующий атомный магнитный порядок и они переходят в парамагнитное состояние.

5.2. Процесс намагничивания и количественные параметры магнитных материалов

С технической точки зрения в качестве магнитных материалов наибольший интерес представляют ферро-, антиферро- и ферримагнетики. Несмотря на различия в строении и магнитных свойствах при их помещении во внешнее магнитное поле, процессы ориентации магнитных моментов характеризуются одними и теми же закономерностями, т.е. процессы их намагничивания аналогичны. Поэтому нет необходимости рассматривать их отдельно, за исключением особых случаев.

Особенностью всех магнитных материалов, или просто магнетиков, является их доменная структура. Домен - это макроскопическая область с магнитным моментом определенного направления, или же область спонтанного намагничивания до насыщения. Размеры доменов от 10^{-2} до 10^{-6} мм³, что составляет ~ 0,1 мм по ширине в двух направлениях и ~ 1...10 мм по длине. Домены отделены друг от друга переходными слоями, называемыми стенками, размер которых 10^{-3} ... 10^{-6} мм. В этих переходных слоях ориентация магнитных моментов постепенно меняется от одного направления к другому, соответствующему соседнему домену.

В принципе домен может рассматриваться как магнитный диполь, а доменная структура - как набор диполей, разделенных переходными стенками.

Схематично доменная структура и магнитный атомный порядок магнетиков могут быть представлены в виде рисунка 5.1.

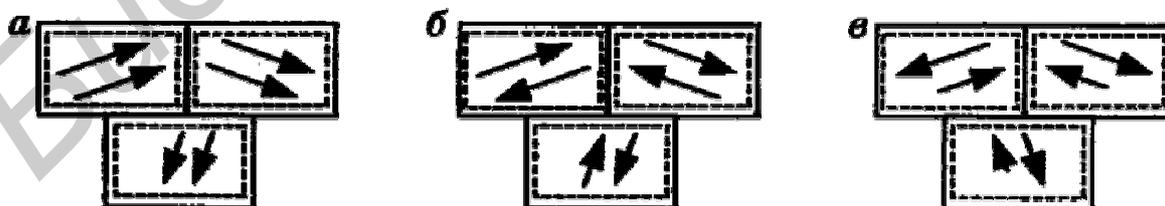


Рисунок 5.1 - Доменная структура магнетиков: *а* – ферромагнетики; *б* – антиферромагнетики; *в* – ферримагнетики

При отсутствии внешнего магнитного поля отдельные домены со своим собственным направлением магнитного момента расположены хаотически, их моменты взаимно компенсируются и результирующее внутреннее магнитное поле равно нулю. При помещении магнетика во внешнее магнитное поле происходит

его намагничивание, что выражается в изменении доменной структуры. По современным представлениям изменение доменной структуры во внешнем магнитном поле может происходить либо за счет вращения магнитных диполей, либо за счет смещения стенок доменов. В реальных магнетиках эти оба процесса часто происходят одновременно.

Процесс намагничивания характеризуется зависимостью магнитной индукции B от напряженности внешнего поля H (рисунок 5.2), которую принято называть кривой первоначального намагничивания. Она позволяет проанализировать ход процесса намагничивания.

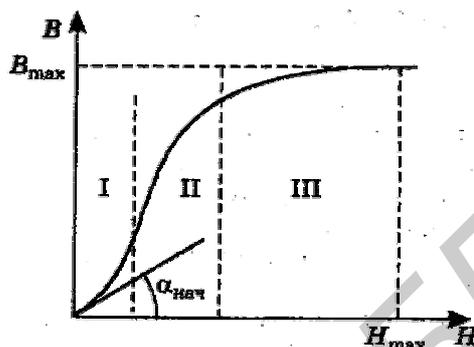


Рисунок 5.2 - Кривая намагничивания магнетика

При слабых внешних полях (участок I) намагничивание начинается за счет ориентации магнитных моментов доменов, имеющих минимальный угол с направлением внешнего поля. Затем происходит смещение границ доменов, у которых направления моментов близки к направлению внешнего поля. При этом их объем увеличивается за счет уменьшения объемов доменов, достаточно сильно отличающихся по направлению магнитного момента от направления поля. Принято считать, что участок I характеризуется смещением доменных границ, а процесс намагничивания - обратимым, т.е. при снятии внешнего поля доменная структура возвращается в исходное состояние.

На участке II происходит вращение магнитных моментов доменов, в результате которого все магнитные диполи ориентируются по направлению внешнего поля. На такой поворот диполей тратится вполне определенная энергия, которая пропорциональна углу поворота, изменяющемуся в пределах от 90° до 180° . После снятия магнитного поля домены будут стремиться вернуться в исходное состояние, что и происходит, если отклонение диполей от исходного состояния было небольшим. При достаточно больших отклонениях домены могут не вернуться в исходное состояние. Это новое состояние будет характеризовать остаточную намагниченность вещества.

На участке III процесс намагничивания происходит за счет дополнительной ориентации спиновых моментов отдельных электронов вдоль поля. Для этого участка иногда употребляют понятие перемагничивания с направления легкого намагничивания в направление трудного намагничивания, что соответствует режиму насыщения магнетика, когда все магнитные моменты и доменов, и отдельных атомов соразориентированы по полю.

