

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Е. СУХАРНИКОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Казань 2019

УДК 620.22
ББК 30.3
С91

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Казанского научно-исследовательского
технологического университета *В.И. Петров;*

канд. техн. наук, доцент Казанского государственного
энергетического университета *А.М. Павлова*

Сухарников А.Е.

С91 Электротехническое материаловедение: учеб. пособие /
А.Е. Сухарников. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – 180 с.

Дана классификация электротехнических материалов, рассмотрены особенности их строения и физико-химические основы процессов, протекающих в данных материалах под действием электрического и магнитного полей.

Приведены сведения о конкретных видах диэлектрических, полупроводниковых, проводниковых и магнитных материалов, применяемых в электроэнергетике и электротехнике.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения по образовательным программам направлений подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 12.03.01 «Приборостроение» и 15.03.04. «Автоматизация технологических процессов и производств».

УДК 620.22
ББК 30.3

© Сухарников А.Е., 2019

© Казанский государственный энергетический университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Электротехническое материаловедение – наука, изучающая причинно-следственную связь между строением и свойствами электротехнических материалов и закономерности их изменения под действием внешних факторов.

Целью настоящего пособия является формирование у студентов современных знаний в области электротехнических материалов. Вопросы конструкционного материаловедения были рассмотрены ранее в учебном пособии [1].

Задачи настоящего пособия:

– установить причинно-следственную связь между химическим составом, строением и свойствами электротехнических материалов – проводников, полупроводников, диэлектриков и магнитных материалов;

– установить физико-химические закономерности изменения строения и свойств электротехнических материалов под действием физических (температура, давление, электромагнитное поле, ионизирующие излучения и др.), химических, биологических и других факторов;

– дать представления о конкретных видах проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, их свойствах и областях применения как компонентов электроэнергетического и электротехнического оборудования.

Данное пособие призвано сформировать у студентов способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач.

В главе 1 рассмотрены классификации электротехнических материалов по назначению, электромагнитным свойствам и характеру химических связей. Приведены сведения о строении и свойствах полимерных диэлектрических материалов.

В главе 2 рассматриваются физико-химические основы процессов, протекающих под действием внешних факторов (электромагнитного поля, температуры, давления и др.) в диэлектрических материалах. Представлены сведения о видах, строении и свойствах газообразных, жидких и твердых диэлектриков.

В главах 3, 4 и 5 приведены физико-химические основы процессов, протекающих под действием внешних факторов в полупроводниковых, проводниковых и магнитных материалах, соответственно. Рассмотрены их виды, особенности строения и свойства.

Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Классификация электротехнических материалов по электромагнитным свойствам и назначению

Электротехнические материалы (ЭТМ) по электромагнитным свойствам и назначению делят на четыре группы: проводниковые, полупроводниковые, диэлектрические и магнитные [2, 4–6, 8] (рис. 1.1).

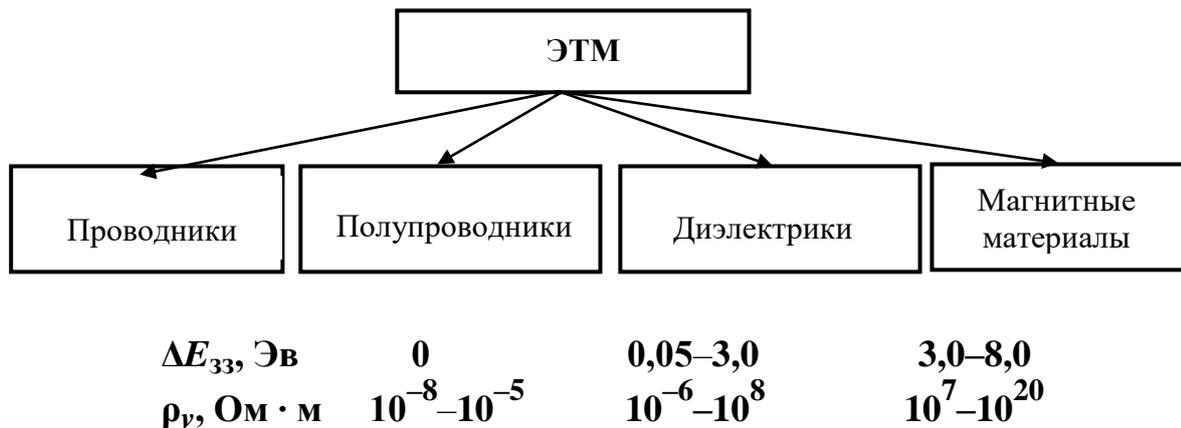


Рис. 1.1. Классификация электротехнических материалов

Проводниковые материалы (удельное электрическое сопротивление $\rho_v = 10^{-8} - 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Основное их свойство – высокая электропроводность (низкое электрическое сопротивление). Материалы предназначены для передачи электрической энергии, ее преобразования в тепловую энергию и для других целей.

Полупроводниковые материалы ($\rho_v = 10^{-6} - 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Характерная их особенность – существенная зависимость электрического сопротивления от интенсивности внешнего энергетического воздействия (температуры, длины волны светового излучения, напряженности электрического поля и др.). Материалы предназначены для изготовления дискретных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, термисторов, фоторезисторов и др.) и интегральных полупроводниковых схем.

Диэлектрические материалы ($\rho_v = 10^7 - 10^{20} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Характерные их свойства – способность поляризоваться под действием электрического поля и высокое электрическое сопротивление.

Различают пассивные диэлектрики (электроизоляционные и конденсаторные) и активные (управляемые) диэлектрики.

Электроизоляционные диэлектрики применяются для создания электрической изоляции между токоведущими частями электрических машин, аппаратов и устройств, находящихся под различными электрическими потенциалами.

Конденсаторные диэлектрики предназначены для создания электрической емкости конденсаторов.

Активные диэлектрики. Свойства этих материалов существенно зависят от интенсивности внешнего энергетического воздействия (напряженности электрического поля, механического напряжения и др.). К ним относятся *сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, жидкие кристаллы, электреты* и др.

Магнитные материалы. Основное свойство материалов: способность намагничиваться под действием электромагнитного поля. Их делят на две группы – магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие (легкопермагничиваемые) материалы применяют для изготовления магнитопроводов электрических двигателей, генераторов, трансформаторов, дросселей и других электрических машин, и аппаратов.

Магнитотвердые (труднопермагничиваемые) материалы используют для изготовления постоянных магнитов и носителей магнитной информации (магнитные ленты, диски, пленки и т.п.)

1.2. Типы связей между структурными частицами вещества

Различают следующие типы связи между структурными частицами вещества (ионы, молекулы): ковалентная, ионная, металлическая и межмолекулярная [1 – 6, 8] (рис. 1.2).

Рассмотрим некоторые понятия.

Электроотрицательность (ЭО) атома определяется как [2]:

$$\text{ЭО} = W_{\text{и}} + W_{\text{с}}, \quad (1.1)$$

где $W_{\text{и}}$ – энергия ионизации, $W_{\text{с}}$ – сродство к электрону.

Энергия ионизации – количество энергии, которое нужно затратить, чтобы «оторвать» электрон от нейтрального атома и превратить его в положительно заряженный ион.

Сродство к электрону – количество энергии, которое выделяется при присоединении электрона к нейтральному атому, то есть при превращении его в отрицательный ион.

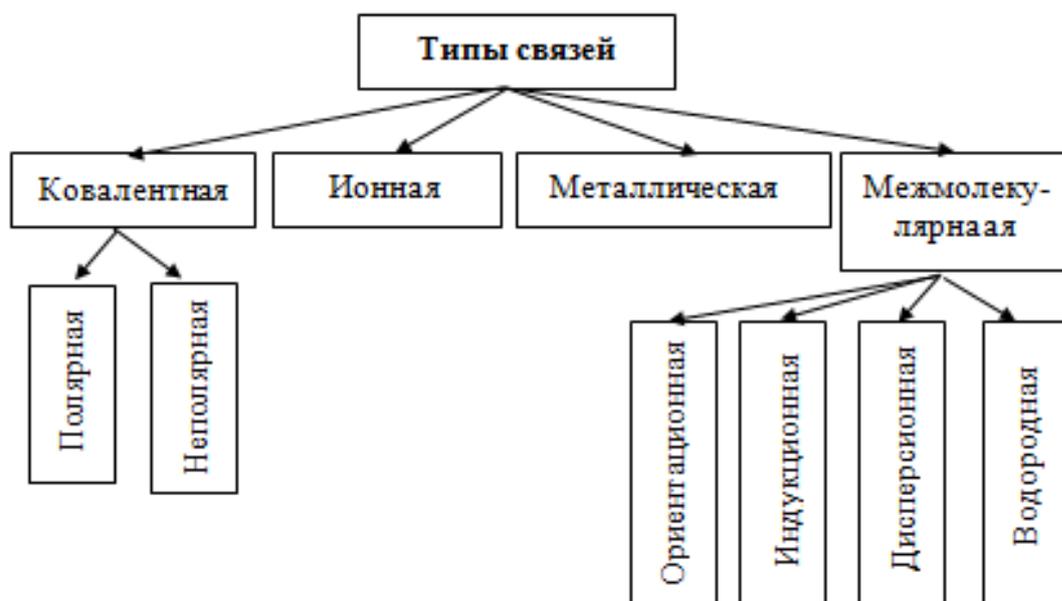


Рис. 1.2. Типы связей между структурными частицами вещества

Дипольный момент μ оценивает степень полярности молекул:

$$\mu = |q| \cdot r, \text{ Кл} \cdot \text{м}, \quad (1.2)$$

где $|q|$ – абсолютная величина заряда, Кл; r – расстояние между центрами положительных и отрицательных зарядов, м.

Если $r = 0$, т.е. центры положительных и отрицательных зарядов в молекуле находятся в одной точке, то она называется *неполярной* ($\mu = 0$).

Если $r > 0$, т.е. центры положительных и отрицательных зарядов в молекуле не совпадают, то она называется *полярной или дипольной (или просто «диполем»)* ($\mu > 0$).

Соответственно, *вещества, состоящие из полярных молекул, называются полярными, а вещества, состоящие из неполярных молекул – неполярными.*

Ковалентная связь образуется по механизму обменного взаимодействия – перекрытия электронных орбиталей валентных электронов двух или более одинаковых либо разнородных атомов. При этом максимальная электронная плотность валентных электронов (вероятность нахождения электрона в данной точке пространства) образуется в межъядерном пространстве.

Неполярная ковалентная связь образуется при объединении атомов одного химического элемента, например при образовании молекулы водорода. Распределение электронной плотности имеет симметричный

характер относительно ядер химического элемента. Максимальная электронная плотность обобществленных электронов образуется на равных расстояниях от ядер химических элементов, $\mu = 0$.

Полярная ковалентная связь образуется при объединении двух или более атомов различных химических элементов, что сопровождается смещением электронной плотности в сторону более электроотрицательного атома с образованием дипольного момента.

Полярная ковалентная связь образуется в молекуле воды, карбидах (Fe_3C , SiC и др.), нитридах (AlN и др.).

Ионная связь образуется за счет преимущественного смещения электронной плотности валентных электронов взаимодействующих атомов в сторону более электроотрицательного атома.

При формировании такой связи образуются разноименно заряженные ионы, которые, притягиваясь друг к другу, создают устойчивую ионную кристаллическую решетку или аморфную структуру. Этот тип химической связи реализуется, например, в кристаллах NaCl .

Металлическая связь заключается в обобществлении валентных электронов всех атомов металла с образованием так называемого *электронного газа* или *электронов проводимости*.

Металл состоит из положительных ионов, расположенных в пространстве в определенном порядке и совершающих непрерывные хаотические тепловые колебательные движения около положения равновесия (фононы) и электронного газа.

Взаимодействие электронного газа, имеющего отрицательный заряд, и положительных ионов приводит к образованию устойчивой кристаллической решетки металла. Электронная плотность примерно одинакова в любой точке межионного пространства. Валентные электроны слабо связаны с ионами, могут свободно перемещаться по объему вещества под действием электрического поля. Поэтому вещества с металлической связью являются проводниками.

Межмолекулярная связь обусловлена силами притяжения (силами Ван-дер-Ваальса) между молекулами.

Такие силы имеют электрическую природу и являются результатом одновременного действия трех эффектов – *ориентационного, индукционного и дисперсионного*. Энергия межмолекулярного взаимодействия определяется как

$$E = E_0 + E_{\text{и}} + E_{\text{д}}, \quad (1.3)$$

где E_o , $E_{и}$, $E_{д}$ – энергии ориентационного, индукционного и дисперсионного взаимодействий, соответственно.

Ориентационное притяжение (постоянный диполь – постоянный диполь) осуществляется между молекулами, имеющими постоянный дипольный момент. Энергия взаимодействия $E_o \sim r^{-1}$.

Индукционное притяжение (постоянный диполь – наведенный индуцированный диполь) образуется между полярной и неполярной молекулами при условии, что последняя способна поляризоваться под действием постоянного диполя. Энергия взаимодействия $E_{и} \sim r^{-6}$.

Дисперсионное притяжение (мгновенный диполь – наведенный индуцированный диполь). В неполярных молекулах в результате случайных флуктуаций электронной плотности возникают мгновенные диполи, индуцирующие диполи в соседних неполярных молекулах. Энергия такого взаимодействия $E_{д} \sim r^{-6}$.

Особым типом межмолекулярного взаимодействия является *водородная связь* – связь между катионом водорода одной молекулы и анионом другой молекулы, например: N^{-3} , O^{-2} , F^{-1} .

Межмолекулярная связь реализуется в низкомолекулярных веществах, например: в воде, парафине и высокомолекулярных веществах – органических и неорганических полимерах.

Вещества с ковалентной, ионной и межмолекулярными связями являются диэлектриками или полупроводниками, вещества с металлической связью – проводниками.

В материалах, как правило, реализуются одновременно несколько типов связей, а их количественная оценка имеет вероятностный характер. Например, в кристалле железа вероятность нахождения валентных электронов в виде электронного газа (вероятность металлической связи) составляет 55 %, а вероятность обобществления валентных электронов несколькими атомами (вероятность ковалентной связи) – 45 % [3].

1.3. Типы зарядов в веществах

Заряды в диэлектриках

Реальный диэлектрик состоит из *сильно связанных, слабо связанных и свободных* зарядов [2, 4].

Сильно (упруго) связанные заряды – электроны в диэлектриках с ковалентной и ионной связями, ионы в кристаллических веществах с плотной упаковкой решетки ионами. Под действием электрического поля

заряды упорядоченно смещаются из равновесных положений только на ограниченные расстояния: электроны смещаются в пределах атома или иона, ионы – в пределах элементарной кристаллической ячейки.

Слабо связанные заряды – диполи в полярных веществах, *ионы* в кристаллах с неплотно упакованной кристаллической решеткой, в аморфных веществах ионного строения, а также ионы, находящиеся в узлах решетки вблизи вакансий, ионы примесей и т. п. В отсутствие электрического поля слабо связанные заряды могут находиться в нескольких равновесных положениях. Из одного положения они хаотически перемещаются в другое под действием температуры.

Под действием электрического поля происходит направленное перемещение зарядов из одного равновесного положения в другое или поворот диполей. Смещение слабо связанных зарядов происходит на большие расстояния, чем смещение сильно связанных.

Свободные заряды – свободные электроны и ионы, которые образуются в диэлектриках под действием высокой температуры, сильного электрического поля, ионизирующего излучения в результате ионизации или диссоциации диэлектрика или его примесей, а также диффузии электронов из металлических электродов. Под действием электрического поля свободные заряды приобретают в диэлектрике направленное движение, разряжаются на электродах и создают ток сквозной проводимости.

Заряды в проводниках и полупроводниках

В проводниках сильно связанными зарядами являются узлы кристаллической решетки (положительные ионы), свободными зарядами – свободные электроны (электронный газ).

В полупроводниках сильно связанными зарядами являются узлы кристаллической решетки и электроны, участвующие в ковалентных связях, свободными зарядами – свободные электроны и «дырки», возникающие при внешних энергетических воздействиях.

1.4. Строение полимеров

1.4.1. Классификация высокомолекулярных веществ и полимеров

Органические вещества – соединения углерода с другими химическими элементами, за исключением наиболее простых (CO, CO₂ и др.).

Высокомолекулярные вещества (ВМС) – вещества с большой молекулярной массой (до 10⁶ и более).

Различают следующие ВМС [2]:

– *природные* – вещества животного или растительного происхождения (целлюлоза, шелк, натуральный каучук и др.);

– *искусственные* – вещества, изготовленные путем химической переработки природных ВМС (нитраты целлюлозы, ацетаты целлюлозы и др.);

– *синтетические* – вещества, изготовленные из низкомолекулярных веществ, полученных из ископаемого сырья, т. е. есть из газа или нефти (полиэтилен, синтетический каучук и др.).

Полимеры – ВМС, полученные путем объединения в макромолекулу молекул сравнительно простых веществ (*мономеров*).

Линейные полимеры образуются при объединении элементарных звеньев (мономеров) в длинные молекулярные цепи (рис. 1.3, *а*).

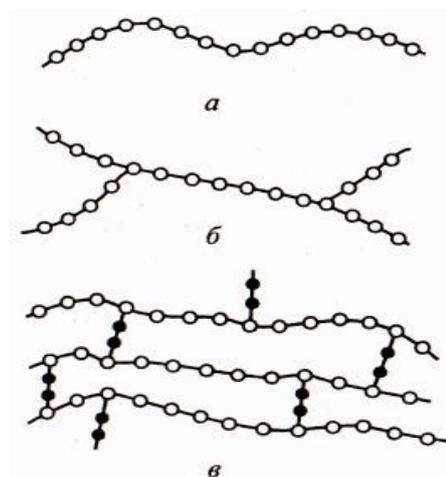


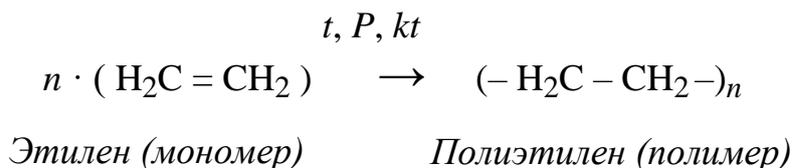
Рис. 1.3. Схематическое изображение строения макромолекул полимера:
а – линейного; *б* – разветвленного; *в* – пространственного

Разветвленные полимеры имеют боковые ответвления, которые являются дефектами строения линейных полимеров (рис. 1.3, *б*).

Пространственные (сшитые) полимеры образуются путем соединения (сшивки) длинных макромолекулярных цепей поперечными химическими связями (рис. 1.3, *в*).