Магнитная индукция B связана с напряженностью внешнего поля H соотношением $B = m \cdot m_0 \cdot H$, где m_0 - магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ - относительная магнитная проницаемость вещества или просто магнитная проницаемость, характеризующая способность вещества намагничиваться.

Численное значение магнитной проницаемости можно определить по кривой намагничивания. Различают начальную магнитную проницаемость $\mu_{нач}$ и максимальную μ_{max} которые определяются соотношениями:

$$m_{нач} = \operatorname{tg} a_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{m_0 \cdot H}, \quad (5.1)$$

$$m_{max} = \frac{B_{max}}{m_0 \cdot H_{max}} \quad (5.2)$$

Магнитная проницаемость зависит от напряженности внешнего поля и от температуры (рисунок 5.3; 5.4).

Из рисунка 5.3 следует, что с увеличением напряженности внешнего поля растет магнитная проницаемость, поскольку увеличивается степень ориентирования магнитных диполей.

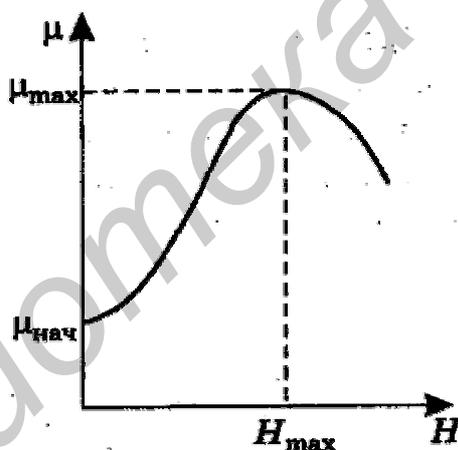


Рисунок 5.3 – Зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля

Если все магнитные моменты доменов соразориентированы по направлению поля, магнитная проницаемость достигает максимального значения, соответствующего состоянию насыщения. При этом магнитная индукция максимальна. С дальнейшим увеличением H магнитная индукция уже не растет, следовательно, магнитная проницаемость уменьшается, поскольку

$$m = \frac{B}{m_0 \cdot H} \quad (5.3)$$

При изменении температуры происходит изменение магнитного состояния вещества. Рост температуры усиливает тепловые колебания атомов, которые стремятся разрушить состояние самопроизвольной намагниченности магнетика.

Температура, при которой происходит потеря магнитных свойств, называется точкой Кюри. Для железа, кобальта и никеля она равна 769, 1131, 363 °С соответственно.

Как следует из рисунка 5.4, с ростом температуры магнитная проницаемость увеличивается за счет облегчения ориентации магнитных диполей при температурах ниже точки Кюри. В области температуры Кюри тепловое движение разрушает магнитный порядок, поэтому магнитная проницаемость резко падает и становится равной нулю в точке Кюри T_K .

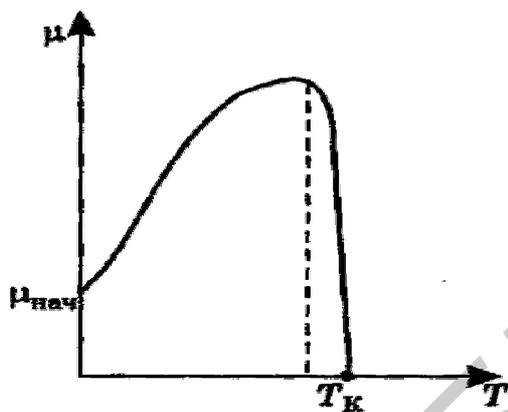


Рисунок 5.4 - Зависимость магнитной проницаемости от температуры

Процесс намагничивания в переменном магнитном поле.

Особенностью протекания процесса намагничивания магнетиков в переменном магнитном поле является его отставание от изменения напряженности внешнего поля. Это явление называется гистерезисом. Поэтому в переменном магнитном поле зависимость магнитной индукции от напряженности внешнего магнитного поля представляет собой петлю гистерезиса (рисунок 5.5).

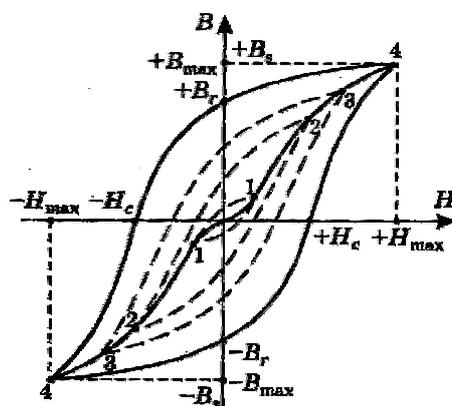


Рисунок 5.5 - Кривая перемангничивания в переменном магнитном поле

При малых значениях напряженности магнитного поля процесс перемангничивания происходит по кривым 1, 2, 3, называемым динамическими

петлями гистерезиса. Когда H соответствует насыщению, перемагничивание происходит по предельной петле гистерезиса 4.

Признаками того, что петля перемагничивания предельная, являются максимальная площадь петли и постоянство индукции $B = B_{\max}$ с увеличением напряженности внешнего поля $H > H_{\max}$.

Геометрическое место точек вершин динамических петель гистерезиса называется основной кривой намагничивания, которая представляет собой кривую первоначального намагничивания.

По основной кривой намагничивания рассчитываются значения магнитной проницаемости ($\mu_{\text{нач}}, \mu_{\text{max}}, \mu$).

Предельная петля гистерезиса является очень важной характеристикой магнитного материала, поскольку она имеет ряд характерных точек, позволяющих количественно оценивать свойства магнетика. К ним относятся:

- *коэрцитивная сила $\pm H_C$* - напряженность внешнего поля, которую надо приложить, чтобы индукция внутреннего поля стала равной нулю, т.е. чтобы полностью размагнитить материал;

- *остаточная индукция $\pm B_r$* - значение индукции внутреннего магнитного поля при напряженности внешнего поля, равной нулю;

- *максимальная магнитная индукция $\pm B_{\max} \equiv B_s$;*

- *напряженность магнитного поля при насыщении $\pm H_{\max} = H_s$.*

По площади петли гистерезиса можно судить о магнитных потерях при перемагничивании. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше энергии внешнего поля затрачивается на нагревание материала в процессе перемагничивания.

Наиболее существенными видами потерь являются потери на гистерезис, т.е. перемагничивание, и потери на вихревые токи, т.е. токи Фуко.

При перемагничивании происходит смещение границ доменов и вращение магнитных диполей, для чего требуется затрата энергии внешнего поля. Это и есть потери на гистерезис, которые пропорциональны частоте внешнего магнитного поля.

Потери на вихревые токи связаны с нагревом материала, за счет протекания тока, а величина потерь пропорциональна квадрату частоты внешнего магнитного поля.

Таким образом, при определении частотного диапазона работы магнитного материала необходимо учитывать его свойства, влияющие на магнитные потери. Вполне понятно, что в ВЧ и СВЧ диапазонах наиболее важно учитывать вихревые токи и подбирать материал с большим удельным сопротивлением, снижающим эти токи.

Проведенное рассмотрение основных свойств магнитных материалов позволяет выделить количественные параметры, характеризующие эти свойства:

- начальная и максимальная магнитные проницаемости $\mu_{\text{нач}}, \mu_{\text{max}}$;

- максимальная магнитная индукция $B_{\max} \equiv B_s$;

- остаточная магнитная индукция B_r ;

- коэрцитивная сила H_c .

5.3. Магнитные материалы, основные характеристики, применение

Магнитный материал - материал, обладающий свойством ферро- или ферримагнетика.

По составу, свойствам, назначению и применению различают три группы магнитных материалов:

- магнитомягкие материалы (МММ);
- магнитотвердые материалы (МТМ);
- материалы специального назначения (МСН).

Основой для деления материалов на магнитомягкие и магнитотвердые является значение коэрцитивной силы H_c . Для МММ $H_c = (0,4...800)$ А/м, а для МТМ – $(4...800)$ кА/м.

Материалы специального назначения выделены в отдельную группу в связи с их особыми свойствами и областями применения. К ним относятся материалы для записи и хранения информации, ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты СВЧ, магнитоstrictionные и термомагнитные материалы.

Магнитомягкие материалы

МММ представляют собой весьма широкий набор материалов как по составу и свойствам, так и по назначению.

Возможная классификационная схема представлена на рисунок 5.6.

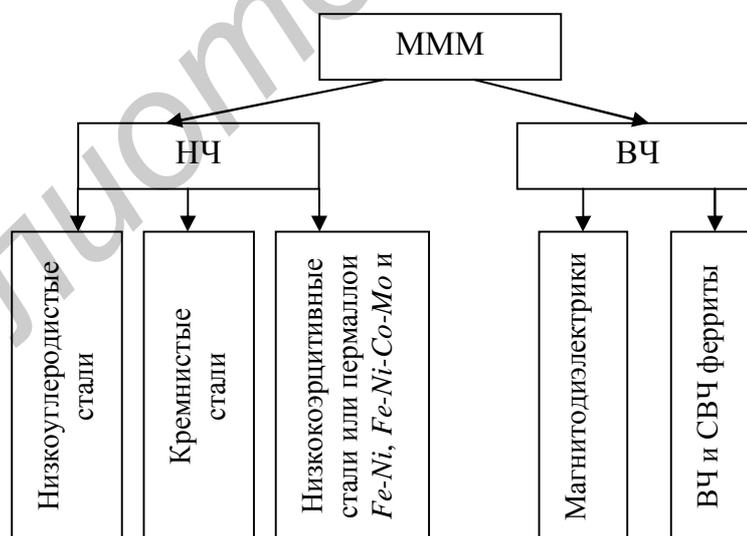


Рисунок 5.6 - Классификация МММ

МММ должны удовлетворять требованиям, согласно которым материал должен:

- легко намагничиваться и размагничиваться;
- обладать узкой петлей гистерезиса, т.е. малой H_c и большими $\mu_{нач}$ и

μ_{max} ;

- иметь высокую индукцию насыщения B_s , т.е. обеспечивать прохождение максимального магнитного потока через единичное сечение магнитопровода, что уменьшает его габариты и вес;

- обеспечивать малые потери при работе в переменных полях, что снижает температуру нагрева изделия, габариты и вес, повышает КПД и рабочую индукцию;

- удовлетворять дополнительным требованиям, связанным с механическими свойствами, стабильностью во времени и при разных температурах, низкой стоимостью.