1.4.2. Реакции полимеризации и поликонденсации

Реакция образования полимера из мономеров без выделения побочных продуктов называется *реакцией полимеризации*. Такой реакцией является процесс синтеза полиэтилена:



Реакция, при протекании которой одновременно с получением полимера образуются низкомолекулярные побочные продукты (H_2O , NH_3 и др.), называется *реакцией поликонденсации*. В качестве примера можно рассматривать реакцию образования фенолформальдегидной смолы, в которой побочным продуктом является вода.

1.4.3. Кристаллические и аморфные полимеры

Аморфные полимеры характеризуются наличием так называемого ближнего порядка, т. е. упорядоченное расположение макромолекул имеет место в небольших по размеру областях (*доменах*). Домены по объему полимера расположены беспорядочно. Между доменами расположены междоменные области (рис. 1.4).

Кристаллические (кристаллизующиеся) полимеры характеризуются определенным закономерным расположением макромолекул в пространстве (имеет место так называемый дальний порядок). Полимер состоит из элементарных кристаллических ячеек, обычно ромбической формы, со складчатой конформацией макромолекул. Кристаллические ячейки объединены в пластинчатые монокристаллы (кристаллиты), имеющие кристаллические и аморфные области (рис. 1.5). Кристаллиты могут быть объединены в более крупные надмолекулярные образования – «сферолиты» (рис. 1.6).

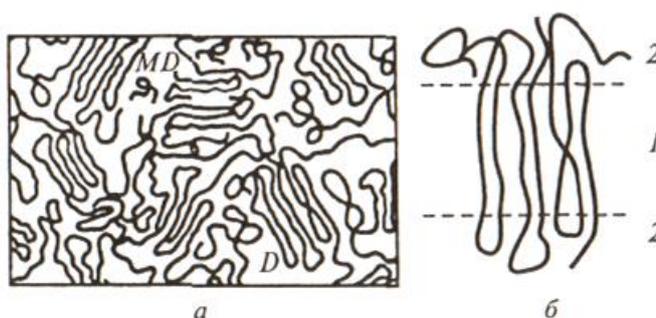


Рис. 1.4. Модель строения: *a* – аморфного полимера; *б* – домена: *D* – домен; *MD* – междоменная область; 1 – домен; 2 – истинно неупорядоченные области

Междоменные области в аморфных полимерах, аморфные области и межсферолитные пространства в кристаллических полимерах имеют наиболее низкую плотность, наибольшее количество примесей, пор, различных дефектов. Эти области ухудшают механические и электрические свойства полимеров.

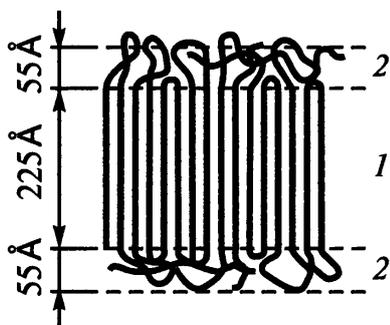


Рис. 1.5. Схематическое двумерное изображение кристаллита полиэтилена: 1 – пластинчатый монокристалл; 2 – аморфная область [2]



Рис. 1.6. Сферолиты [2]

1.4.4. Полярные и неполярные полимеры

Полимеры, как правило, включают полярные и неполярные ковалентные связи.

Полимеры являются *неполярными*, если дипольные моменты отдельных полярных ковалентных связей компенсируют друг друга. При этом суммарный дипольный момент элементарного звена и макромолекулы в целом равен нулю ($\sum \mu_i = 0$).

Например, полиэтилен – неполярный материал. Наряду с неполярными ковалентными связями С–С, он содержит и полярные связи С–Н, дипольные моменты которых уравнивают друг друга.

Полимеры называются *полярными*, если дипольные моменты отдельных полярных ковалентных связей не компенсируют друг друга. В этом случае $\sum \mu_i \neq 0$.

Примером полярного полимера является поливинилхлорид. В нем дипольные моменты полярных ковалентных связей С–Cl и С–Н не компенсируют друг друга.

1.4.5. Физические состояния аморфных полимеров

В зависимости от температуры аморфные полимеры могут находиться в трех физических состояниях [2] (рис. 1.7).

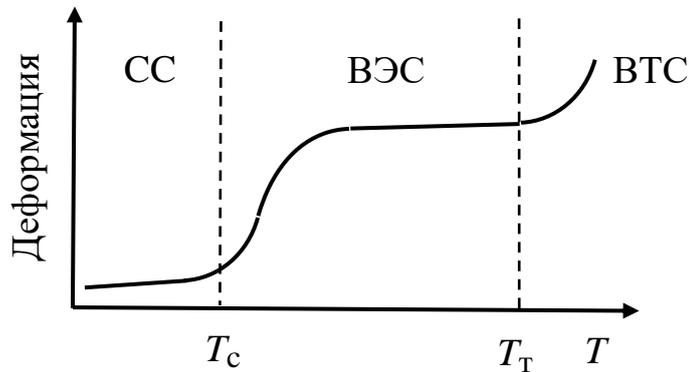


Рис. 1.7. Физические состояния аморфных полимеров: СС – стеклообразное, ВЭС – высокоэластическое, ВТС – вязкотекучее

Стеклообразное состояние (СС): для вещества характерна относительно высокая прочность, твердость, малая упругая (обратимая) деформация.

Высокоэластическое состояние (ВЭС): для вещества характерна значительная упругая деформация.

Вязкотекучее состояние (ВТС): для вещества характерна значительная пластическая (необратимая) деформация и растворимость в растворителях.

Полимерные изделия эксплуатируются в СС и ВЭС состояниях, переработка полимеров в изделия осуществляется в ВТС состоянии.

При увеличении температуры и переходе вещества из СС в ВЭС и далее в ВТС возрастает подвижность элементов молекулярной структуры, что приводит к ухудшению механических и электрических (рис. 1.8) свойств.

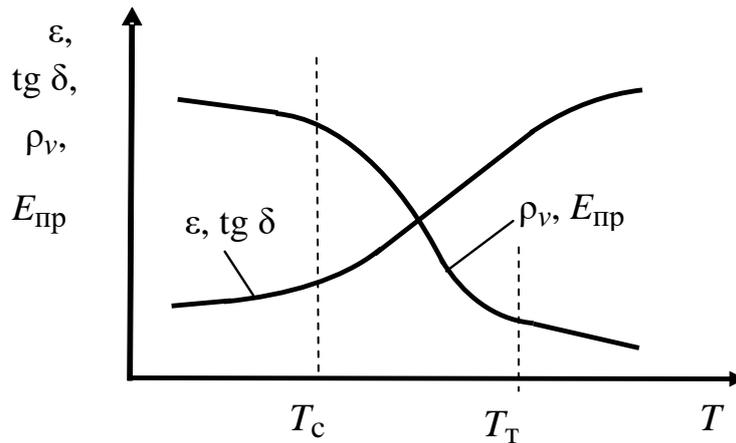


Рис. 1.8. Влияние температуры на диэлектрические характеристики полимерных диэлектриков

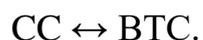
Различают сегментальную и групповую подвижность элементов молекулярной структуры.

Сегментальная подвижность — тепловое движение отдельных отрезков макромолекулы (*сегментов*), состоящих из десятков или сотен мономерных звеньев. Наблюдается при температурах выше температуры стеклования T_c в полярных и неполярных полимерах.

Групповая подвижность заключается в самостоятельном тепловом движении полярных групп: $-\text{Cl}$, $-\text{F}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NO}_2$, $-\text{COOH}$ и т.п. Групповая подвижность наблюдается только у полярных полимеров ниже T_c .

1.4.6. Термопластичные и термореактивные полимеры

Термопластичные полимеры (термопласты) в цикле нагрев — охлаждение — нагрев многократно способны переходить из СС в ВТС и обратно, т. е. обратимо изменять свои физико-химические свойства:



Термореактивные полимеры (терморектопласты) при нагревании необратимо изменяют физико-химические свойства. В процессе нагрева вещество однократно переходит из СС в ВТС, одновременно происходит реакция «сшивки» макромолекул поперечными связями, вещество теряет пластичность и способность растворяться в растворителях, т.е. переходит в СС:

СС → ВТС → СС.

При последующем охлаждении и нагреве полимер не переходит в ВТС.

1.5. Зонная теория твердого тела

Зонная теория твердого тела (ЗТТТ) [2, 4–6, 8] позволяет объяснить различную электронную проводимость проводников, полупроводников и диэлектриков.

Рассмотрим, для примера, электронную конфигурацию верхнего электронного слоя атома кремния (Si). Она имеет вид $3s^2 3p^2 3d^0$. В изолированных атомах, когда вещество находится в газообразном состоянии, электроны могут размещаться на дискретных энергетических уровнях – нормальных (s и p) и возбужденном (d). Энергетические уровни разделены интервалами запрещенных значений энергии (рис. 1.9).

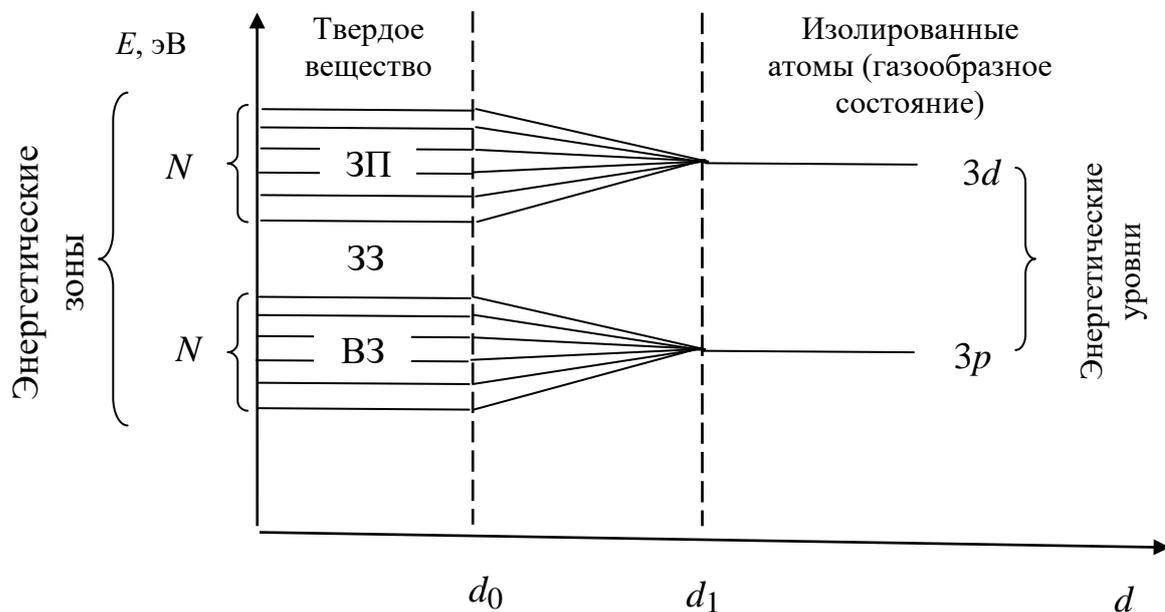


Рис. 1.9. Схема расположения энергетических уровней свободного атома и энергетических зон неметаллического твердого вещества

При сближении атомов на расстояние d_0 газообразное вещество переходит в твердое состояние. При этом, в соответствии с принципом Паули, в веществе не могут находиться два электрона в одинаковом квантовом состоянии (с одним и тем же набором квантовых чисел

и с равным уровнем энергии). Поэтому энергетические уровни одинаковых электронов атомов «расщепляются» на N подуровней, где N – количество атомов во фрагменте материала. Образуются так называемые *энергетические зоны*: *валентная зона (ВЗ)*, где располагаются валентные электроны, и *зона проводимости (ЗП)*, где могут находиться *свободные электроны*, обеспечивающие электропроводность вещества. Между ВЗ и ЗП существует *запрещенная зона (ЗЗ)*. Валентные электроны могут перейти в ЗП при условии:

$$E_{эл} > \Delta E_{зз},$$

где $E_{эл}$ – энергия электрона, $\Delta E_{зз}$ – ширина запрещенной зоны.

Проводники, полупроводники и диэлектрики имеют различные значения $\Delta E_{зз}$ (рис. 1.10).

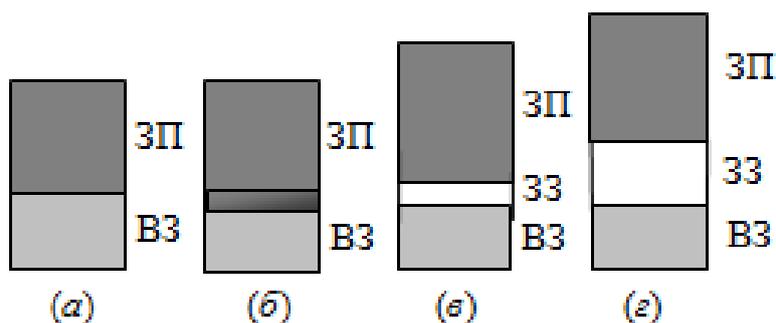


Рис. 1.10. Схема расположения энергетических уровней:
 а, б – в проводниках, в – в полупроводниках, г – в диэлектриках

У проводников $\Delta E_{зз} = 0$. ВЗ и ЗП могут примыкать друг к другу или перекрываться. Учитывая, что разница между энергиями энергетических подуровней $\Delta E_{эл} = 10^{-28}$ Эв, а энергия электрона в невозбужденном состоянии $E_{эл} \approx 10^{-4}$ Эв, электроны могут переходить из ВЗ в ЗП без дополнительных внешних энергетических воздействий, обеспечивая электропроводность вещества.

У полупроводников $\Delta E_{зз} = 0,05\text{--}3,0$ Эв. Здесь для перехода электронов из ВЗ в ЗП необходимо увеличить их энергию за счет каких-либо внешних энергетических воздействий (например, тепла, светового облучения и т.п.).

У диэлектриков $\Delta E_{зз} = 3,0\text{--}8,0$ Эв. При таком высоком значении $\Delta E_{зз}$ электроны не могут преодолеть ЗЗ даже под действием значительных

энергетических воздействий, поэтому диэлектрики имеют высокое электрическое сопротивление и не проводят электрический ток.

1.6. Классификация электротехнических материалов по характеру химических связей

В основе электронно-ядерной микроструктуры лежит химическая связь атомных остовов. Как известно, различают три предельных типа химической связи: ионную, металлическую, ковалентную. Подавляющее число реальных химических связей являются промежуточными (смешанными) между двумя или тремя вышеперечисленными. Характеристиками промежуточных типов химической связи являются степени ковалентности (C_K), металличности (C_M) и ионности (C_I) [3].

Степень обобществления электронов ($COЭ$) в результате наложения всех трех компонент химической связи друг на друга и характер локализации обобществленных электронов в межъядерном пространстве химического соединения можно описать в общем виде уравнением суммарной волновой функции [3]:

$$\psi_{OЭ} = C_K\psi_K + C_M\psi_M + C_I\psi_I, \quad (1.4)$$

где C_K , C_M и C_I – коэффициенты, определяющие долю каждой из трех составляющих связи, ψ_i – волновые функции типов связи.

Разделение материалов на проводники, полупроводники и диэлектрики в зависимости от типа химической связи и структуры прослеживается на примере гомоядерных связей элементов периодической системы (табл. 1.1).

С уменьшением степени ковалентности и увеличением степени металличности при переходе в группах периодической системы сверху вниз и в периодах справа налево повышается электропроводность веществ. Диэлектрики располагаются правее жирной линии, разделяющей неметаллы и металлы, проводники – левее этой линии, а полупроводники (В, Si, Ge, Sn, С, Р, As, S, Se, J, Те) – вблизи этой линии.

Анализ табл. 1.1 показывает, что проводниками являются вещества, где $C_M > C_K$, а диэлектриками – вещества, где $C_K > C_M$.

Для полупроводников характерно следующее: $C_K = 65,75 - 47,67 \%$, $C_M = 52,33 - 34,25 \%$.

Таблица. 1.1

Периодическая система гомоядерных химических связей элементов и основных типов исходных металлических и неметаллических соединений и материалов на их основе [3]

1	2											13	14	15	16	17	
Li_M <u>23,42</u> 76,57	Be_M <u>39,69</u> 60,31	Be_M 1 <u>39,69</u> 2 60,31 3	1 – обозначение элемента, где м – металл 2 – степень ковалентности – C_K , % 3 – степень металличности – C_M , %							$[\text{C}]_n^{1,2,3}$ <u>68,35</u> 31,65			$[\text{B}]_n^3$ <u>51,03</u> 48,97	$[\text{C}]_n^3$ <u>68,35</u> 31,65	N_2 <u>78,80</u> 21,20	O_2 <u>89,40</u> 10,60	F_2 <u>100</u> 0
Na_M <u>22,51</u> 77,48	Mg_M <u>33,26</u> 66,74	металлы		полуметаллы			неметаллы				\star полупроводники	Al_M <u>44,52</u> 55,48	$[\text{Si}]_n^3$ <u>50,27</u> 49,73	$[\text{P}]_n^2, \text{P}_4$ <u>56,62</u> \star 43,38	$\text{S}_8, [\text{S}]_n^1$ <u>65,75</u> 34,25	Cl_2 <u>73,79</u> 26,21	
K_M <u>20,67</u> 79,33	Ca_M <u>26,51</u> 73,49	Sc_M <u>32,25</u> 67,75	Ti_M <u>35,6</u> 64,38	V_M <u>41,16</u> 58,84	Cr_M <u>43,51</u> 56,49	Mn_M <u>43,84</u> 56,16	Fe_M <u>44,02</u> 55,98	Co_M <u>46,67</u> 53,33	Ni_M <u>46,80</u> 53,20	Cu_M <u>49,33</u> 50,67	Zn_M <u>46,54</u> 53,45	Ga_M <u>44,24</u> 55,76	$[\text{Ge}]_n^3$ <u>49,46</u> 50,54	$\text{As}_M, [\text{As}]_n^2$ <u>53,16</u> <u>54,29</u> 46,84 46,71	$[\text{Se}]_n^1, \text{S}_8$ <u>65,29</u> 34,79	Br_2 <u>71,06</u> 28,94	
Rb_M <u>19,50</u> 80,49	Sr_M <u>24,31</u> 75,69	Y_M <u>30,36</u> 69,64	Zr_M <u>33,14</u> 66,86	Nb_M <u>36,43</u> 63,57	Mo_M <u>38,71</u> 61,29	Tc_M <u>41,54</u> 58,46	Ru_M <u>41,51</u> 58,48	Rh_M <u>44,22</u> 55,78	Pd_M <u>38,65</u> 61,35	Ag_M <u>39,11</u> 60,89	Cd_M <u>42,12</u> 57,88	In_M <u>43,64</u> 56,36	Sn_M <u>45,62</u> 54,38 $[\text{Sn}]_n^3$ <u>47,67</u> 52,33	$\text{Sb}_M, [\text{Sb}]_n^2$ <u>48,96</u> <u>50,07</u> 51,04 49,93	$[\text{Te}]_n^1$ <u>54,92</u> 45,08	I_2 <u>59,24</u> 40,76	
Cs_M <u>18,59</u> 81,41	Ba_M <u>23,98</u> 76,02	La_M <u>30,15</u> 69,85	Hf_M <u>32,71</u> 67,29	Ta_M <u>35,64</u> 64,36	W_M <u>38,48</u> 61,52	Re_M <u>42,18</u> 58,82	Os_M <u>41,21</u> 58,79	Ir_M <u>43,69</u> 56,31	Pt_M <u>38,60</u> 61,39	Au_M <u>38,43</u> 61,39	Hg_M <u>41,13</u> 58,84	Tl_M <u>42,52</u> 57,48	Pb_M <u>44,98</u> 55,02	Bi_M <u>47,20</u> 52,80	Po_M <u>49,38</u> 50,62	At_2 <u>55,69</u> 44,31	

Контрольные вопросы к главе 1

1. Какие виды электротехнических материалов Вы знаете?
2. Какие типы связи между структурными частицами вещества Вы знаете?
3. Какие типы высокомолекулярных веществ Вам известны?
4. Какие виды полимеров Вы знаете?
5. В чем отличие реакций полимеризации и поликонденсации?
6. Какие физические состояния аморфных полимеров Вам известны?
7. В чем отличие термопластичных и термореактивных полимеров?
8. Какие типы зарядов в веществах Вы знаете?
9. В чем отличие энергетических зон и энергетических уровней?
10. Какие уровни структурной организации материалов Вы знаете?
11. Как подразделяют материалы на проводники, полупроводники и диэлектрики в зависимости от типа химической связи?