Наиболее широко применяемыми магнитомягкими материалами являются:

- технически чистое железо и его разновидности;

- листовая электротехническая сталь;

- сплавы $Fe-Ni$ с различным содержанием Ni , называемые пермаллоями;

- сплавы $Fe-Si-Al$, называемые альсиферами;

- магнитомягкие ферриты.

К наиболее употребляемым к магнитомягким материалам относятся технически чистое, электролитическое и карбонильное железо. Наиболее применимой является низкоуглеродистая сталь - разновидность технически чистого железа. На основе карбонильного железа прессованием изготавливают ВЧ магнитные сердечники.

У чистого железа мало удельное объемное сопротивление ρ_v , поэтому оно применяется редко. Электролитическое железо также редко применяется ввиду высокой стоимости.

Кремнистые стали представляют собой твердый раствор кремния в железе. Введение Si производят с целью повышения ρ_v . При этом возрастает μ и уменьшается H_c . Увеличение процентного содержания Si снижает механические свойства материала, поэтому обычно его доля не превышает 5%.

На основе кремнистых сталей изготавливают электротехнические стали различных марок, подразделяемых по содержанию Si , по способу изготовления, магнитным и электрическим свойствам. Они обладают высокой индукцией, малыми значениями H_c и потерями на гистерезис. Поэтому их широко применяют для изготовления статоров и роторов электрических машин, сердечников силовых трансформаторов, магнитопроводов различных аппаратов и устройств.

Низкокоэрцитивные сплавы – пермаллои - являются сплавами Fe и Ni с легирующими добавками хрома, кобальта, кремния, меди, марганца, которые изменяют количественные и качественные характеристики материала, а именно повышают ρ_v и μ_{max} , улучшают механические свойства и температурную стабильность. Значительный интерес представляет сплав супермаллой, обладающий высокими магнитными свойствами в слабых полях.

Пермаллои выпускают в виде лент, прутков и подвергают специальной термообработке для получения и стабилизации необходимых магнитных свойств. Основные области их применения — это измерительные приборы, сердечники малогабаритных силовых и импульсных трансформаторов и дросселей, магнитные экраны, магнитные усилители и бесконтактные реле, катушки индуктивности и т.д.

Недостатками пермаллоев являются высокая чувствительность к механическим воздействиям, низкое значение ρ_v и зависимость магнитной проницаемости от частоты. Поэтому на повышенных частотах предпочтительнее низконикелевые пермаллои.

Альсиферы - тройные сплавы $Al-Si-Fe$, обладающие хорошими магнитными свойствами. Однако они отличаются высокой хрупкостью, твердостью и теряют свойства при механической обработке. Поэтому детали из них изготавливают литьем. Альсиферы используют в виде порошков для изготовления ВЧ сердечников методом прессования.

Ферриты (оксиферы) представляют собой системы из оксидов железа и оксидов двухвалентных, а иногда и одновалентных металлов. Общая формула ферритов $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me - символ двухвалентного металла. Обладая достаточно высокими магнитными свойствами, ферриты имеют высокое значение удельного сопротивления, поскольку это смесь оксидов. Поэтому они имеют малые потери и широко применяются на повышенных и высоких частотах.

Процентный состав оксидов играет существенную роль в получении необходимых магнитных свойств. По сути своей ферриты представляют собой магнитную керамику и технологический процесс их изготовления весьма схож с процессом получения керамики.

Основными операциями при изготовлении ферритов являются:

- приготовление шихты (смеси) по весовым компонентам; первый помол для получения однородной массы; предварительный обжиг при температуре меньшей, чем при окончательном обжиге;
- второй помол для улучшения степени однородности массы;
- прессование, выдавливание стержней, трубок, а также литье под давлением для изготовления мелких деталей с использованием пластификаторов;
- окончательный обжиг при температуре 1100... 1400 °С в окислительной среде чтобы избежать восстановления оксидов металлов.

Из-за сложности технологического процесса получение заданных свойств и их воспроизводимость требуют, как правило, изготовления предварительной партии, по которой корректируется состав смеси и сам техпроцесс.

По составу ферриты делятся на марганец-цинковые ($MnO \cdot Zn \cdot Fe_2 \cdot O_3$), никель-цинковые ($NiO \cdot Zn \cdot Fe_2 \cdot O_3$), литий-цинковые ($Li_2O \cdot Zn \cdot Fe_2 \cdot O_3$)

По свойствам и применению ферриты делятся на:

- магнитомягкие низкочастотные ферриты с $f_{гр} = 0,2...20$ МГц и высокочастотные с $f_{гр} = 20...300$ МГц;
- магнитотвердые ферриты;
- ферриты с ППГ;
- ферриты СВЧ.