Глава 2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Классификация диэлектриков

По назначению различают [2, 4–6, 8, 12–14]:

– *электроизоляционные материалы*, предназначенные для создания электрической изоляции, т. е. для отделения друг от друга частей электрических устройств, аппаратов и машин, находящихся под различными электрическими потенциалами;

– *диэлектрики для конденсаторов*, предназначенные для создания электрической емкости;

– *активные диэлектрики* — диэлектрики с управляемыми свойствами (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты и др.).

По агрегатному состоянию диэлектрики могут быть *газообразные, жидкие, твердые и твердеющие* (лаки, эмали, компаунды, высыхающие масла и др.).

По химической природе различают *органические и неорганические* диэлектрики.

2.2. Поляризация диэлектриков

2.2.1. Характеристики процесса поляризации диэлектриков

Рассмотрим плоский конденсатор, между обкладками которого находится вакуум (рис. 2.1, а).

Заряд конденсатора Q_0 определяется по выражению:

$$Q_0 = \frac{\varepsilon_0 S U}{d} = C_0 U, \quad (2.1)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м; S – площадь обкладок конденсатора, м²; d – расстояние между обкладками, м; U – напряжение, В; $C_0 = \varepsilon_0 S/d$ – емкость конденсатора, Ф.

Разделим обе части (2.1) на S и получим:

$$\sigma_0 = \varepsilon_0 E, \quad (2.2)$$

где $\sigma_0 = Q_0/S$ – плотность зарядов на обкладках конденсатора, Кл/м²; $E = U/d$ – напряженность электрического поля, В/м.

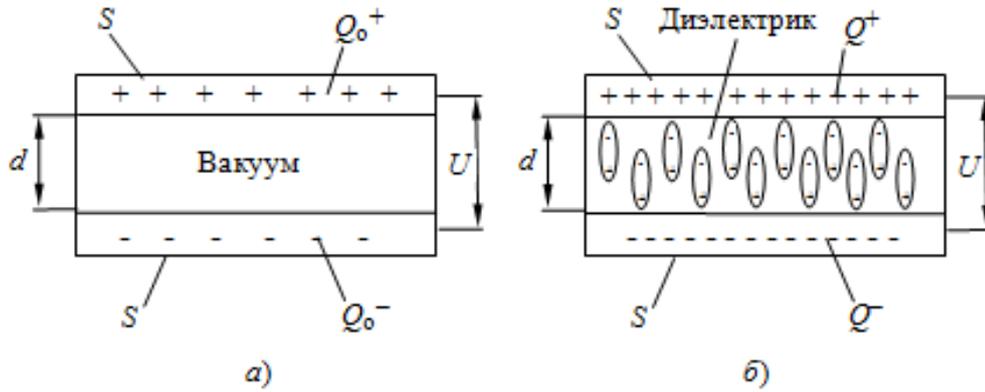


Рис. 2.1. Конденсатор: *a* – с вакуумом; *б* – с диэлектриком между обкладками

Введем между обкладками конденсатора диэлектрик (рис. 2.1, б). Под действием электрического поля в нем будет происходить процесс *поляризации*.

Поляризация – ограниченное смещение связанных зарядов, в том числе поворот полярных молекул, под действием электрического поля [2, 4–6, 8].

В результате поляризации в полярных диэлектриках образуются, а в неполярных диэлектриках увеличиваются дипольные моменты вещества.

При поляризации диэлектрика у положительного электрода конденсатора сосредотачиваются отрицательные заряды, а у отрицательного – положительные. Для компенсации образовавшихся зарядов, чтобы напряжение на обкладках не уменьшалось, источник тока поставляет на электроды конденсатора дополнительные заряды. При этом заряд конденсатора увеличивается.

Заряд конденсатора с диэлектриком:

$$Q = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U}{d} = C U, \quad (2.3)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; C – емкость конденсатора с диэлектриком, Ф.

Плотность заряда на обкладках конденсатора с диэлектриком:

$$\sigma = \varepsilon_0 \varepsilon E. \quad (2.4)$$

Из выражений (2.1) и (2.3) следует:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} = \varepsilon. \quad (2.5)$$

Численное значение относительной диэлектрической проницаемости показывает, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора (или его заряд) при замене вакуума между обкладками на исследуемый диэлектрик [2].

Относительная диэлектрическая проницаемость ε оценивает способность вещества к поляризации, является макроскопической характеристикой поляризации диэлектрика.

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{C_0 + C_d}{C_0} = 1 + \frac{C_d}{C_0} \geq 1, \quad (2.6)$$

где C_0 – емкость конденсатора с вакуумом между обкладками, Ф; C_d – емкость конденсатора, обусловленная поляризацией диэлектрика, Ф.

Из (2.6) следует, что ε не может быть меньше единицы. Для вакуума $\varepsilon = 1$.

Количественной мерой поляризации единицы объема диэлектрика служит *поляризованность* P , являющаяся векторной суммой индуцированных дипольных моментов μ_i всех (n) частиц или микрообъемов диэлектрика [2, 4, 5]:

$$P = \sum_{i=1}^n \mu_i = n\mu_i = \varepsilon_0 n\alpha E', \quad (2.7)$$

где α – поляризуемость данной частицы или микрообъема, E' – напряженность локального электрического поля, действующего на частицу (микрообъем).

Поляризуемость α является микроскопической характеристикой поляризации диэлектрика.

Связь между ε и α устанавливает уравнение Клаузиуса-Мосотти [2, 4, 5]:

$$\varepsilon = \frac{1 + 2n\alpha / 3\varepsilon_0}{1 - n\alpha / 3\varepsilon_0}. \quad (2.8)$$

Для линейных диэлектриков в области слабых электрических полей:

$$P = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0 \chi E, \quad (2.9)$$

где $\chi = (\varepsilon - 1)$ – диэлектрическая восприимчивость вещества.

Электрическое поле конденсатора характеризуют вектором электрического смещения, или вектором электрической индукции, численно равным плотности заряда на обкладках конденсатора:

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0 \varepsilon E = \varepsilon_a E, \quad (2.10)$$

где P – поляризованность, характеризующая плотность заряда на электродах конденсатора, обусловленную поляризацией диэлектрика, $\varepsilon_0 E$ – заряд конденсатора в вакууме, $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества.

Величина, характеризующая относительное изменение ε при изменении температуры диэлектрика на один градус, называется *температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости*:

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}, \text{ K}^{-1}. \quad (2.11)$$

Средний температурный коэффициент диэлектрической проницаемости в интервале температур $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{T_2 - T_1}, \quad (2.12)$$

откуда

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1(1 + TK_\varepsilon \cdot \Delta T), \quad (2.13)$$

где ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости при температурах T_1 и T_2 , соответственно.

2.2.2. Виды поляризации диэлектриков

В зависимости от времени протекания все виды поляризации подразделяются на *упругие (быстрые или деформационные)* и *релаксационные (замедленные)* [2, 4, 5, 8, 17].

Упругие поляризации (электронная и ионная) заключаются в мгновенном смещении сильно связанных зарядов (электронов и ионов) при приложении электрического поля и мгновенном их возвращении в исходное равновесное состояние после прекращения действия поля.

Для упругих видов поляризации имеет место соотношение:

$$\tau \ll T/2 = 1/2f, \quad (2.14)$$

где τ – время смещения зарядов, $T/2$ – полупериод приложенного напряжения, f – частота напряжения.

Релаксационные поляризации (дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, электронно-релаксационная, спонтанная, миграционная и резонансная) заключаются в относительно медленном смещении слабо связанных зарядов (диполей, ионов и др.) при приложении электрического поля и медленном их возвращении в равновесное состояние после прекращения его действия.

Для релаксационных видов поляризации:

$$\tau \approx T/2. \quad (2.15)$$

Упругие поляризации не сопровождаются потерями энергии электрического поля, т.е. не вызывают нагрев диэлектрика. *Релаксационные поляризации* сопровождаются потерями энергии электрического поля.

Электронная поляризация

Электронная поляризация – упругое смещение и деформация электронных оболочек атомов, ионов и молекул относительно ядер под действием электрического поля (рис. 2.2) [2, 4, 5, 8, 17].

При электронной поляризации в поляризованной частице образуется дипольный момент $\mu_3 = |q| \cdot r$ (рис. 2.2, б).

Электронная поляризация имеет место у всех диэлектриков, независимо от их агрегатного состояния и строения. В чистом виде электронная поляризация имеет место в газообразных, жидких и твердых неполярных диэлектриках молекулярного строения. При этом в полимерах – ниже температуры стеклования. Время установления этого вида поляризации составляет $10^{-15} - 10^{-14}$ с.

Относительная диэлектрическая проницаемость при электронной поляризации не зависит от частоты и напряженности электрического поля – $\epsilon \neq \varphi(f, E)$.

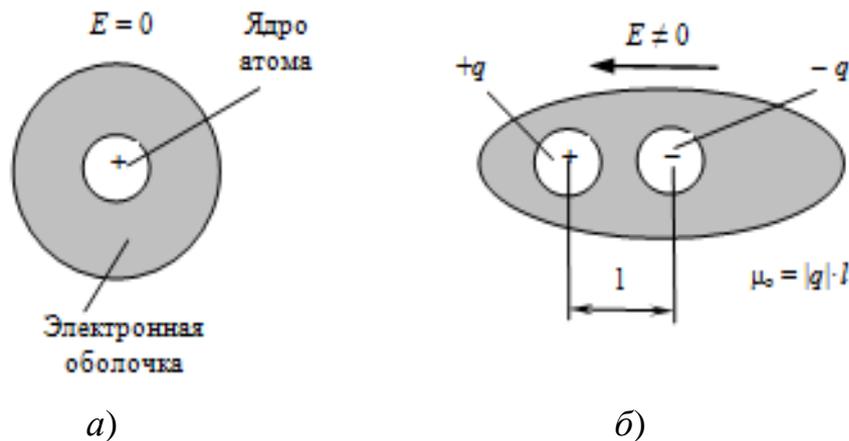


Рис. 2.2. Схема электронной поляризации атома водорода:
 а – в отсутствие электрического поля ($E = 0$), б – поляризованный атом ($E \neq 0$)

При повышении температуры относительная диэлектрическая проницаемость уменьшается (рис. 2.3), причем при температурах плавления $t_{\text{пл}}$ и кипения $t_{\text{кип}}$ – скачкообразно. Уменьшение ε при увеличении температуры объясняется снижением числа поляризуемых молекул (n) в единице объема вещества вследствие его температурного расширения (см. формулу 2.8). Для диэлектриков с чисто электронной поляризацией $TK_{\varepsilon} < 0$.

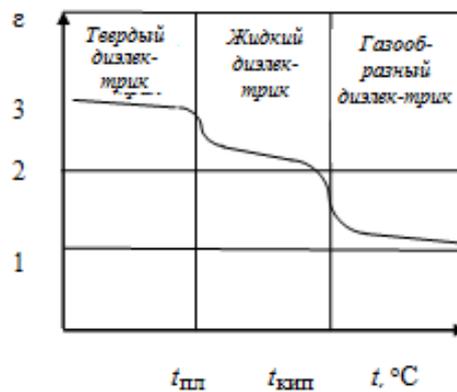


Рис. 2.3. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость неполярных диэлектриков молекулярного строения

У газообразных диэлектриков (неон Ne, водород H_2 , азот N_2 и др.) $\varepsilon \approx 1$, у жидких (трансформаторное масло, бензол C_6H_6 , четыреххлористый углерод CCl_4 и др.) $\varepsilon \approx 2$, у твердых (парафин др.) $\varepsilon = 2,5\text{--}6$.

Ионная поляризация

Ионная поляризация – упругое смещение сильно связанных ионов под действием внешнего электрического поля на величину менее параметра кристаллической решетки [2, 4, 5, 6, 8] (рис. 2.4).

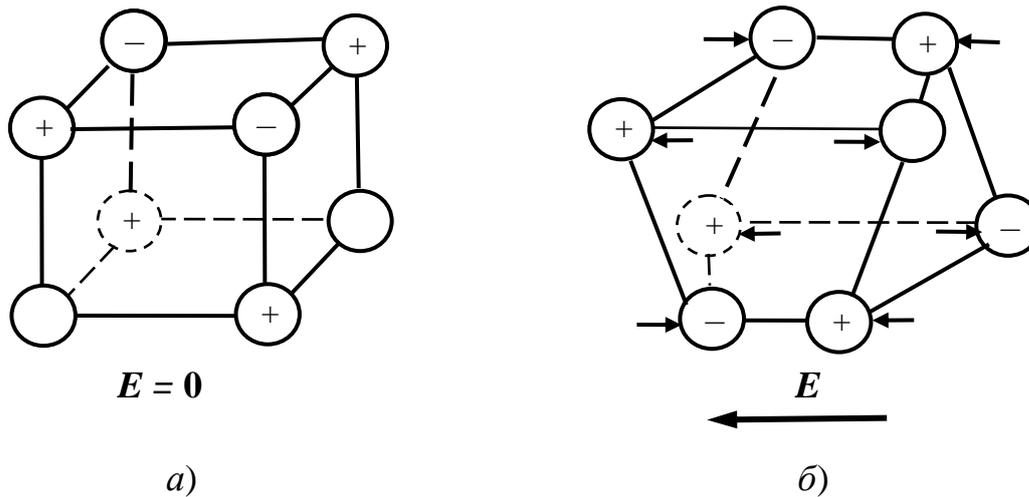


Рис. 2.4. Схема ионной поляризации:

a – элементарная кристаллическая ячейка в отсутствие электрического поля ($E = 0$),
б – поляризованная кристаллическая ячейка ($E \neq 0$)

Поляризация наблюдается в кристаллических диэлектриках ионного строения с плотной упаковкой решетки ионами (корундовая керамика Al_2O_3 , слюда, кварц SiO_2 , NaCl и др.).

Время поляризации – 10^{-13} – 10^{-12} с.

Ионная поляризация всегда сопровождается электронной поляризацией.

Суммарная поляризованность вещества определяется как

$$P = \sum \mu_{\varepsilon_i} + \sum \mu_{и_i}, \quad (2.16)$$

где μ_{ε_i} – дипольный момент иона, обусловленный электронной поляризацией, $\mu_{и_i}$ – элементарный дипольный момент, обусловленный ионной поляризацией.

Диэлектрическая проницаемость вещества ионного строения:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\varepsilon} + \varepsilon_{и}, \quad (2.17)$$

где $\varepsilon_{\varepsilon}$ – диэлектрическая проницаемость, обусловленная электронной поляризацией, $\varepsilon_{и}$ – диэлектрическая проницаемость, обусловленная ионной поляризацией.

Относительная диэлектрическая проницаемость при ионной поляризации не зависит от частоты и напряженности электрического поля.

При нагревании ε возрастает линейно ($TK_{\varepsilon} > 0$) (рис. 2.5). Это связано с ослаблением межионных сил и увеличением смещения ионов относительно друг друга под действием электрического поля.

Для веществ с ионной поляризацией $\varepsilon = 3-10$.

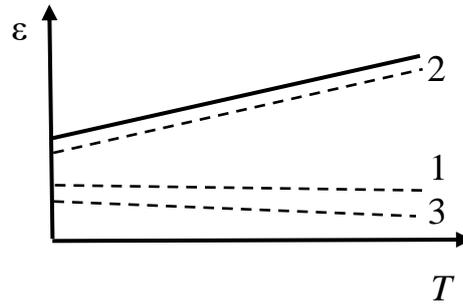


Рис. 2.5. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость диэлектриков с плотной упаковкой решетки ионами; составляющие поляризации: 1 – электронная, 2 – ионная, 3 – количество частиц в единице объема диэлектрика [2]

Дипольно-релаксационная поляризация

Дипольно-релаксационная поляризация – преимущественная ориентация дипольных молекул вещества, находящихся в непрерывном тепловом хаотическом движении, в направлении электрического поля [2, 4, 5, 6, 8] (рис. 2.6).

Дипольно-релаксационная поляризация наблюдается в полярных газообразных, жидких и твердых веществах молекулярного строения. В этих веществах наряду с дипольно-релаксационной имеет место электронная поляризация.

Продолжительность установления дипольно-релаксационной поляризации характеризуют *временем релаксации*.

Время релаксации (τ_p) – промежуток времени, в течение которого после внезапного прекращения действия внешнего электрического поля степень упорядоченности диполей уменьшается в e ($\sim 2,7$) раз.

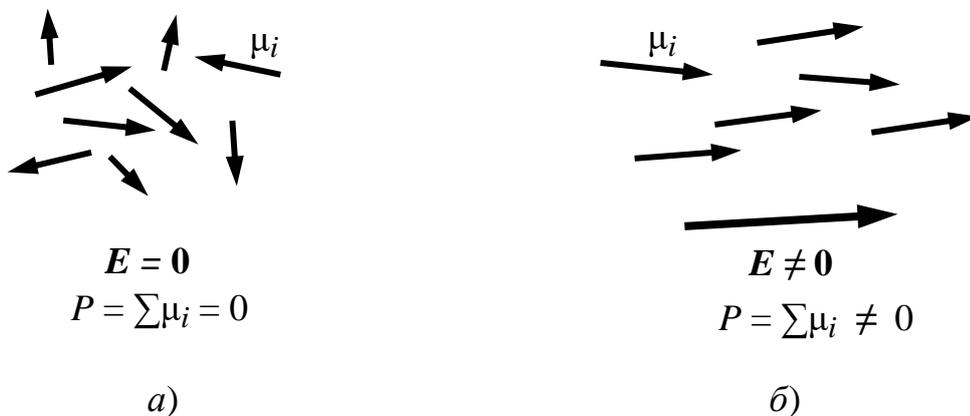


Рис. 2.6. Схема дипольно-релаксационной поляризации: *а* – ориентация диполей в отсутствие электрического поля; *б* – то же при наложении электрического поля; μ_i – дипольный момент молекулы

Время релаксации составляет 10^{-8} – 10^{-1} с. Для веществ с дипольно-релаксационной поляризацией $\varepsilon = 3$ – 20 и более. Зависимость $\varepsilon(T)$ приведена на рис. 2.7.

С повышением температуры в результате ослабления межмолекулярных связей увеличивается ориентация диполей в направлении электрического поля, поэтому ε возрастает (рис. 2.7, участок 1–2). Однако с повышением температуры возрастает и энергия теплового хаотического движения диполей, и выше некоторой температуры T_m дезориентирующее действие теплового движения начинает преобладать над ориентирующим действием электрического поля. Поэтому при дальнейшем нагревании (при $T > T_m$) ε уменьшается (участок 2–3). Максимум на зависимости $\varepsilon(T)$ соответствует условию $\tau_p \approx T/2$. При увеличении частоты напряжения при $T = T_m$ τ_p становится больше $T/2$ ($\tau_p > T/2$). Для восстановления равенства $\tau_p \approx T/2$ необходимо ослабить межмолекулярные связи, т. е. увеличить температуру. Поэтому при повышении частоты напряжения максимум зависимости $\varepsilon(T)$ смещается в область более высоких температур.

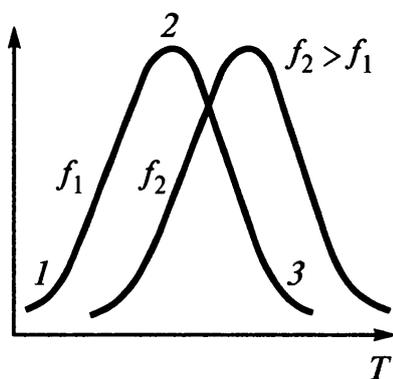


Рис. 2.7. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость полярных диэлектриков молекулярного строения

Зависимость ε от частоты электрического поля для веществ с дипольно-релаксационной поляризацией приведена на рис. 2.8.

На участке I выполняется условие: $\tau_p < T/2$. Здесь диполи успевают ориентироваться в изменяющемся по направлению электрическом поле, ε равна диэлектрической проницаемости при постоянной частоте электрического поля (ε_0).

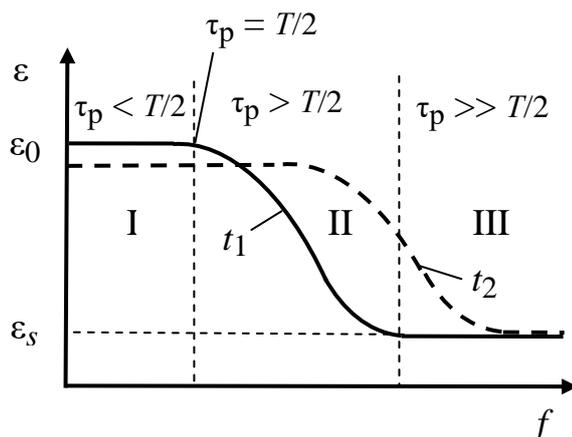


Рис. 2.8. Зависимость ϵ от частоты электрического поля для веществ с дипольно-релаксационной поляризацией: $t_2 > t_1$ [2]

На участке II $\tau_p > T/2$. Диполи не успевают следовать за изменением направления приложенного напряжения, угол их поворота уменьшается и снижается ϵ .

На участке III $\tau_p \gg T/2$. Здесь частота электрического поля настолько велика, что ориентация диполей совершенно прекращается, т. е. дипольная поляризация отсутствует. Здесь имеет место только электронная поляризация: $\epsilon = \epsilon_s$, где ϵ_s – диэлектрическая проницаемость при бесконечно большой частоте электрического поля.

При увеличении температуры ослабляются межмолекулярные связи в веществе и, следовательно, уменьшается τ_p . Поэтому кривая зависимости $\epsilon(f)$ при повышении температуры смещается вправо. При этом ϵ_0 уменьшается за счет роста дезориентирующего влияния теплового движения молекул.

В полимерных диэлектриках дипольно-релаксационная поляризация проявляется в виде двух разновидностей: дипольно-сегментальной и дипольно-групповой.

Дипольно-сегментальная поляризация заключается в создании электрическим полем некоторой упорядоченности в положении отрезков молекулярных цепей (сегментов), совершающих хаотическое тепловое движение.

Этот вид поляризации наблюдается при температурах выше температуры стеклования T_c в полярных и неполярных полимерах.

Дипольно-групповая поляризация заключается в ориентации полярных групп макромолекул ($-\text{Cl}$, $-\text{F}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NO}_2$, $-\text{COH}$ и т.п.) и боковых ответвлений ($-\text{CH}_3$ и т.п.) под действием электрического поля. Она наблюдается при температурах ниже T_c в полярных полимерах.

Рассмотрим зависимости $\varepsilon(T)$ для полимерных диэлектриков.

Для полимерных неполярных диэлектриков (полиэтилен, полистирол, полипропилен и др.) при $T < T_c$ характерна только электронная поляризация (здесь $\varepsilon = 2-2,5$). С увеличением температуры при $T < T_c$ ε незначительно снижается, так как уменьшается n (рис. 2.9, а).

При $T > T_c$ имеет место дипольно-сегментальная и электронная поляризации. Здесь при нагревании полимера до T_m ε возрастает в результате ослабления межмолекулярных связей и увеличения степени ориентации сегментов макромолекул в направлении электрического поля. Однако с повышением температуры возрастает и энергия теплового хаотического движения сегментов. Выше температуры t_m дезориентирующее действие теплового движения начинает преобладать над ориентирующим действием электрического поля, поэтому при дальнейшем нагревании (при $T > T_m$) ε уменьшается.

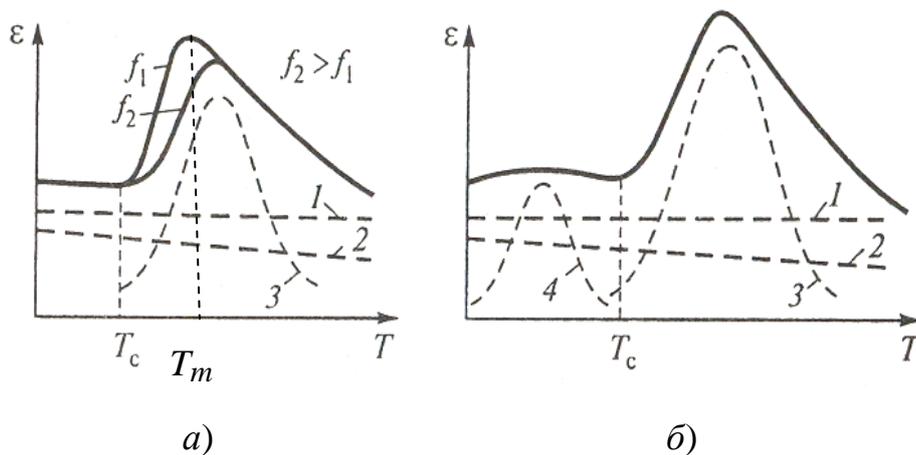


Рис. 2.9. Зависимость диэлектрической проницаемости ε : а – неполярного, б – полярного полимера от температуры; составляющие поляризации: 1 – электронная, 2 – $n(T)$, 3 – дипольно-сегментальная поляризация, 4 – дипольно-групповая поляризация [2]

Для полимерных полярных диэлектриков (полиэтилентерефталат, поливинилхлорид, фторопласт – 3, полиимиды и др.) при $T < T_c$ характерны электронная и дипольно-групповая поляризации, а при $T > T_c$ – электронная и дипольно-сегментальная (рис. 2.9, б). Поэтому ε полярных полимеров больше ($\varepsilon = 3-6$ и более), чем у неполярных. При нагревании ε проходит через два максимума, один – при $T < T_c$, обусловленный дипольно-групповой поляризацией, и другой – при $T > T_c$, обусловленный дипольно-сегментальной поляризацией.

Ионно-релаксационная поляризация

Ионно-релаксационная поляризация – упорядоченное смещение слабо связанных ионов под действием электрического поля на величину, превышающую параметр кристаллической решетки (у кристаллических веществ) или расстояние между ионами (у аморфных веществ).

Поляризация имеет место в твердых диэлектриках ионного строения аморфных и кристаллических с неплотной упаковкой решетки ионами.

Диэлектрическая проницаемость таких диэлектриков (неорганические стекла, электротехнический фарфор, асбест и др.) увеличивается нелинейно при повышении температуры за счет роста интенсивности ионной и, главным образом, ионно-релаксационной поляризации (рис. 2.10).

Диэлектрическая проницаемость не зависит от напряженности электрического поля и уменьшается при возрастании частоты приложенного напряжения аналогично зависимости $\epsilon(f)$ для веществ с дипольно-релаксационной поляризацией (рис. 2.8).

Значение ϵ изменяется в пределах 4–20. По сравнению с диэлектриками с плотной упаковкой решетки здесь наблюдаются более высокие значения $TК_{\epsilon}$.

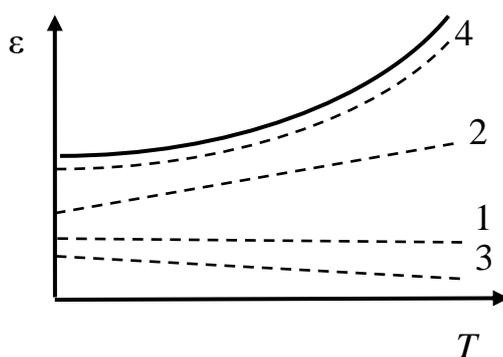


Рис. 2.10. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость диэлектриков аморфных и с неплотной упаковкой решетки ионами; составляющие поляризации: 1 – электронная, 2 – ионная, 3 – $n(T)$, 4 – ионно-релаксационная [2]

Электронно-релаксационная поляризация

Электронно-релаксационная поляризация – смещение под действием электрического поля избыточных электронов или дырок, расположенных на дефектах кристаллической решетки, на расстояния, превышающие межатомные [2, 4, 5, 8].

Наблюдается в диэлектриках с электронной проводимостью, например, в диоксиде титана TiO_2 , загрязненном примесями Nb^{+5} , Ca^{+2} или Ba^{+2} .

Зависимости $\varepsilon(f)$ и $\varepsilon(T)$ для этого вида поляризации аналогичны соответствующим зависимостям при дипольно-релаксационном виде.

Миграционная поляризация

Миграционная поляризация заключается в накоплении свободных зарядов на границах раздела фаз в многокомпонентных диэлектриках (слоистые диэлектрики и диэлектрики – статистические смеси) ввиду различной электропроводности фаз [2, 4, 5, 8] (рис. 2.11). Миграционная поляризация слоистых диэлектриков (гетинакс, текстолит и др.) также называется межслойной.

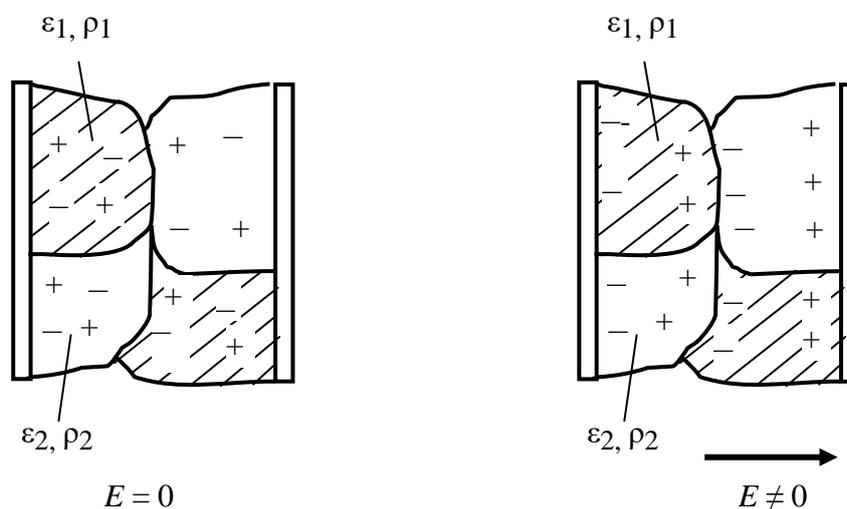


Рис. 2.11. Модель процесса миграционной поляризации в двухфазном диэлектрике

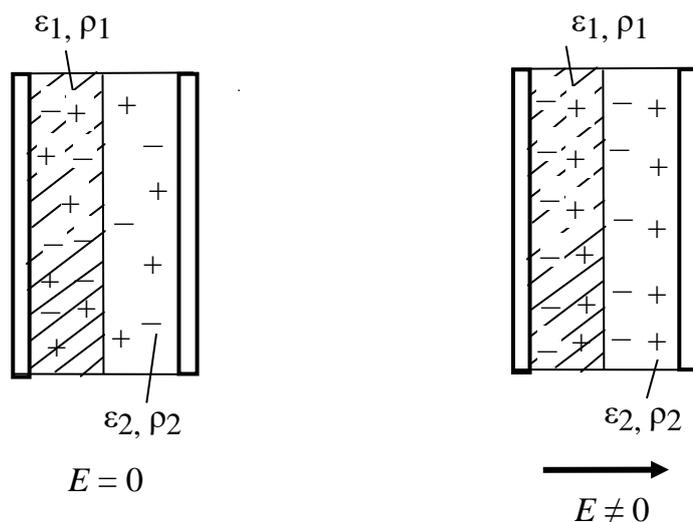


Рис. 2.12. Модель процесса миграционной поляризации в слоистом диэлектрике

Для многофазных диэлектриков – статистических смесей и слоистых диэлектриков поперек слоев – имеем:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \theta_i \varepsilon_i, \quad (2.18)$$

где n – количество компонентов или слоев диэлектрика, θ_i – объемная доля i -го компонента, ε – диэлектрическая проницаемость i -го компонента.

Резонансная поляризация

Резонансная поляризация возникает при совпадении собственных частот колебаний молекул, атомов, валентных электронов диэлектрика с частотой приложенного электрического поля в области сверхвысоких (СВЧ) и оптических частот. Поляризация сопровождается сильным рассеиванием энергии электрического поля, т. е. нагревом диэлектрика. Для молекул O_2 и водяных паров наблюдается при дискретных частотах в области 10^{10} – 10^{15} Гц.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация

Спонтанная поляризация – самопроизвольное, без наложения электрического поля, смещение ионов или ориентация полярных молекул веществ [2, 4, 5, 8].

Вещества, в которых осуществляется спонтанная поляризация, называются сегнетоэлектриками.

Термин возник от названия сегнетовой соли ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$), в которой впервые было обнаружено это явление.

Сегнетоэлектрик состоит из микрообъемов малого размера ($0,001-10 \text{ мм}^3$), которые называются *доменами*. В доменах вещество имеет максимальную степень поляризованности, т. е. поляризовано до насыщения без наложения электрического поля.

В отсутствие электрического поля векторы поляризованности доменов P_{si} направлены в разные стороны, а суммарная поляризованность вещества равна нулю, $\sum P_{si} = 0$ (рис. 2.13, а).

При наложении электрического поля происходит рост размера тех доменов, где векторы поляризованности составляют минимальный угол с направлением вектора $E - \sum P_{si} > 0$ (рис. 2.13, б). В сильных полях доменная структура исчезает, каждый монокристалл или зерно становится однодоменными, суммарный вектор поляризованности принимает максимальное значение $\sum P_{si}^{\max}$ и ориентируется в направлении вектора E (рис. 2.13, в).

Зависимость поляризованности P сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля E имеет вид петли гистерезиса (рис. 2.14). Такие диэлектрики называют нелинейными, зависимость $P(E)$ у них имеет нелинейный характер:

$$P = (\varepsilon - 1) / \varepsilon_0 E = \chi / \varepsilon_0 E. \quad (2.19)$$

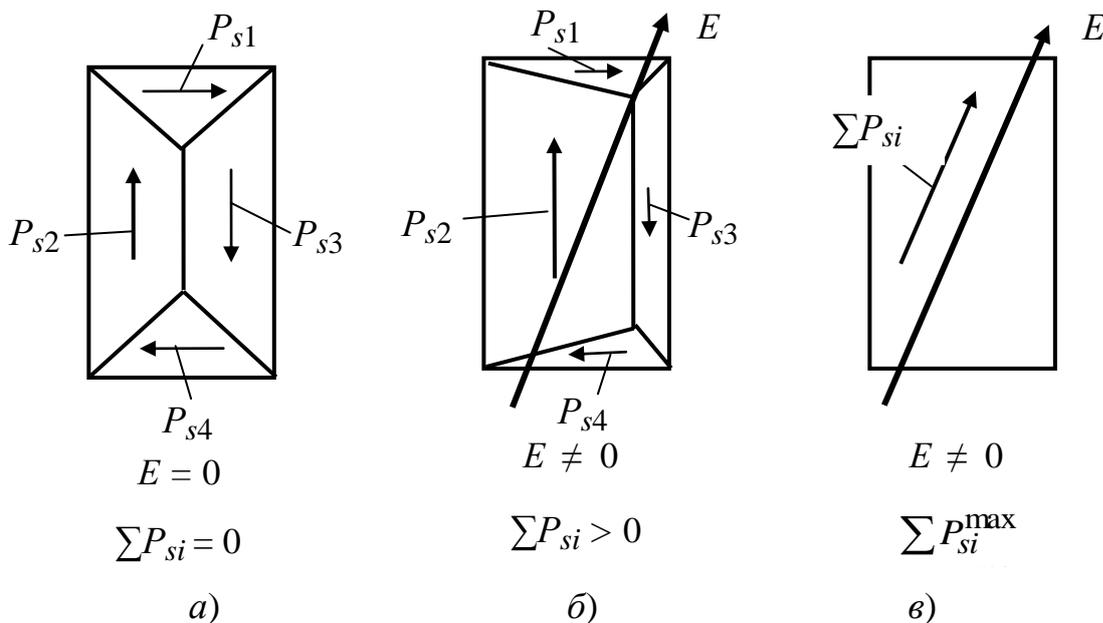


Рис. 2.13. Схема изменения доменной структуры сегнетоэлектрика: а – без наложения электрического поля; б – рост домена, где вектор поляризованности P_{s2} наиболее ориентирован в направлении вектора напряженности электрического поля E ; в – образование однодоменной структуры [2, 8]

При увеличении E от 0 поляризованность диэлектрика возрастает по кривой начальной поляризованности (1) и достигает поляризованности насыщения $P_{\text{нас}}$. При последующем уменьшении E до 0 в сегнетоэлектрике сохраняется остаточная поляризованность $P_{\text{ост}}$, так как остается частичная ориентированность векторов поляризованности доменов P_s . Если к веществу приложить поле с напряженностью $-E_c$, то поляризованность уменьшается до нуля.