Чем выше начальная магнитная проницаемость, тем ниже граничная частота $f_{гр}$, при равным 0,1.

На низких частотах потери на гистерезис и вихревые токи малы и $tg\delta$ определяется в основном диэлектрическими потерями оксидов. На высоких частотах потери определяются всеми составляющими потерь, однако, основной вклад вносят потери в диэлектрике.

Магнитомягкие ферриты применяются для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, фильтров, магнитных антенн и отклоняющих систем телевизоров, статоров и роторов ВЧ микродвигателей и т.д.

Магнитодиэлектрики получают прессованием порошкообразного магнетика с изолирующей его частицы органической или неорганической связкой. Использование диэлектрической связки повышает ρ_v и позволяет применять материалы на повышенных и высоких частотах. В качестве основы применяют карбонильное железо, альсифер и другие порошкообразные магнетики, а диэлектрической связкой служат фенолформальдегидные смолы, полистирол, стекло и т.д.

Таблица 5.1
Количественные параметры магнитомягких материалов

Материал		$\mu_{нач}$	μ_{max}	$H_c, A/m$	$B_s, Tл, при H_s, A/m$	$\rho_v, Ом·м$
Технически чистое железо (до 0,04% С)		250	$(3,5...4,5) \times 10^3$	40...100	2,18 $H=5 \cdot 10^4$	10^{-7}
Электротехническая сталь (Si от 0,8 до 4,8%)		$(2...6) \cdot 10^2$	$(3...8) \cdot 10^3$	10...65	1,89 $H=3 \cdot 10^4$	$(6...2,5) \times 10^{-7}$
Пермаллой	Низконикелевые $Ni=40...50\%$	$(2...4) \cdot 10^3$	$(1,5...6) \times 10^4$	5...32	1,3...1,6	$(4,5...9) \times 10^{-7}$
	Высоко- никелевые $Ni=72...80\%$	$(1,5...10) \times 10^4$	$(0,7...3) \times 10^5$	0,65...4	0,7...0,75	$(1,6,8,5) \times 10^{-7}$
	Супермаллой $Ni = 79\%$; $Mo = 5\%$; $Fe = 15\%$; $Mn = 0.5\%$	10^5	$1,5 \cdot 10^5$	0,3	0,8	$6 \cdot 10^{-7}$
Альсиферы $Al = 5.4\%$; $Si = 9.6\%$; $Fe = 85\%$		$3,5 \cdot 10^4$	$11,5 \cdot 10^4$	1,8	0,34	$8,1 \cdot 10^{-7}$
Ферриты	Марганец-цинковые $MnO \cdot Zn \cdot Fe_2 \cdot O_3$ (при частоте 1 МГц)	$(0,7...2) \times 10^4$	$(0,18...3,5) \times 10^4$	0,25...28	0,15...0,46	$20 \cdot 10^{-3}$
	Никель-цинковые $NiO \cdot Zn \cdot Fe_2 \cdot O_3$ (при частоте 100 МГц)	10...2000	40...7000	8...170	0,2...0,35	$10 \cdot 10^8$
	Литий-цинковые $Li_2O \cdot Zn \cdot Fe_2 \cdot O_3$ (при частоте 1000 МГц)	20...120	-	240...480	0,1...0,25	-

Магнитная проницаемость магнитодиэлектриков практически неуправляема внешним магнитным полем. Их эффективная магнитная проницаемость меньше, чем у ферромагнитной основы.

Магнитодиэлектрики имеют ограниченное применение, поскольку в большинстве случаев могут быть заменены ферритами, имеющими ряд преимуществ. Тем не менее, магнитодиэлектрики применяют в катушках индуктивности фильтров, генераторов, контуров радиоаппаратуры и аппаратуры связи.

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы характеризуются широкой петлей гистерезиса, т.е. высоким значением коэрцитивной силы H_c (до 800 кА/м), и применяются для изготовления постоянных магнитов, создающих магнитное поле в зазоре магнитопровода, а также для записи и длительного хранения звуковой и другой информации.

Основными количественными характеристиками магнитотвердых материалов являются:

- коэрцитивная сила H_c ;
- остаточная индукция B_r ,
- максимальная энергия в зазоре W ;
- коэффициент возврата μ_Δ .

Магнитная проницаемость μ МТМ меньше, чем у МММ, причем с увеличением H_c она понижается.

Магнитопровод из МТМ в замкнутом состоянии не отдает энергии во внешнее пространство. Только при наличии воздушного зазора между полюсами происходит отдача энергии, уровень которой зависит от размеров зазора и магнитных свойств материала магнитопровода. Магнитный поток в зазоре возникает после намагничивания материала при кратковременном его помещении в сильное магнитное поле.