Напряженность электрического поля ($-E_c$), при которой поляризованность сегнетоэлектрика становится равной 0, называется коэрцитивной силой.

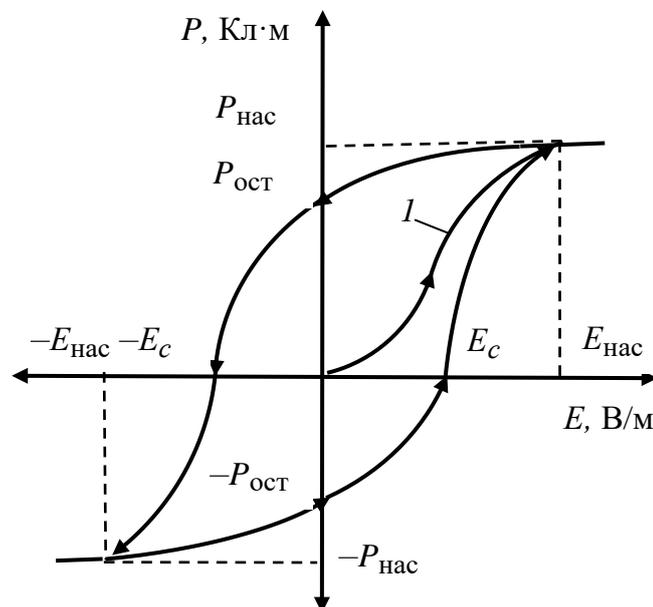


Рис. 2.14. Зависимость поляризованности P сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля E :

1 — кривая начальной поляризованности, $P_{\text{нас}}$ — поляризованность насыщения, $P_{\text{ост}}$ — остаточная поляризованность, $-E_c$ — коэрцитивная сила [2, 4, 6, 8]

Значение ε определяется путем графического дифференцирования кривой начальной поляризованности как тангенс угла наклона прямой, проходящей через начало координат и точку на этой кривой.

Зависимость $\varepsilon(E)$ имеет экстремальный характер с максимумом (ε_{max}) (рис. 2.15).

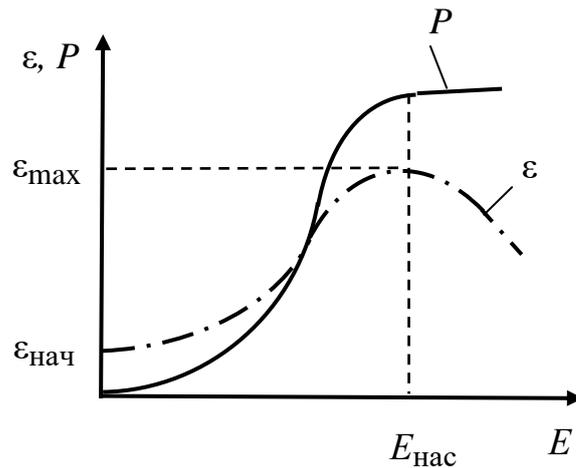


Рис. 2.15. Зависимости начальной поляризованности P и ϵ сегнетоэлектриков от напряженности электрического поля E [2]
Зависимость $\epsilon(T)$ для сегнетоэлектриков приведена на рис. 2.16

При увеличении температуры до точки Кюри T_K ϵ растет до ϵ_{\max} , что связано с ослаблением связей между ионами или молекулами вещества и повышением степени их ориентации в электрическом поле. При $T > T_K$ вследствие интенсивного теплового движения ионов или молекул доменная структура разрушается, вещество становится обычным линейным диэлектриком и ϵ резко уменьшается.

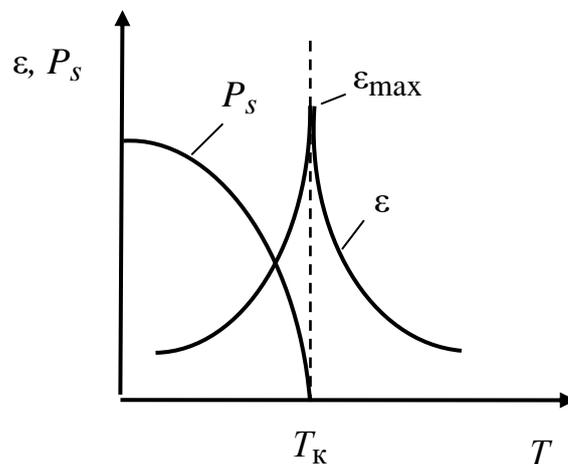


Рис. 2.16. Зависимость $\epsilon(T)$ для сегнетоэлектриков: P_s – поляризованность домена

Сегнетоэлектрики имеют очень большие значения ϵ , так для сегнетовой соли $\epsilon = 500\text{--}600$, для титанатов бария (BaTiO_3) и стронция (SrTiO_3) $\epsilon = 1500\text{--}12000$. Сегнетоэлектрики применяются в обычных конденсаторах для создания электрической емкости и в *варикондах* – конденсаторах, емкость которых управляется внешним электрическим полем.

Контрольные вопросы к подглавам 2.1, 2.2

1. Какое физическое явление называется поляризацией диэлектрика?
2. В чем отличие сильно связанных, слабо связанных и свободных зарядов диэлектрика?
3. Что показывает численное значение относительной диэлектрической проницаемости?
4. Как рассчитывается температурный коэффициент диэлектрической проницаемости?
5. В чем отличие упругих и релаксационных видов поляризации?
6. Какие релаксационные виды поляризации диэлектриков Вы знаете?
7. В чем отличие ионной и ионно-релаксационной поляризации?
8. В чем отличие дипольно-сегментальной и дипольно-групповой поляризации?
9. Что называется коэрцитивной силой применительно к сегнетоэлектрику?

2.3. Электропроводность диэлектриков

2.3.1. Основное уравнение электропроводности

Плотность тока j для любого диэлектрика, исключая вакуум:

$$j = I/S = \sum n_i q_i v_i, \quad (2.20)$$

где I – ток, протекающий через диэлектрик, А; S – площадь поперечного сечения элемента диэлектрика, м²; i – тип электрического заряда (например, электроны, ионы и др.); n_i – число носителей зарядов определенного типа в единице объема вещества, м⁻³; q_i – заряд i -го носителя заряда, Кл; v_i – скорость i -го носителя заряда, м/с.

$$v_i = a_i E, \quad (2.21)$$

где a_i – подвижность i -го носителя заряда, м²/В · с; E – напряженность электрического поля, В/м.

Подвижность заряда численно равна его скорости при напряженности поля 1 В/м.

Из (2.20) и (2.21) имеем:

$$j = \sum n_i q_i v_i = (\sum n_i q_i a_i) E = \sigma E = (1/\rho) E, \quad (2.22)$$

где $\sigma = \sum n_i q_i a_i$ – удельная проводимость, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$; ρ – удельное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

Выражение

$$j = \sigma E \quad (2.23)$$

называется законом Ома в дифференциальной форме.

2.3.2. Слабое и сильное электрические поля

Зависимости $j(E)$ и $\sigma(E)$ приведены на рис. 2.17.

При $E < E_{\text{кр}}$ (слабое электрическое поле) соблюдается закон Ома, проводимость не зависит от напряженности поля и является постоянной величиной.

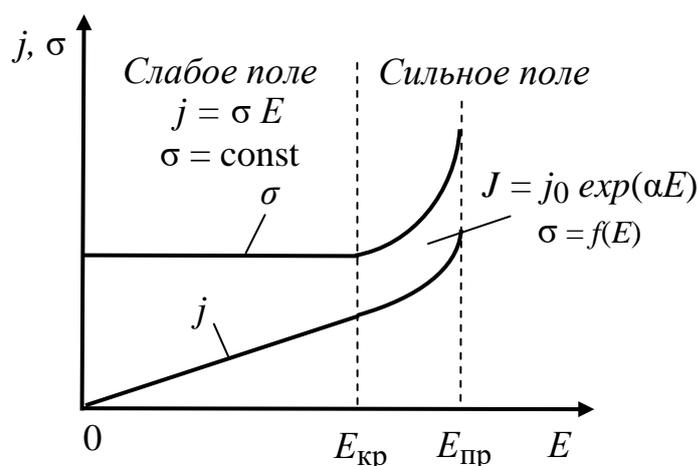


Рис. 2.17. Зависимость плотности тока j и удельной проводимости диэлектрика σ от напряженности электрического поля E

При $E > E_{\text{кр}}$ (сильное электрическое поле) закон Ома не соблюдается, зависимость $j(E)$ имеет нелинейный характер, например:

$$j = j_0 \exp(\alpha E), \quad (2.24)$$

где j_0 и α – коэффициенты, зависящие от природы вещества.

Удельная проводимость зависит от напряженности поля, является переменной величиной.

При $E = E_{\text{пр}}$ происходит *пробой диэлектрика* – диэлектрик теряет электроизоляционные свойства и становится проводником.

2.3.3. Сопротивление и проводимость диэлектриков

Рассмотрим участок твердой изоляции с двумя электродами (рис. 2.18). Ток, протекающий через элемент диэлектрика, называется током сквозной проводимости $I_{\text{ск}}$. Он определяется по выражению:

$$I_{\text{ск}} = I_v + I_s = U/R_v + U/R_s, \quad (2.25)$$

где I_v – объемный ток, протекающий через объем элемента диэлектрика, I_s – поверхностный ток, протекающий по граням элемента диэлектрика, U – напряжение, R_v – объемное сопротивление элемента диэлектрика, R_s – поверхностное сопротивление элемента диэлектрика.

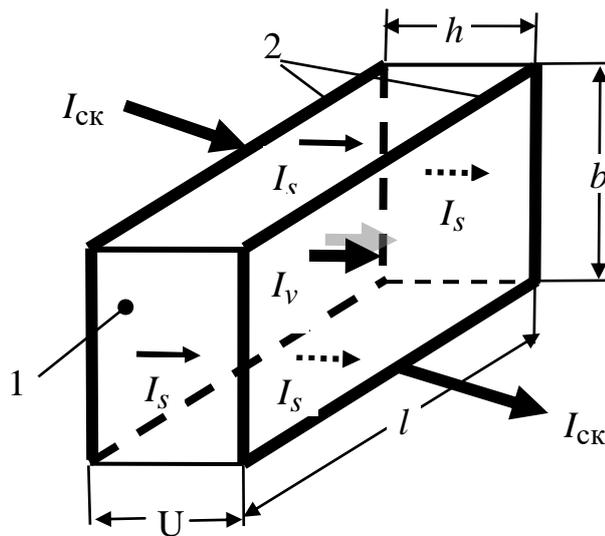


Рис. 2.18. К определению удельных сопротивлений диэлектриков:
1 – диэлектрик, 2 – металлические электроды [8]

$$R_v = \rho_v \frac{h}{bl} = \rho_v \frac{h}{s}, \quad (2.26)$$

где ρ_v – удельное объемное сопротивление, h , b , l – толщина, ширина и длина элемента диэлектрика соответственно, s – площадь электрода.

Из (2.26) имеем:

$$\rho_v = R_v \frac{s}{h}, \text{ Ом} \cdot \text{ м}. \quad (2.27)$$

Удельное объемное сопротивление диэлектрика (ρ_v) численно равно сопротивлению куба с ребром l м, если напряжение приложено к противоположным граням куба [8].

Поверхностное сопротивление диэлектрика определяется по выражению:

$$R_s = \rho_s \frac{h}{p} = \rho_s \frac{h}{2(b+l)}, \quad (2.28)$$

где ρ_s – удельное поверхностное сопротивление, p – периметр элемента диэлектрика.

Из (2.28) имеем:

$$\rho_s = R_s \frac{p}{h}, \text{ Ом.} \quad (2.29)$$

Удельное поверхностное сопротивление диэлектрика (ρ_s) численно равно сопротивлению поверхности квадрата со стороной l м, если напряжение приложено к противоположным его сторонам [8].

Проводимость диэлектрика оценивают следующими параметрами:

– удельная объемная проводимость:

$$\sigma_v = \frac{1}{\rho_v}, \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (2.30)$$

– удельная поверхностная проводимость:

$$\sigma_s = \frac{1}{\rho_s}, \text{ См.} \quad (2.31)$$

2.3.4. Электропроводность газообразных диэлектриков

Сопротивление газообразных диэлектриков (H_2 , O_2 , N_2 , SF_6 и др.) очень велико. Например, для воздуха ρ_v составляет 10^{18} Ом · м.

Рассмотрим зависимость плотности тока j от напряженности поля E для газообразных диэлектриков (рис. 2.19).

В области слабых электрических полей ($E < E_{\text{кр}}$) имеет место так называемая *несамостоятельная электропроводность*. Носителями зарядов здесь являются ионы и электроны. Они образуются путем ионизации нейтральных молекул газа в результате внешних энергетических воздействий: космического излучения, излучения Солнца, Земли, нагрева и т.п.

Ионизация – отрыв или присоединение («прилипание») к нейтральным атому или молекуле одного или нескольких электронов. Ионизация сопровождается образованием ионов (положительных и отрицательных) и электронов, например:

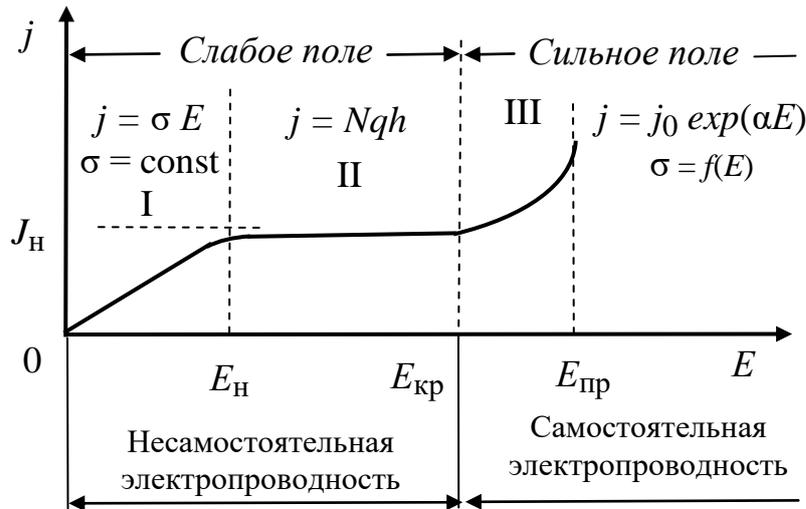


Рис. 2.19. Зависимость плотности тока j от напряженности поля E для газообразных диэлектриков [2, 8]

На участке I ($E < E_H$) в газе одновременно протекают три процесса:

- ионизация молекул газа;
- рекомбинация зарядов – процесс обратный ионизации, например, образование нейтральной молекулы из положительного иона и электрона:



– движение зарядов под действием электрического поля с разряжением их на электродах.

На этом участке соблюдается закон Ома $j = \sigma E$. Плотность тока j линейно увеличивается при повышении E за счет роста скорости движения зарядов к электродам ($v_i = a_i E$).

На участке насыщения II ($E_H < E < E_{кр}$) рекомбинация зарядов прекращается, все образующиеся в результате ионизации заряды разряжаются на электродах, обуславливая ток насыщения j_H :

$$j_{\text{н}} = Nqh, \quad (2.35)$$

где N – число зарядов, образующихся за 1 с в единице объема газа, q – величина заряда, h – расстояние между электродами.

В области сильных электрических полей (участок III) ($E > E_{\text{кр}}$) имеет место самостоятельная электропроводность. Возрастание плотности тока здесь обусловлено увеличением числа носителей зарядов (электронов и ионов) в результате электронной ударной ионизации, внутренней фотоионизации и холодной эмиссии электронов из катода.

Холодной эмиссией электронов называется процесс их испускания металлами под действием электрического поля.

Процессы электронной ударной ионизации и внутренней фотоионизации будут рассмотрены в подглаве 2.5 «Электрическая прочность диэлектриков».

При $E = E_{\text{пр}}$ происходит пробой газа, т. е. он утрачивает электроизоляционные свойства, так как между электродами образуется плазменный канал проводимости.

С увеличением температуры удельная проводимость газов возрастает в результате повышения концентрации n и подвижности a электронов и ионов (см. 2.22):

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W_{\text{и}} / kT), \quad (2.36)$$

где $W_{\text{и}}$ – энергия ионизации атомов или молекул газа.

2.3.5. Электропроводность жидких диэлектриков

Носителями зарядов в жидких диэлектриках в слабых электрических полях являются ионы и коллоидные частицы (*моллионы*), в сильных полях – ионы, коллоидные частицы и электроны. Эти заряды вызывают, соответственно, *ионную, электрофоретическую и электронную проводимость.*

Ионная проводимость

Проводимость обусловлена направленным движением положительных и отрицательных ионов под действием приложенного электрического поля. Ионы образуются в результате *электролитической диссоциации* (распада) ионогенных веществ (полярных примесей или молекул самого диэлектрика) под действием полярных молекул среды (растворителя).

Ионогенные вещества – это вещества с ионной (например, NaCl) или ковалентной полярной (H₂O, органические кислоты и др.) связями. Механизм электролитической диссоциации ионогенных веществ ионного строения представлен на рис. 2.20.

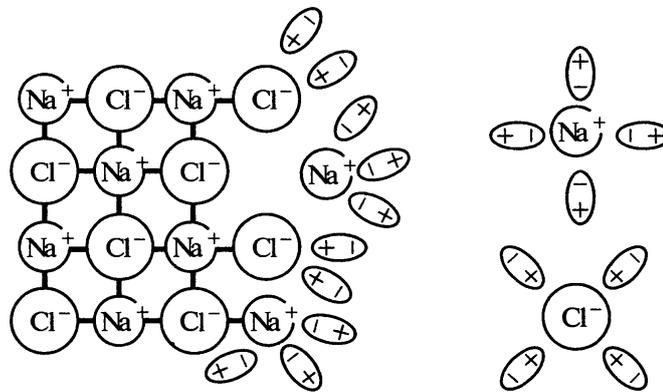


Рис. 2.20. Механизм электролитической диссоциации примеси с ионной связью (NaCl) [2]

Количественной характеристикой способности вещества диссоциировать на ионы является *степень электролитической диссоциации α* :

$$\alpha = N_{\text{д}} / N_{\text{общ}}, \quad (2.37)$$

где $N_{\text{д}}$ – количество молекул вещества, распавшегося на ионы, $N_{\text{общ}}$ – общее количество молекул вещества.