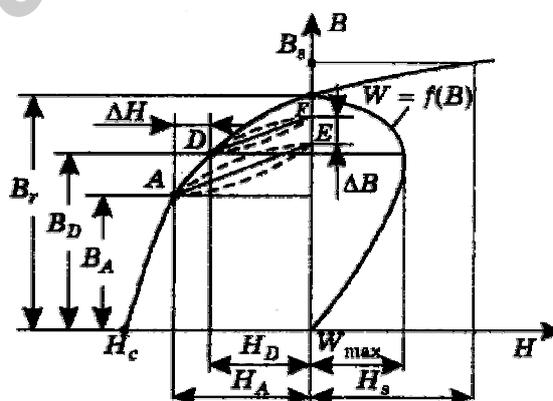


Рисунок 5.7 - Кривая размагничивания МТМ

После снятия внешнего поля магнитные свойства материала характеризуются кривой размагничивания - участком петли гистерезиса во втором квадранте (рисунок 5.7).

Положение рабочей точки A характеризуется конфигурацией магнитной цепи. Соответствующее ей значение магнитной индукции (B_A) называют кажущейся остаточной индукцией, которая меньше B_r вследствие размагничивающего действия полюсов.

При изменении конфигурации магнитной цепи, например, величины воздушного зазора, меняются положение рабочей точки на кривой размагничивания и энергия в зазоре W . Удельная магнитная энергия в воздушном зазоре, Дж/м³, определяется соотношением

$$W = \frac{B_A \cdot H_A}{2}. \quad (5.4)$$

Наибольшее значение магнитной энергии, соответствующее точке D , является важнейшим параметром при оценке МТМ:

$$W_{\max} = \frac{(BH)_{\max}}{2} = \frac{B_D H_D}{2} \quad (5.5)$$

Максимальная энергия тем больше, чем больше B_r и H_c .

Параметр $g = \frac{(BH)_{\max}}{2B_r H_c}$ называется коэффициентом вязкости или выпуклости кривой размагничивания.

В процессе эксплуатации положение рабочей точки изменяется по так называемым кривым (прямым) возврата (AE , DF). Ход прямой возврата оценивается коэффициентом возврата

$$m_{\Delta} = \frac{\Delta B}{m_0 \cdot \Delta H} \quad (5.6)$$

Чем меньше μ_{Δ} , тем меньше ΔB , следовательно, μ_{Δ} определяет стабильность магнитной цепи.

Кроме магнитных параметров (H_c , B_r , W_{\max} , μ_{Δ}) МТМ характеризуются прочностью, способностью к механической обработке, удельным сопротивлением ρ_v и т.д., которые учитываются при выборе МТМ для каждого конкретного применения.

По составу и способу получения магнитотвердые материалы классифицируются на:

- литые магнитотвердые сплавы на основе $Fe-Ni-Co$;
- порошковые МТМ: металлокерамические, металлопластические, оксидные;
- прочие МТМ: мартенситные стали, эластичные магниты для магнитных лент.

Магнитотвердые сплавы характеризуются высокими магнитными и низкими механическими свойствами. При их изготовлении применяют термомагнитную обработку, заключающуюся в охлаждении сплава от 1250 до 500 °С в магнитном поле. Этим достигается кристаллическая магнитная текстура. Кроме того, в процессе изготовления используют направленную кристаллизацию. Материалы данной группы составляют 80% всех потребляемых МТМ и применяются для постоянных магнитов.

Металлокерамические магниты получают из порошков различного состава ($Fe-Ni-Co$, $Cu-Ni-Co$, $Cu-Ni-Fe$) путем прессования без связующего материала и

последующего спекания при высокой температуре. По своим свойствам эта группа близка к литым сплавам, однако, дороже по стоимости.

Металлопластические магниты на основе *Fe-Ni-Al*, *Fe-Ni-Al-Co* изготавливают аналогично металлокерамическим, но они прессуются с изолирующей добавкой (связкой) и спекаются при невысокой температуре, достаточной для полимеризации связующего вещества. По своим свойствам эта группа материалов несколько хуже литых сплавов. Однако они имеют большое удельное сопротивление ρ_v за счет диэлектрической связки и относительно дешевы.

Оксидные магниты изготавливают на основе феррита бария и феррита кобальта. Технология их получения имеет много общего с технологией магнитомягких ферритов. Обладают большим, чем литые сплавы, значением H_c , дешевле, не содержат дефицитных элементов, имеют высокое значение ρ_v , что позволяет применять их в высокочастотных устройствах. Основной недостаток — значительная зависимость свойств от температуры.

Мартенситные стали обладают особым видом микроструктуры, получаемым при закалке. Образование мартенсита сопровождается значительными объемными изменениями, созданием больших внутренних напряжений решетки и возникновением существенных ρ_v . Хотя магнитные свойства мартенситных сталей невысоки, они дешевы и допускают механическую обработку, благодаря чему нашли применение. Основные сведения о составе и параметрах некоторым МТМ приведены в таблице 2.5.