Чем больше полярность примесей и полярность диэлектрика и выше температура, тем больше α , концентрация ионов (n) и меньше удельное сопротивление диэлектрика.

Зависимость удельного сопротивления жидких диэлектриков ρ от относительной диэлектрической проницаемости ϵ , характеризующей степень полярности, приведена на рис. 2.21.

В жидких неполярных диэлектриках (бензол, трансформаторное масло, бензин и др.) имеет место *примесная проводимость*, которая обусловлена электролитической диссоциацией *ионогенных* примесей (например, воды), попавших в диэлектрик в процессе его получения и эксплуатации или образовавшихся в результате термоокислительной деструкции самого диэлектрика.

В жидких полярных веществах (хлордифенилы, касторовое масло, ацетон, этиловый спирт, вода) имеет место *собственная и примесная проводимости*. *Собственная* проводимость обусловлена электролитической диссоциацией собственных молекул диэлектрика.

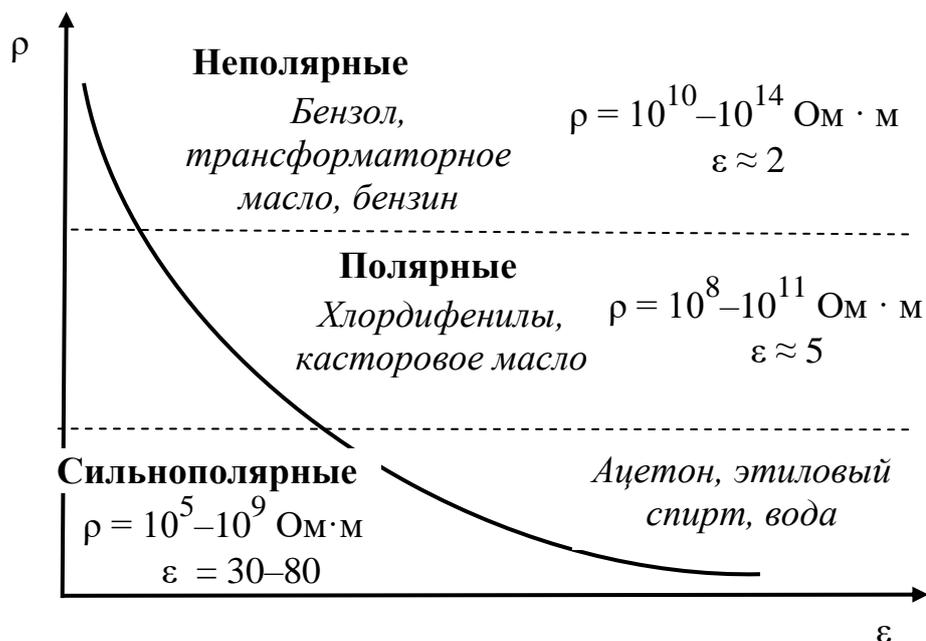


Рис. 2.21. Зависимость удельного сопротивления ρ жидких диэлектриков от относительной диэлектрической проницаемости ϵ

Вода – одна из основных полярных примесей в диэлектриках, практически всегда присутствующая в них. Хотя она имеет невысокую степень электролитической диссоциации (при 22 °С из $5,55 \cdot 10^8$ молекул воды диссоциирует только одна), ее присутствие фактически определяет электропроводность неполярных диэлектриков.

Электрофоретическая и электронная проводимости

Электрофоретическая проводимость обусловлена дрейфом коллоидных частиц и диффузионного слоя под действием приложенного электрического поля с разряжением их на электродах.

Коллоидная частица состоит из ядра, которое образуется путем объединения нескольких молекул жидкого диэлектрика, и адсорбционного слоя, содержащего ионы одного знака и полярные молекулы примеси, например воды. Коллоидная частица притягивает ионы противоположного знака, которые образуют диффузионный слой. При приложении электрического поля коллоидная частица перемещается в одном направлении, а диффузионный слой – в другом. Возникает *электрофоретический ток*.

Электронная проводимость возникает в сильных электрических полях в результате электронной ударной ионизации, внутренней фотоионизации и холодной эмиссии электронов из катода.

2.3.6. Электропроводность твердых диэлектриков

Электропроводность твердых диэлектриков зависит от их строения. Различают диэлектрики молекулярного и ионного строения.

Диэлектрики молекулярного строения

В этих диэлектриках (парафин, канифоль, полимеры) электропроводность имеет *примесный* характер, т. е. обусловлена термической диссоциацией ионогенных примесей. Ионогенными примесями являются вода, следы катализаторов, технологические добавки и пр.

Чем выше полярность диэлектрика (больше ϵ), тем больше степень диссоциации примеси и ниже его удельное электрическое сопротивление ρ (рис. 2.22).

Диэлектрики ионного строения

При низких температурах в этих диэлектриках преобладает *примесная (низкотемпературная) электропроводность*, обусловленная перемещением ионов примесей по вакансиям и междоузлиям кристаллической решетки или по аморфной структуре.

При высоких температурах преобладает *собственная (высокотемпературная) электропроводность*, обусловленная перемещением собственных ионов, которые образуются в результате диссоциации самого диэлектрика (рис. 2.23).

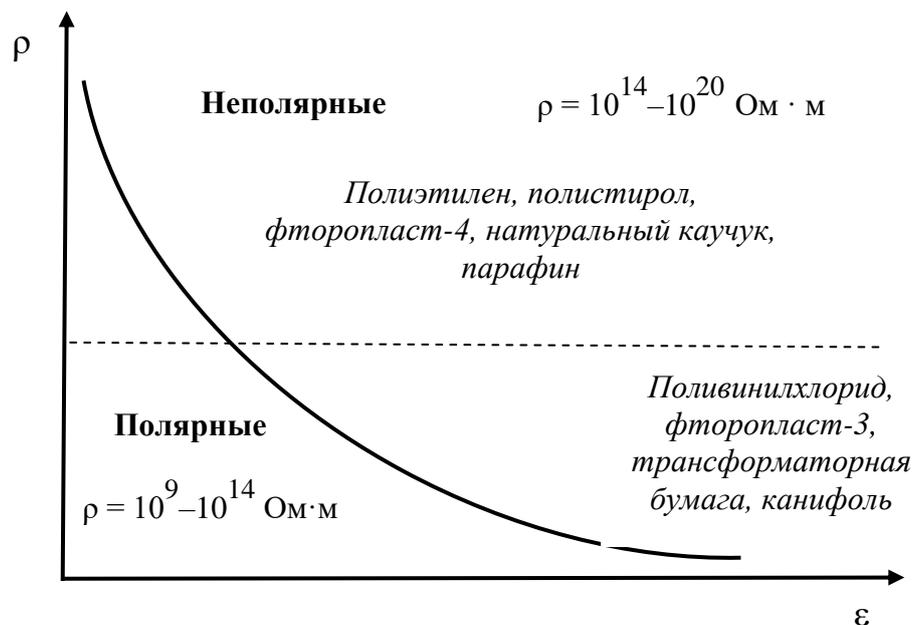


Рис. 2.22. Зависимость удельного сопротивления твердых диэлектриков молекулярного строения от степени полярности

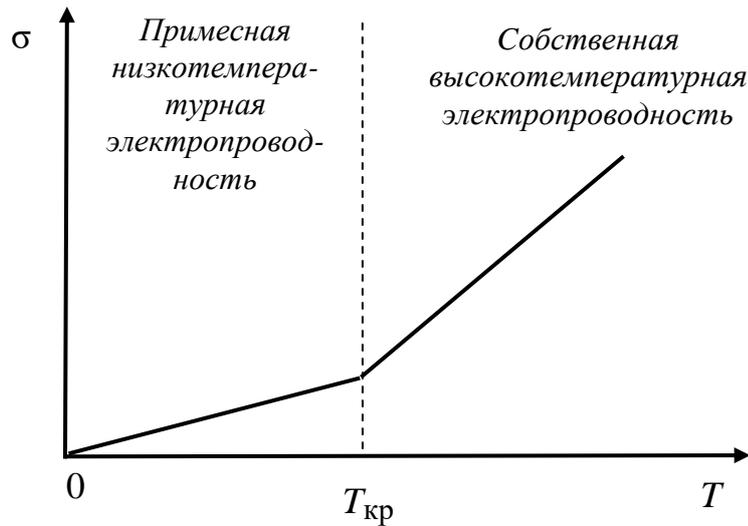


Рис. 2.23. Зависимость удельной электропроводности σ диэлектрика ионного строения от температуры (схема) [2]

С увеличением температуры оба вида проводимости возрастают в связи с повышением концентрации ионов n и их подвижности a (см. выражение 2.22). Чем меньше плотность упаковки ионов в веществе, тем больше подвижность ионов проводимости a и меньше его удельное сопротивление ρ (рис. 2.24).

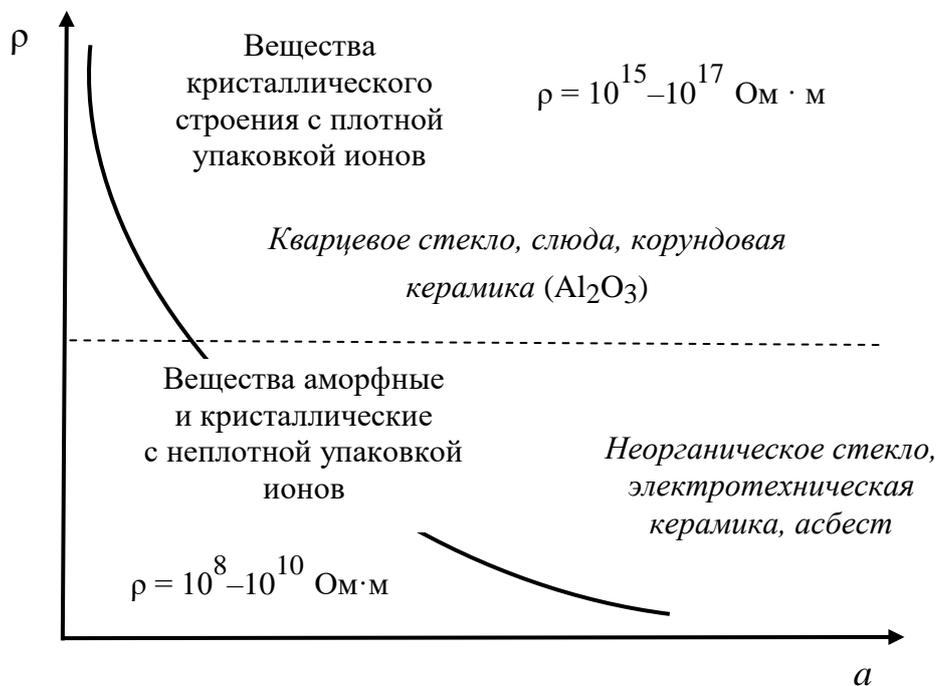


Рис. 2.24. Зависимость удельного сопротивления ρ твердых диэлектриков ионного строения от подвижности ионов a (схема)

Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков

Поверхностная электропроводность твердого диэлектрика определяется способностью его поверхности адсорбировать загрязняющие вещества – воду, различные газы, пыль.

По способности смачиваться водой вещества делят на две группы: *гидрофильные и гидрофобные*.

Гидрофильные вещества – хорошо смачиваемые водой. К этой группе относятся полярные диэлектрики – резина, фенолформальдегидные смолы, керамика, неорганическое щелочное стекло и др. *Гидрофобные вещества – не смачиваемые водой*. К этой группе относятся неполярные диэлектрики: парафин, полиэтилен, фторопласт-4 и др.

Зависимость удельного поверхностного сопротивления ρ_s диэлектриков от относительной влажности воздуха ψ приведена на рис. 2.25.

Поверхностное сопротивление неполярных диэлектриков не зависит от ψ , а сопротивление полярных диэлектриков уменьшается при увеличении относительной влажности воздуха. Последнее связано с повышением количества влаги на поверхности диэлектрика и, следовательно, возрастанием на ней количества ионов n , которые образуются при диссоциации молекул воды, а также растворенных в ней абсорбированной пыли и молекул самого диэлектрика.

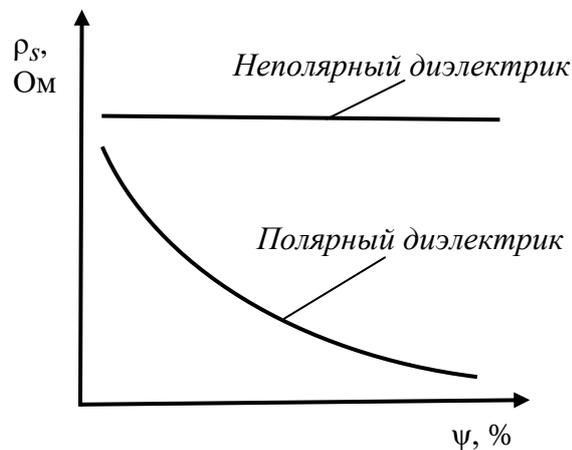


Рис. 2.25. Зависимость удельного поверхностного сопротивления ρ_s диэлектриков от относительной влажности воздуха ψ

Для увеличения ρ_s применяют промывку поверхности диэлектриков водой или растворителями, прокаливание диэлектриков при $t = 600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$, кипячение в дистиллированной воде, полирование, покрытие гидрофобными лаками, эмалями или глазурью. После обработки поверхности ρ_s диэлектриков увеличивается на 3–5 порядков.

Влияние ионизирующих излучений на электропроводность твёрдых диэлектриков

На атомных электростанциях диэлектрики подвергаются воздействию ионизирующего радиационного излучения. Различают следующие виды радиационного излучения:

- α -излучение – поток ядер гелия;
- β -излучение – поток электронов;
- γ -излучение – электромагнитное излучение различной частоты;
- протоны, различные ионы, позитроны и др.

Под действием радиационного излучения происходит ионизация диэлектриков с образованием ионов и электронов, которые увеличивают проводимость диэлектрика.

Удельная объемная проводимость диэлектрика σ_v в процессе облучения определяется как

$$\sigma_v = \sigma_c + \sigma_p; \sigma_p \gg \sigma_c, \quad (2.38)$$

где σ_c – *собственная (темновая) проводимость* диэлектрика, т. е. проводимость материала в отсутствие ионизирующего излучения; σ_p – *радиационная проводимость*, обусловленная воздействием ионизирующего излучения:

$$\sigma_p = AP^\Delta, \quad (2.39)$$

где A – радиационная постоянная, определяемая свойствами диэлектрика, Δ – показатель степени, обусловленный свойствами диэлектрика, $\Delta = 0,5-1,0$; P – мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения, Гр/с.

Поглощенной дозой называется энергия ионизирующего излучения, сообщаемая единице массы вещества. За единицу поглощенной дозы принимается Грей (Гр), $1 \text{ Гр} = \text{Дж/кг}$.

При увеличении температуры σ_p экспоненциально возрастает:

$$\sigma_p = B \exp(-E_p/kT), \quad (2.40)$$

где B – постоянная для данного вещества, E_p – энергия активации радиационного тока, k – постоянная Больцмана.

После прекращения действия ионизирующего излучения свободные электрические заряды рекомбинируют. Если в диэлектрике под действием ионизирующего излучения не произошло каких-либо необратимых

изменений состава и строения, то σ_v уменьшается и становится равной прежнему значению. Если изменения состава и строения произошли, то они могут привести как к увеличению, так и к уменьшению проводимости. Например, обугливание диэлектрика повышает его проводимость, а рост степени полимеризации диэлектрика – снижает ее.

Контрольные вопросы к подглаве 2.3

1. Приведите основное уравнение электропроводности.
2. В чем различие между слабыми и сильными электрическими полями?
3. Что называется удельным объемным сопротивлением диэлектрика?
4. Какая величина называется удельным поверхностным сопротивлением диэлектрика?
5. Какие виды электропроводности в жидких диэлектриках Вы знаете?
6. В чем заключается электрофоретическая проводимость в жидких диэлектриках?
7. Чем различаются механизмы электропроводности твердых диэлектриков молекулярного и ионного строения?
8. Какие факторы влияют на поверхностную электропроводность твердых диэлектриков?
9. Какой вид имеют зависимости j и σ от напряженности электрического поля для жидких и твердых диэлектриков?
10. Каково влияние ионизирующих излучений на электропроводность твердых диэлектриков?

2.4. Диэлектрические потери

Диэлектрические потери – часть энергии приложенного электрического поля, которая поглощается в диэлектрике. Эта энергия превращается в тепловую энергию, что проявляется в нагреве диэлектрика.

Удельные диэлектрические потери – энергия электрического поля, поглощаемая единицей объема диэлектрика [2, 4, 8].

2.4.1. Токи в диэлектрике

Полный ток I , протекающий через диэлектрик, определяется как

$$I = I_{\text{см}} + I_{\text{ск}} = I_{\text{с}} + I_{\text{абс}} + I_{\text{ск}}, \quad (2.41)$$

где $I_{см}$ – ток смещения, I_c – емкостной ток, $I_{абс}$ – ток абсорбции, $I_{ск}$ – ток сквозной проводимости.

Ток смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения:

$$I_{см} = dD/dt = \epsilon_0 \epsilon dE/dt. \quad (2.42)$$

Емкостной ток I_c обусловлен смещением сильно связанных зарядов в процессе электронной и ионной поляризации. При постоянном напряжении возникает только в коммутационные моменты (включение, выключение). При переменном напряжении возникает постоянно. Время действия очень мало – 10^{-15} – 10^{-12} с. Ток не вызывает потерь энергии в диэлектрике.

Ток абсорбции $I_{абс}$ обусловлен смещением слабо связанных зарядов в процессах релаксационных видов поляризации. При постоянном напряжении возникает в коммутационные моменты. При переменном напряжении возникает постоянно. Время действия – 10^{-8} – 10^{-1} с. Вызывает потери энергии в диэлектрике.

Ток сквозной проводимости $I_{ск}$ обусловлен движением свободных зарядов в диэлектрике под действием электрического поля. Протекает всегда при постоянном и переменном напряжениях. Вызывает потери энергии в диэлектрике.

2.4.2. Диэлектрические потери при постоянном напряжении

Изменение токов в диэлектрике при постоянном напряжении показано на рис. 2.26.