Таблица 5.2

Состав и параметры магнитотвердых материалов

	Литые магнитотвердые сплавы	Порошковые магнитотвердые материалы				Прочие магнитотвердые материалы		
		металло-керамические	металло-пластические	оксидные	микро-порошковые	мартенситные стали	пластические деформируемые сплавы	эластичные магниты
Состав (основа)	Fe-Ni-Co	Fe-Ni-Co; Cu-Ni-Co; Cu-Ni-Fe; Fe-Co-Mn; Pt-Co; Ag-Mn-Al	Fe-Ni-Al; Fe-Ni-Al-Co	BaO·6Fe ₂ O ₃ ; CoO·Fe ₂ O ₃	Fe; Fe-Co; Mn-Bi	Fe-Si (0,4...0,17)%	Cu-Ni-Fe; Cu-Ni-Co; Co-V-Fe	BaO·6Fe ₂ O ₃
Добавки (лигатура)	Co, Cu, Ti, S, Nb, Si, C, Mn		Диэлектрик	-	-	C, Cr, W, Co, Mo, Mn	-	-
B_r , Тл	0,5...1,4	0,6...1,1	0,15...0,7	0,2...0,4	0,8...1,1	0,8...1,0	0,35...0,95	0,145
H_c , кА/м	36...146	24...128	82...180	128...240	82...300	4,6...13,6	21...57	33
W , Дж/м ³	3...32	3...16	1,2...1,5	3,2...10,4	14...26	-	2,8...14	2,0

Эластичные магниты изготавливают на резиновой основе из мелкого порошка магнитотвердого материала. Исходные материалы смешиваются и вулканизируются. Благодаря этому устраняется основной недостаток МТМ - плохие механические свойства (твердость, хрупкость), сложность механической

обработки и т.д. Изделия изготавливают в виде шнуров, полос, лент, которые легко режутся, штампуются, скручиваются и т.д.

Материалы для магнитных лент наибольшее распространение получили на основе нержавеющей стали и в виде биметаллических лент, применяемых в особых условиях работы в широком температурном диапазоне. Ленты на пластмассовой основе с порошкообразным рабочим слоем применяют для записи и хранения информации в бытовой аппаратуре и ЭВМ. Ленты «тип 2» изготавливают на основе $Co - Fe_2O_3$, а ленты «тип б» — на основе $\gamma - Fe_2O_3$.

Материалы специального назначения

К данной группе относятся материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) и магнестрикционные материалы.

Материалы с ППГ нашли широкое применение в устройствах автоматики и вычислительной техники, аппаратуре связи и т.д. Сердечники с ППГ имеют два устойчивых состояния - $+B_r$ и $-B_r$ (рисунок 5.8) и используются для хранения и переработки двоичной информации.

Основными характеристиками изделий с ППГ являются B_r , H_c , μ и α - коэффициент прямоугольности, определяемый соотношением $\alpha = B_r/B_{max}$. Обычно $\alpha = (0,85...0,96)$; при этом B_{max} определяется для $H_{max} = (5... 10)H_c$.

Достоинствами сердечников с ППГ являются высокая надежность и стабильность характеристик, малая потребляемая мощность, низкая стоимость, простота проектирования сложных устройств, отсутствие затрат энергии на хранение информации.

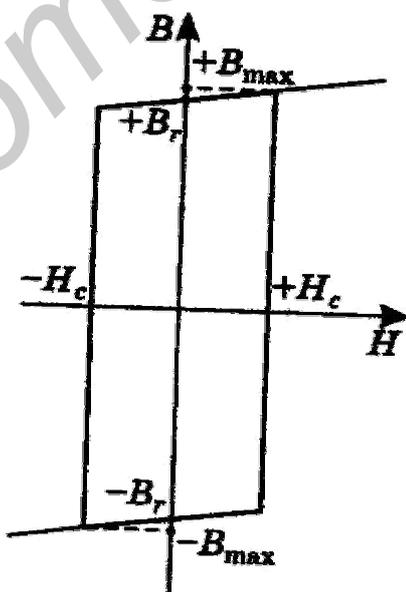


Рисунок 5.8 – Прямоугольная петля гистерезиса

Материалы с ППГ подразделяются на три группы:

- ферриты;
- текстурированные ферромагнитные сплавы в виде лент толщиной от 0,5 мм до десятков микрометров;

- тонкие ферромагнитные пленки.

Ферриты получили наибольшее распространение, так как они легко изготавливаются, хотя технология их производства является прецизионной, т.е. имеет жесткие ограничения на состав и соблюдение режимов. Особенностью изготовления ферритов с ППГ является высокая температура окончательного обжига (до 1400 °С) и воздушная закалка после спекания, заключающаяся в естественном охлаждении на воздухе сразу же после обжига.

Наибольшее распространение получили ферриты на основе *Mg-Mn*, а также ферриты, содержащие *Li*, что обеспечивает высокую температурную стабильность.

Изделия в виде колец, сердечников сложной конфигурации, многоотверстных пластин и т.д. получают путем прессования.

Металлические ленты сложнее изготовить, но они лучше ферритов по магнитным свойствам и обладают высокой температурной стабильностью. Их получают путем проката и специальной обработки. Из лент изготавливают сердечники магнитопроводов.

Ферромагнитные пленки обладают высокими частотными свойствами, компактны и изготавливаются термическим испарением в вакууме магнитного материала на подложках из стекла или немагнитного металла, а также методом катодного распыления или электроосаждения.