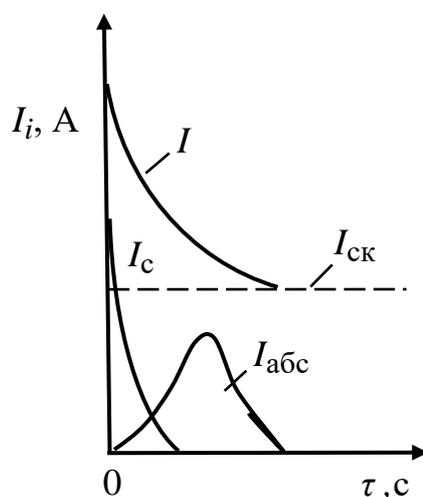


Рис. 2.26. Изменение токов в диэлектрике при постоянном напряжении [8]

В момент подачи напряжения в диэлектрике возникают емкостной ток I_C , ток абсорбции $I_{абс}$ и ток сквозной проводимости $I_{ск}$. После завершения процессов быстрой и медленной поляризации I_C и $I_{абс}$ уменьшаются до нуля и ток становится равным току сквозной проводимости $J_{ск}$.

Полные потери мощности при постоянном напряжении:

$$P_- = UI_{ск} = U \frac{U}{R_v} = \frac{U^2}{R_v}, \text{ Вт}, \quad (2.43)$$

где R_v – объемное сопротивление элемента диэлектрика.

Удельные потери мощности при постоянном напряжении:

$$p_- = P_- / V, \text{ Вт/м}^3, \quad (2.44)$$

где V – объем диэлектрика.

Подставив $V = sh$ и $R_v = \rho_v h/s$ в (2.43) и (2.44), получим:

$$p_- = \frac{U^2 s}{\rho_v h s h} = \frac{U^2}{\rho_v h^2} = \frac{E^2}{\rho_v} = \sigma_v E^2, \text{ Вт/м}^3. \quad (2.45)$$

2.4.3. Угол диэлектрических потерь

При прохождении переменного тока через сопротивление выделяемая мощность определяется как

$$P = UI \cos \varphi, \quad (2.46)$$

где φ – угол сдвига фаз между векторами тока и напряжения.

Для идеального активного сопротивления векторы тока I и напряжения U совпадают по фазе, т. е. $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$ и $P = UI$. В идеальном реактивном сопротивлении векторы I и U смещены на 90° . В этом случае $\varphi = 90^\circ$, $\cos \varphi = 0$ и $P = 0$.

Диэлектрические потери анализируют с помощью эквивалентных схем диэлектрика и векторных диаграмм. Эквивалентная схема диэлектрика представляет собой последовательно или параллельно соединенные активное сопротивление R и реактивное сопротивление X_C в виде электрической емкости.

На рис. 2.27, а представлена векторная диаграмма токов в диэлектрике для параллельной эквивалентной схемы замещения (рис. 2.27, б). Емкостный ток I_c не вызывает потерь энергии электрического поля, следовательно, он смещен по отношению к вектору U на 90° . Ток сквозной проводимости $I_{ск}$ вызывает потери энергии электрического поля, следовательно, он совпадает по фазе с вектором U . Ток абсорбции $I_{абс}$ имеет активную составляющую $I_{аа}$, совпадающую по фазе с вектором U , и реактивную составляющую $I_{ар}$, опережающую U на 90° . Вектор суммарного тока I опережает вектор U на угол φ .

Угол диэлектрических потерь δ дополняет до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи [2, 4, 8]:

$$\delta = 90^\circ - \varphi. \quad (2.47)$$

Уровень диэлектрических потерь в диэлектрике оценивают с помощью тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Чем меньше $\operatorname{tg} \delta$, тем ниже диэлектрические потери и выше качество диэлектрика.

Из векторной диаграммы (рис. 2.27, а) следует:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_{аа} + I_{ск}}{I_c + I_{ар}} = \frac{I_a}{I_p}. \quad (2.48)$$

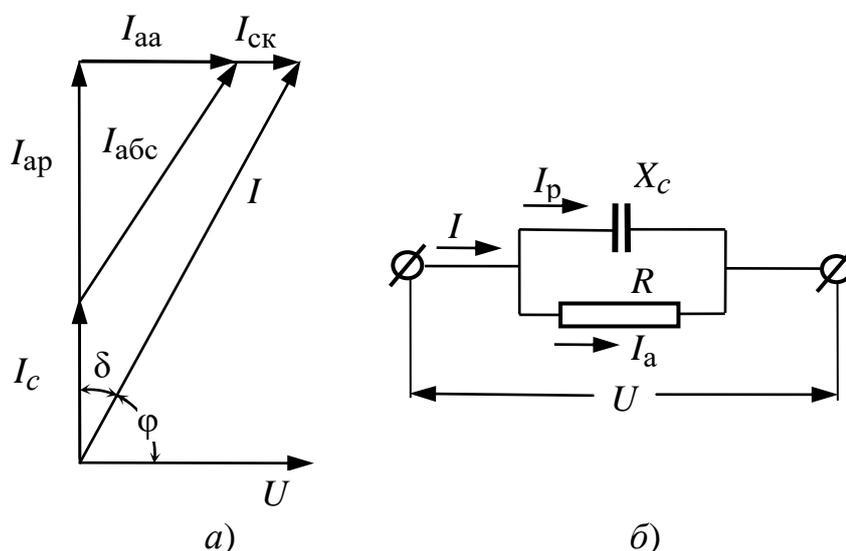


Рис. 2.27. Токи в диэлектрике: а – векторная диаграмма токов; б – параллельная эквивалентная схема замещения диэлектрика [2, 4, 5]:
 I – полный ток, I_a – активный ток, I_p – реактивный ток, $I_{абс}$ – ток абсорбции, $I_{аа}$ – активный ток абсорбции, $I_{ар}$ – реактивный ток абсорбции, I_c – емкостный ток, $I_{ск}$ – ток сквозной проводимости, R – активное сопротивление, X_c – реактивное сопротивление, U – напряжение, φ – угол сдвига фаз, δ – угол диэлектрических потерь

2.4.4. Диэлектрические потери при переменном напряжении

Полные диэлектрические потери при переменном напряжении:

$$P_{\approx} = UI_a = UI_p \operatorname{tg} \delta = U \frac{U}{X_c} \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \frac{s}{h} \operatorname{tg} \delta, \quad (2.49)$$

где X_c – емкостное сопротивление, $X_c = 1/\omega C$; ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f$; f – частота напряжения, Гц; C – емкость конденсатора, $C = \varepsilon_0 \varepsilon s/h$.

Удельные диэлектрические потери, Вт/м³:

$$p_{\approx} = \frac{P_{\approx}}{V} = \frac{P_{\approx}}{sh} = \frac{U^2 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon s \operatorname{tg} \delta}{hhs} = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon f \operatorname{tg} \delta E^2 = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta E^2}{1,8 \cdot 10^{10}} = \sigma_a E^2, \quad (2.50)$$

где V – объем элемента диэлектрика, $V = sh$, σ_a – *проводимость диэлектрика при переменном напряжении*:

$$\sigma_a = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}}, \quad \text{См/м.} \quad (2.51)$$

Параметр

$$\varepsilon' = \varepsilon \operatorname{tg} \delta \quad (2.52)$$

называется *коэффициентом диэлектрических потерь*, ε' оценивает их уровень в диэлектрике.

2.4.5. Виды диэлектрических потерь

В диэлектриках возникают следующие виды диэлектрических потерь [2, 4, 5, 8].

Потери на электропроводность обусловлены током сквозной проводимости, имеют место во всех реальных диэлектриках, в постоянном и переменном электрических полях.

Релаксационные потери вызваны релаксационными видами поляризации. Возникают в полярных диэлектриках молекулярного строения, в полярных и неполярных полимерах, в аморфных и кристаллических с неплотной упаковкой ионов ионных диэлектриках. Имеют место в переменных электрических полях.

Ионизационные потери обусловлены потерями энергии электрического поля на ионизацию газообразных диэлектриков и газовых включений в жидких и твердых диэлектриках. Наблюдаются в постоянных и переменных электрических полях.

Потери на неоднородность структуры вызваны миграционной поляризацией. Наблюдаются в постоянных и переменных электрических полях.

Резонансные потери возникают в процессе резонансной поляризации. Наблюдаются в переменных электрических полях.

2.4.6. Диэлектрические потери в газообразных диэлектриках

В газообразных диэлектриках наблюдаются следующие виды потерь энергии электрического поля: *на электропроводность и ионизационные* ($\text{tg } \delta \approx 10^{-8} - 10^{-7}$). Хотя в газах имеет место дипольно-релаксационная поляризация, она не вызывает релаксационные потери ввиду малой плотности газа.

В газообразных диэлектриках $\text{tg } \delta$ не зависит от температуры и частоты приложенного напряжения.

Зависимость $\text{tg } \delta = f(U)$ для твердого диэлектрика с газовыми включениями называется «кривой ионизации» (рис. 2.28).

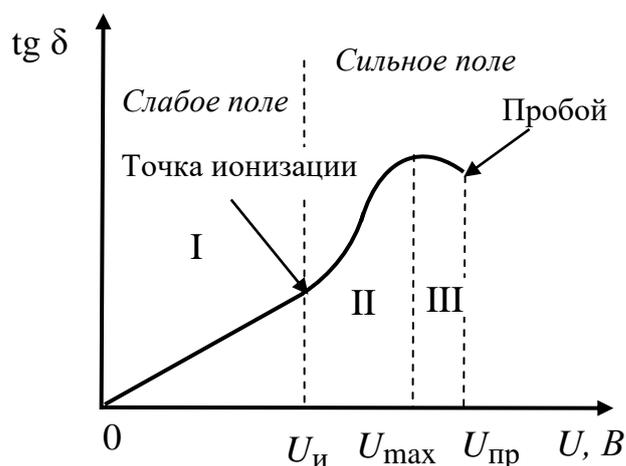


Рис. 2.28. Кривая ионизации для твердого диэлектрика с газовыми включениями:

$U_{и}$ — напряжение ионизации, $U_{пр}$ — напряжение пробоя [2]

На участке I потери обусловлены электропроводностью в твердом диэлектрике и газовых включениях. Здесь справедлив Закон Ома. При увеличении напряжения возрастает скорость движения зарядов

(ионов и электронов) $v_i = E\alpha_i$, плотность тока $j = \sum n_i q_i v_i = (\sum n_i q_i a_i)E$ и $I_{ск}$ (см. векторную диаграмму токов). Увеличение $I_{ск}$ приводит к повышению $\text{tg } \delta$.

В «точке ионизации» при напряжении $U_{и}$ начинается процесс ионизации газовых включений, который сопровождается их пробоем с образованием так называемых «частичных разрядов».

На участке II потери обусловлены электропроводностью в твердом диэлектрике и ионизацией газовых включений.

При повышении напряжения от $U_{и}$ до U_{max} интенсифицируется процесс ионизации газа, увеличивается количество носителей зарядов n_i и их подвижность a_i , плотность тока j и $I_{ск}$. Рост $I_{ск}$ приводит к резкому повышению $\text{tg } \delta$. При возрастании U в процесс ионизации вовлекается все большее количество пор диэлектрика – сначала крупные, затем более мелкие. При U_{max} все газовые включения оказываются ионизированными и $\text{tg } \delta$ достигает максимального значения.

Потери на ионизацию определяются по выражению:

$$P_{и} = Af(U - U_{и})^3, \quad (2.53)$$

где A – коэффициент, зависящий от размера и формы газовых пор, плотности газа и его диэлектрической проницаемости, f – частота приложенного напряжения, U – рабочее напряжение, $U_{и}$ – напряжение ионизации.

На участке III при увеличении напряжения $\text{tg } \delta$ уменьшается, так как все газовые поры ионизированы. Затрат энергии на ионизацию новых газовых включений не требуется, потери обусловлены электропроводностью.

При $U = U_{пр}$ происходит пробой диэлектрика.

2.4.7. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

Неполярные жидкие диэлектрики

В неполярных жидкостях (трансформаторное масло, бензин, бензол и др.) имеют место потери на электропроводность за счет диссоциации ионогенных примесей ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$).

Зависимости $\text{tg } \delta(T)$ и $\text{tg } \delta(f)$ для неполярных диэлектриков приведены на рис. 2.29.

С ростом температуры ослабляются связи в молекулах примесей и повышается степень их диссоциации, также ослабляются связи между молекулами диэлектрика (уменьшается вязкость). В результате увеличиваются концентрация ионов n , их подвижность a и, следовательно, в соответствии с формулой $j = \sigma E = (\sum n_i q_i a_i) E$, увеличивается $I_{ск}$. В соответствии с векторной диаграммой токов (рис. 2.27) это приводит к повышению δ и $\text{tg } \delta$.

Зависимость $\text{tg } \delta(T)$ имеет вид:

$$\text{tg } \delta = A \exp(\alpha T), \quad (2.54)$$

где A и α – постоянные, зависящие от природы вещества.

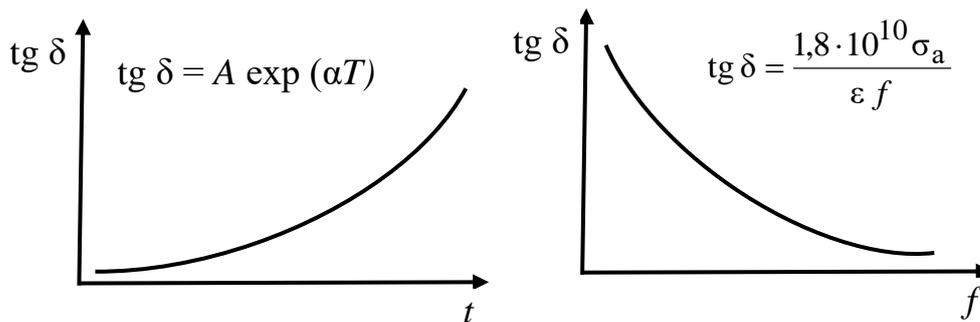


Рис. 2.29. Зависимости $\text{tg } \delta(t)$ и $\text{tg } \delta(f)$ для жидких неполярных диэлектриков

С увеличением частоты напряжения f возрастает I_c в соответствии с выражением:

$$I_c = \frac{U}{X_c} = \omega C U = 2\pi f C U, \quad (2.55)$$

что приводит, как следует из векторной диаграммы токов (рис. 2.27), к уменьшению δ и $\text{tg } \delta$.

Зависимость $\text{tg } \delta(f)$ также может быть получена из выражения (2.51) в виде:

$$\text{tg } \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \sigma_a}{\epsilon f}. \quad (2.56)$$

Полярные жидкие диэлектрики

В полярных жидкостях (метиловый и этиловый спирты, хлордифенилы и др.) имеют место потери на электропроводность и релаксационные потери, обусловленные дипольно-релаксационной поляризацией ($\text{tg } \delta \approx 10^{-3} - 10^{-2}$).

Зависимости $\text{tg } \delta$ и вязкости жидкости η от температуры T приведены на рис. 2.30.

На участках I и IV имеют место только потери на электропроводность, обусловленные дрейфом примесных и собственных ионов. Здесь зависимость $\text{tg } \delta(T)$ такая же, как для неполярных диэлектриков.

На участках II и III наблюдаются потери на электропроводность и дипольно-релаксационные потери, которые приводят к появлению релаксационного максимума.

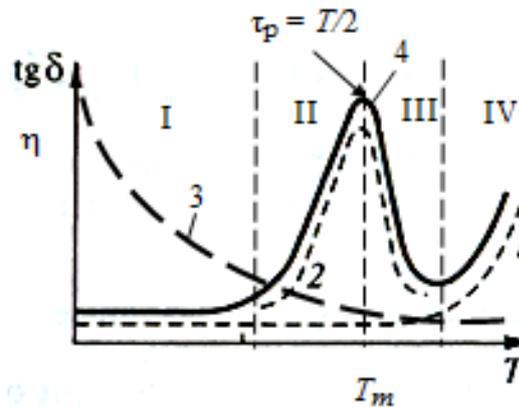


Рис. 2.30. Зависимость $\text{tg } \delta$ и вязкости жидкости η от температуры T для полярных жидких диэлектриков:

- 1 – потери на электропроводность, 2 – релаксационные потери,
3 – вязкость жидкости η , 4 – суммарные потери [2]

На участке II при увеличении температуры до T_m $\text{tg } \delta$ возрастает, так как повышаются релаксационные потери в результате ослабления межмолекулярных связей, снижения вязкости жидкости и роста угла поворота диполей под действием электрического поля.

На участке III при нагревании диэлектрика увеличивается интенсивность теплового хаотического движения молекул, что препятствует их ориентации под действием электрического поля. В результате угол поворота полярных молекул под действием электрического поля уменьшается, что приводит к снижению релаксационных потерь и $\text{tg } \delta$.

При $T = T_m$ время релаксации молекул равно полупериоду приложенного напряжения: $\tau_p = T/2$. При повышении частоты напряжения τ_p становится больше $T/2$ ($\tau_p > T/2$). Для восстановления равновесия $\tau_p = T/2$ необходимо уменьшить вязкость жидкости путем увеличения температуры.

Следовательно, при возрастании частоты напряжения, максимум зависимости $\operatorname{tg} \delta(T)$ будет смещаться в сторону более высокой температуры.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты напряжения f приведена на рис. 2.31.

На участке I имеют место только потери на электропроводность. Уменьшение $\operatorname{tg} \delta$ при увеличении f связано с повышением емкостного тока. Под действием переменного электрического поля молекулы непрерывно поворачиваются на максимально возможный угол, но релаксационные потери отсутствуют ввиду малой частоты электрического поля.

На участках II и III наблюдаются потери на электропроводность и дипольно-релаксационные потери, которые приводят к появлению релаксационного максимума.

На участке II выполняется условие $\tau_p < T/2$. Происходит максимальная ориентация молекул в направлении переменного электрического поля. При увеличении частоты напряжения до f_m релаксационные потери и $\operatorname{tg} \delta$ возрастают до максимального значения в результате повышения частоты колебаний молекул диэлектрика.

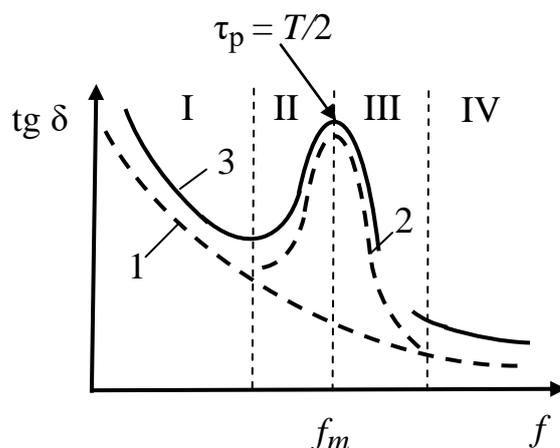


Рис. 2.31. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты напряжения f для полярных жидких диэлектриков: 1 – потери на электропроводность, 2 – релаксационные потери, 3 – суммарные потери [2]

На участке III выполняется условие $\tau_p > T/2$. Полярные молекулы диэлектрика не успевают следовать за изменением частоты поля. В результате угол поворота полярных молекул под действием электрического поля уменьшается, что приводит к снижению релаксационных потерь и $\operatorname{tg} \delta$.