К основным недостаткам магнитных пленок, полученных вакуумным напылением, следует отнести технологический разброс параметров от образца к образцу и от партии к партии. Тем не менее они находят все большее применение в устройствах магнитной микроэлектроники.

Магнитострикционными являются ферромагнетики, обладающие магнитной анизотропией, выражающейся в различной способности намагничиваться по различным осям кристалла. Для *Fe* осью легкого намагничивания является ребро куба, а для *Ni* - пространственные диагонали. Осями трудного намагничивания для *Fe* являются пространственные диагонали, а для *Ni* - ребра куба.

При наличии механических напряжений, кроме кристаллической анизотропии, возникает магнитоупругая анизотропия. Она вызвана дополнительным магнитным взаимодействием между электронами в результате механического искажения решетки при деформации.

Таким образом, *магнитострикция* - это изменение формы и размеров образца (монокристаллов) при изменении его магнитного состояния.

Изменение магнитного состояния связано с магнитными силами в кристаллической решетке, которые являются анизотропными, вследствие чего вызывают различную деформацию в разных направлениях.

Под действием внешнего магнитного поля происходит перемагничивание, следовательно, меняется магнитное взаимодействие и деформируется кристаллическая решетка. При этом сильно изменяются линейные размеры образца.

Линейную магнитострикцию характеризуют коэффициентом магнитострикции $\alpha = \Delta l/l$, где l — длина стержня при $H = 0$; Δl — изменение длины под воздействием магнитного поля.

Знак коэффициента α может быть как положительным, так и отрицательным.

Магнитострикционными материалами являются сплавы: $50Pt-46Fe$ ($\alpha \sim 120 \cdot 10^{-6}$); $50Co-50Fe$ ($\alpha \sim 70 \cdot 10^{-6}$); $Fe-13Al$ ($\alpha \sim 120 \cdot 10^{-6}$). Никель имеет отрицательный коэффициент $\alpha = -35 \cdot 10^{-6}$.

Магнитострикция используется в генераторах звуковых и ультразвуковых частот, в магнитострикционных вибраторах для обработки ультразвуком хрупких и твердых материалов, в дефектоскопах, гидроакустических приборах, в устройствах стабилизации частоты и электромеханических фильтрах.

Контрольные вопросы

1. Дать определение термина «магнетик».
2. Перечислите известные классы магнетиков по способности к намагничиванию.
3. Перечислите основные классы магнетиков, используемых в промышленных изделиях
4. Изобразите схематично магнитный атомный порядок ферро-, ферри- и антиферромагнетиков.
5. Что такое первоначальная (основная) кривая намагничивания и для чего она нужна?
6. Что является количественной мерой способности веществ к намагничиванию и по какой формуле она рассчитывается?
7. Дайте определение основной кривой намагничивания.
8. Что такое начальная магнитная проницаемость, что она характеризует и по какой формуле рассчитывается?
9. Что такое предельная петля гистерезиса? Каким критериям она должна соответствовать?
10. Что такое магнитные потери? Причины их возникновения.
11. Перечислите основные количественные параметры магнитных материалов.
12. Что такое остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c ?
13. По какому количественному параметру делят магнитные материалы на МММ и МТМ? Каковы значения этого параметра?
14. Перечислите основные требования к МММ.
15. Что такое пермаллои и где они применяются?
16. Каков порядок значений $m_{нач}$ и m_{max} для материалов на основе железа и пермаллоев?
17. Что такое ферриты и в чем их основные достоинства?
18. На какие группы делятся ферриты по составу, свойствам и областям применения?
19. Перечислите основные количественные параметры МТМ.
20. Перечислите группы магнитных материалов специального назначения.

Литература

1. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1991.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. Материалы радиоэлектронной техники. М.: Высшая школа, 2001.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев В.М. Электротехнические материалы. Энергоатомиздат, 1985.
4. Дроздов Н.Г., Никулин Н.В. Электроматериаловедение. М.: Высшая школа, 1968.
5. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. М.: Высшая школа, 1983.
6. Казанцев А.П. Электротехнические материалы. Мн.: Дизайн ПРО, 2001.
7. Калинин Н.Н., Скибинский Г.Л., Новиков П.П. Электрорадиоматериалы. М.: Высшая школа, 1981,
8. Конденсаторы: Справочник. М.: Радио и связь, 1993,
9. Малогабаритная радиоаппаратура: Справочник. Киев.: Нукова думка, 1971,
10. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1980,
11. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. СПб.: Лань, 2003.
12. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. Питер, 2004.
13. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1976.
14. Резисторы: Справочник. М.: Радио и связь, 1991.
15. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник. Мн.: Беларусь, 1994.
16. Рычина Т.А. Электрорадиоэлементы. М.: Советское радио, 1976.
17. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 2000.
18. Таиров Ю.М. Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. СПб.: Лань, 2002.
19. Шалимова К.В. Физика полупроводников М.: Энергоатомиздат, 1985.

Учебное издание

Казанцев Анатолий Петрович

«МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Редактор Н. В. Гриневич
Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать 27.07.2008. Формат 60 84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Печать ризографическая. Усл. печ. л.. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 150 экз. Заказ 406.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №0056964 от 01.04.2004. ЛП №30/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6