На участке IV $\tau_p \gg T/2$. Здесь частота поля настолько велика, что ориентация молекул под действием электрического поля полностью прекращается. Релаксационные потери отсутствуют, имеют место только потери на электропроводность; $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается ввиду увеличения I_c .

При $T = T_m$ $\tau_p = T/2$. При увеличении температуры τ_p становится больше $T/2$ ($\tau_p > T/2$) за счет ослабления межмолекулярных связей и уменьшения вязкости жидкости. Для восстановления равновесия $\tau_p = T/2$ необходимо увеличить частоту напряжения. Следовательно, при повышении температуры максимум зависимости $\text{tg } \delta(f)$ будет смещаться в сторону более высокой частоты.

2.4.8. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках

Диэлектрики молекулярного строения неполярные (парафин и др.)

Диэлектрические потери небольшие ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$), имеют место только потери на электропроводность. Зависимости $\text{tg } \delta(T)$ и $\text{tg } \delta(f)$ аналогичны зависимостям для неполярных жидких диэлектриков.

Диэлектрики молекулярного строения полярные (канифоль и др.) и неполярные (полиэтилен, полистирол, полипропилен и др.)

Имеют место потери на электропроводность и релаксационные потери. Релаксационные потери в диэлектриках молекулярного строения обусловлены дипольно-релаксационной поляризацией, а в неполярных полимерах – дипольно-сегментальной поляризацией выше температуры стеклования. Зависимости $\text{tg } \delta(T)$ и $\text{tg } \delta(f)$ аналогичны зависимостям для полярных жидких диэлектриков.

Полярные полимеры (полиэтилентерефталат, поливинилхлорид, Фторопласт-3, полиимиды и др.)

Возникают потери на электропроводность и релаксационные. Зависимости $\text{tg } \delta(T)$ и $\text{tg } \delta(f)$ аналогичны зависимостям для полярных жидких диэлектриков (рис. 2.30 и 2.31), но имеют два максимума. Первый (ниже T_c) обусловлен дипольно-групповой поляризацией, второй (выше T_c) – дипольно-сегментальной поляризацией (рис. 2.32).

Диэлектрики ионной структуры с плотной упаковкой кристаллической решетки ионами (кварцевое стекло и др.)

Диэлектрические потери небольшие ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$) и обусловлены электропроводностью. При повышении температуры потери незначительно возрастают, так как повышается ток сквозной проводимости ввиду увеличения степени диссоциации ионогенных примесей и материала диэлектрика (см. рис. 2.33, кривая II).

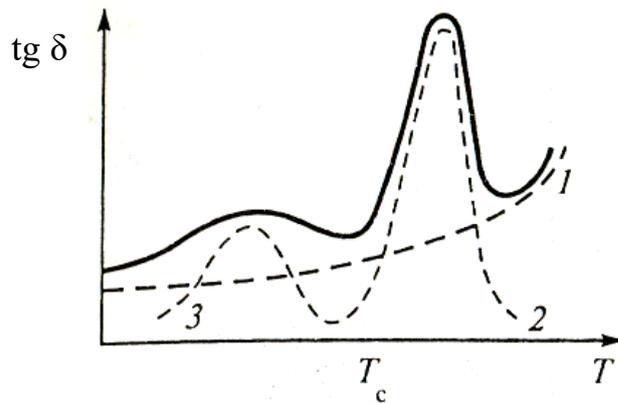


Рис. 2.32. Зависимость $\text{tg } \delta$ полярных полимеров от температуры:
 1 – потери на электропроводность, 2 – дипольно-сегментальные потери,
 3 – дипольно-групповые потери; 4 – суммарные потери [2]

Диэлектрики ионной структуры аморфные и с неплотной упаковкой кристаллической решетки ионами (неорганическое щелочное стекло, электротехническая керамика, асбест и др.)

Возникают потери на электропроводность и релаксационные потери, обусловленные ионно-релаксационной поляризацией (см. рис. 2.33, кривая I). Потери в этих диэлектриках выше, чем в диэлектриках кристаллических с плотной упаковкой решетки ионами ($\text{tg } \delta \approx 10^{-2}$) и сильно зависят от температуры: при нагревании $\text{tg } \delta$ существенно возрастает.

Сегнетоэлектрики

В сегнетоэлектриках возникают потери на электропроводность и релаксационные потери ниже температуры Кюри, обусловленные спонтанной поляризацией (рис. 2.34).

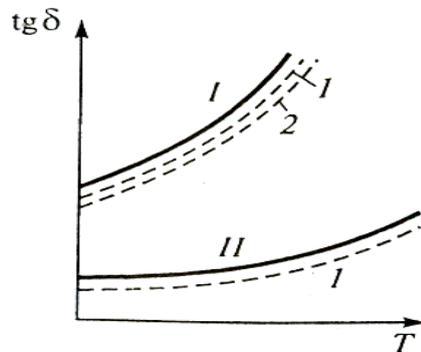


Рис. 2.33. Зависимости $\text{tg } \delta$ от температуры диэлектриков ионного строения аморфных или кристаллических с неплотной (I) и с плотной (II) упаковкой решетки:
 1 – потери, обусловленные током проводимости; 2 – потери, обусловленные ионно-релаксационной поляризацией [2]

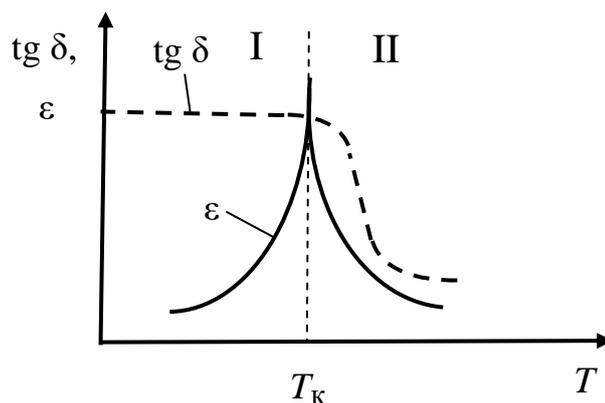


Рис. 2.34. Зависимости $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ от температуры для сегнетоэлектриков

На участке I при $T < T_k$ диэлектрические потери обусловлены электропроводностью и спонтанной поляризацией, $\operatorname{tg} \delta$ имеет высокое значение и не зависит от температуры. При $T > T_k$ вследствие интенсивного теплового движения ионов или молекул вещества доменная структура разрушается, вещество становится обычным линейным диэлектриком и $\operatorname{tg} \delta$ резко уменьшается. Диэлектрические потери здесь обусловлены, главным образом, электропроводностью.

Диэлектрики неоднородной структуры

К ним относятся слоистые диэлектрики (текстолит, гетинакс, стеклотекстолит) и диэлектрики – статистические смеси различных компонентов (керамика, слюдяные материалы, трансформаторная бумага и др.).

Диэлектрические потери обусловлены свойствами компонентов диэлектрика и их взаимным расположением. Имеют место различные виды потерь – на электропроводность, релаксационные, миграционные, ионизационные и др.

Для двухслойных диэлектриков:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2 \theta_2 + \epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1 \theta_1}{\epsilon_1 \theta_2 + \epsilon_2 \theta_1}, \quad (2.57)$$

где ϵ_1, ϵ_2 – относительные диэлектрические проницаемости, $\operatorname{tg} \delta_1, \operatorname{tg} \delta_2$, – значения тангенса угла диэлектрических потерь; θ_1, θ_2 – объемные доли компонентов, соответственно.

Для диэлектриков–статистических смесей:

$$\operatorname{tg} \delta = \sum_i^n \operatorname{tg} \delta_i \cdot \theta_i. \quad (2.58)$$

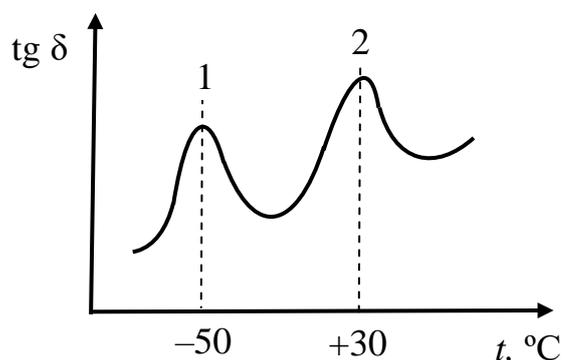


Рис. 2.35. Зависимости $\text{tg } \delta(t)$ для бумаги, пропитанной масляно-канифольным компаундом [8]

Зависимость $\text{tg } \delta(t)$ для неоднородных диэлектриков имеет сложный характер, например с несколькими максимумами (рис. 2.35). Первый максимум обусловлен дипольно-сегментальной поляризацией целлюлозы, второй – дипольно-релаксационной поляризацией в пропитывающем компаунде.

Контрольные вопросы к подглаве 2.4

1. Дайте определение удельным диэлектрическим потерям.
2. Какие виды токов характерны для диэлектриков?
3. Как рассчитываются диэлектрические потери при постоянном и переменном напряжениях?
4. Какие виды диэлектрических потерь Вы знаете?
5. Что такое векторная диаграмма токов в диэлектрике? Как определяются по векторной диаграмме угол диэлектрических потерь δ и $\text{tg } \delta$?
6. Какова специфика диэлектрических потерь в газообразных диэлектриках?
7. Какова специфика диэлектрических потерь в полярных жидких диэлектриках?
8. Чем отличаются зависимости $\epsilon(T)$ для полярных и неполярных полимерных диэлектриков?
9. Чем отличаются зависимости $\text{tg } \delta(T)$ для полярных и неполярных полимерных диэлектриков?

2.5. Электрическая прочность диэлектриков

2.5.1. Характеристики пробоя диэлектриков

При увеличении напряжения, приложенного к диэлектрику (рис. 2.36), при некотором его значении $U_{\text{пр}}$ происходит резкое возрастание тока сквозной проводимости $I_{\text{ск}}$ и резкое уменьшение электрического сопротивления материала до такого значения, при котором происходит короткое замыкание электродов. Диэлектрик утрачивает электроизоляционные свойства.

Явление внезапной потери диэлектриком электроизоляционных свойств под действием приложенного электрического поля называется пробоем.

Пробой диэлектрика характеризуют следующими параметрами.

Напряжение пробоя ($U_{\text{пр}}$) – минимальное напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика.

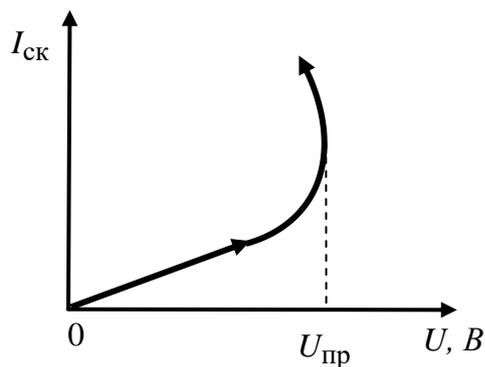


Рис. 2.36. Зависимость тока сквозной проводимости в диэлектрике от напряжения:

$U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя

Электрическая прочность ($E_{\text{пр}}$) – минимальная напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика:

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / h, \text{ В/м}, \quad (2.59)$$

где h – толщина диэлектрика.

Коэффициент запаса электрической прочности:

$$k = U_{\text{пр}} / U_{\text{раб}}, \quad (2.60)$$

где $U_{\text{раб}}$ – рабочее напряжение.

Для надежной работы электрической изоляции должно выполняться условие: $k > 1$.

Пробой твердого диэлектрика по его поверхности называется *перекрытием*. В этом случае происходит пробой газа или жидкости, окружающей твердый диэлектрик (рис. 2.37).

2.5.2. Виды пробоя диэлектриков

Электрический (электронный) пробой

Пробой возникает в результате процесса *электронной ударной ионизации*.

Электронная ударная ионизация заключается в передаче энергии электронов, движущихся с высокой скоростью под действием электрического поля, атомам, ионам или молекулам диэлектрика [2, 4, 8].

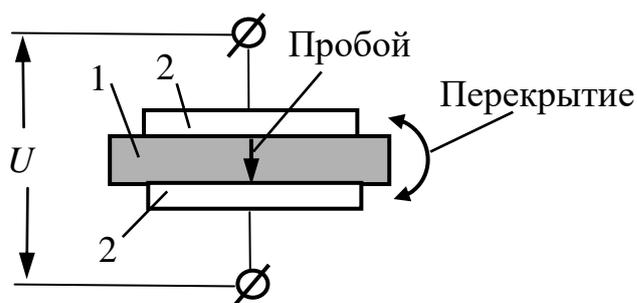


Рис. 2.37. Схема пробоя и перекрытия диэлектрика:
1 – диэлектрик, 2 – электроды

В результате ударной ионизации в диэлектрике между электродами создается сплошной плазменный канал (*стример*) с высокой электропроводностью, состоящий из электронов и положительных ионов. Электрический пробой возникает при следующем условии:

$$W_э = e \lambda E \geq W_{и}, \quad (2.61)$$

где $W_э$ – энергия электрона; e – заряд электрона; λ – средняя длина свободного пробега электрона – расстояние, которое проходит электрон от одного соударения с атомом, ионом или молекулой диэлектрика до другого соударения; $W_{и}$ – энергия ионизации диэлектрика.

Для газов при электрическом пробое $E_{пр} \approx 10^6$ В/м, у жидких диэлектриков – до 10^8 В/м, у твердых диэлектриков – до 10^9 В/м. Увеличение электрической прочности связано с тем, что плотность

твердых и жидких диэлектриков больше плотности газов, длина свободного пробега электронов λ в них поэтому меньше, чем в газах, и для достижения одной и той же энергии электрона W_3 требуется большая напряженность электрического поля E (см. 2.61).

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений.

Электротепловой (тепловой) пробой

Пробой имеет место, если количество тепла, выделяющегося в диэлектрике в результате диэлектрических потерь ($q_{\text{выд}}$), превышает количество тепла, обводимого от элемента диэлектрика в окружающую среду ($q_{\text{отв}}$):

$$q_{\text{выд}} > q_{\text{отв}}. \quad (2.62)$$

В результате диэлектрик нагревается до температур, при которых происходит его проплавление, обугливание или растрескивание.

При постоянном напряжении:

$$q_{\text{выд}} = E^2 / \rho_v, \text{ Вт/м}^3, \quad (2.63)$$

где E – напряженность электрического поля, $E = U/h$, U – напряжение, h – толщина диэлектрика, ρ_v – его удельное объемное сопротивление.

При переменном напряжении:

$$q_{\text{выд}} = \varepsilon \text{tg} \delta f E^2 / 1,8 \cdot 10^{10}, \text{ Вт/м}^3, \quad (2.64)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, δ – угол диэлектрических потерь, f – частота приложенного напряжения.

Количество тепла, обводимого от элемента диэлектрика:

$$q_{\text{отв}} = k S_{\text{эл}} (T - T_0), \text{ Вт/м}^3, \quad (2.65)$$

где k – коэффициент теплопередачи от системы «диэлектрик – электроды» в окружающую среду;

$$k \approx \eta/h; \quad (2.66)$$

η – коэффициент теплопроводности диэлектрика; S – площадь электрода; T – температура диэлектрика; T_0 – температура окружающей среды.

При тепловом пробое $E_{пр}$ рассчитывают, исходя из условия:

$$q_{\text{выд}} = q_{\text{отв.}} \quad (2.67)$$

С учетом выражений (2.63 и 2.65) для постоянного напряжения получим:

$$E_{\text{пр}} \approx \sqrt{\frac{\eta \rho_v S_{\text{эл}} (T - T_0)}{h}}, \quad (2.68)$$

а для переменного напряжения, учитывая уравнения (2.64 и 2.65):

$$E_{\text{пр}} \approx \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^{10} \eta S_{\text{эл}} (T - T_0)}{\varepsilon \text{tg} \delta f h}}. \quad (2.69)$$

Электрохимический пробой (электрическое старение)

Пробой включает предпробойный период, когда происходит медленное изменение химического состава и строения диэлектрика под действием электрического поля, сопровождающееся уменьшением его электрического сопротивления. При снижении сопротивления до критического уровня происходит собственно пробой по тепловому или электрическому механизму. *Время жизни диэлектрика* – период времени от начала эксплуатации диэлектрика до его пробоя в результате электрохимического старения. Время жизни диэлектрика уменьшается при увеличении напряженности электрического поля и температуры.

Ионизационный пробой

Этот вид является разновидностью электрического пробоя. Возникает в результате ионизации и пробоя газовых пор в твердом или жидком диэлектрике (*частичных разрядов*). В результате частичных разрядов в пористом твердом диэлектрике из воздуха, содержащегося в порах, образуются сильные окислители – озон и оксиды азота, которые химически разрушают его. Электроны и ионы, бомбардируя стенки пор, вызывают их растрескивание. Нагрев диэлектрика под действием частичных разрядов вызывает его термическое разрушение.

Электромеханический пробой

Наблюдается, например, в двухжильных проводах с полимерной изоляцией выше температуры стеклования полимера. Под действием сил электростатического притяжения, возникающих между металлическими проводниками, происходят механическое сдавливание диэлектрика, уменьшение его толщины и пробой по электрическому или тепловому механизму.

2.5.3. Электрическая прочность газообразных диэлектриков

Механизм пробоя

Пробой газообразных диэлектриков имеет электрический характер и включает следующие стадии (рис. 2.38) [8]:

1. Фотоионизация катода.

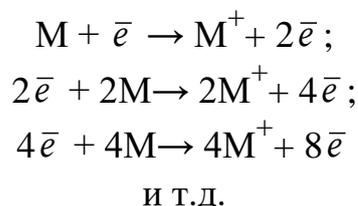
Под действием внешнего ионизатора (световое излучение, температура и др.) инициируется процесс *фотоэмиссии* электронов из металла катода (Me) с образованием в диэлектрике первичных свободных электронов (\bar{e}):



где $h\nu$ – энергия фотона, h – постоянная Планка, ν – частота колебаний.

2. Образование первичных электронных лавин.

Первичные электроны ускоряются электрическим полем до скорости 10^6 м/с и вызывают ударную ионизацию нейтральных атомов или молекул (M) газа, сопровождающуюся образованием первичных электронных лавин:



Электронная лавина имеет форму конуса с вершиной, направленной в сторону катода, и состоит положительных ионов газа (для воздуха это O_2^+ , N_2^+ , NO^+ и др.) и электронов.

3. Образование вторичных электронных лавин.

Вторичные электронные лавины образуются по механизму внутренней фотонной ионизации. Некоторые электроны при столкновении

с нейтральными молекулами (M) «прилипают» к ним и передают им энергию. Возникают возбужденные молекулы (M^*). Эти молекулы излучают квант электромагнитной энергии (фотон), который, распространяясь со скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/с), ионизирует газ впереди первичной лавины и создает вторичные лавины:

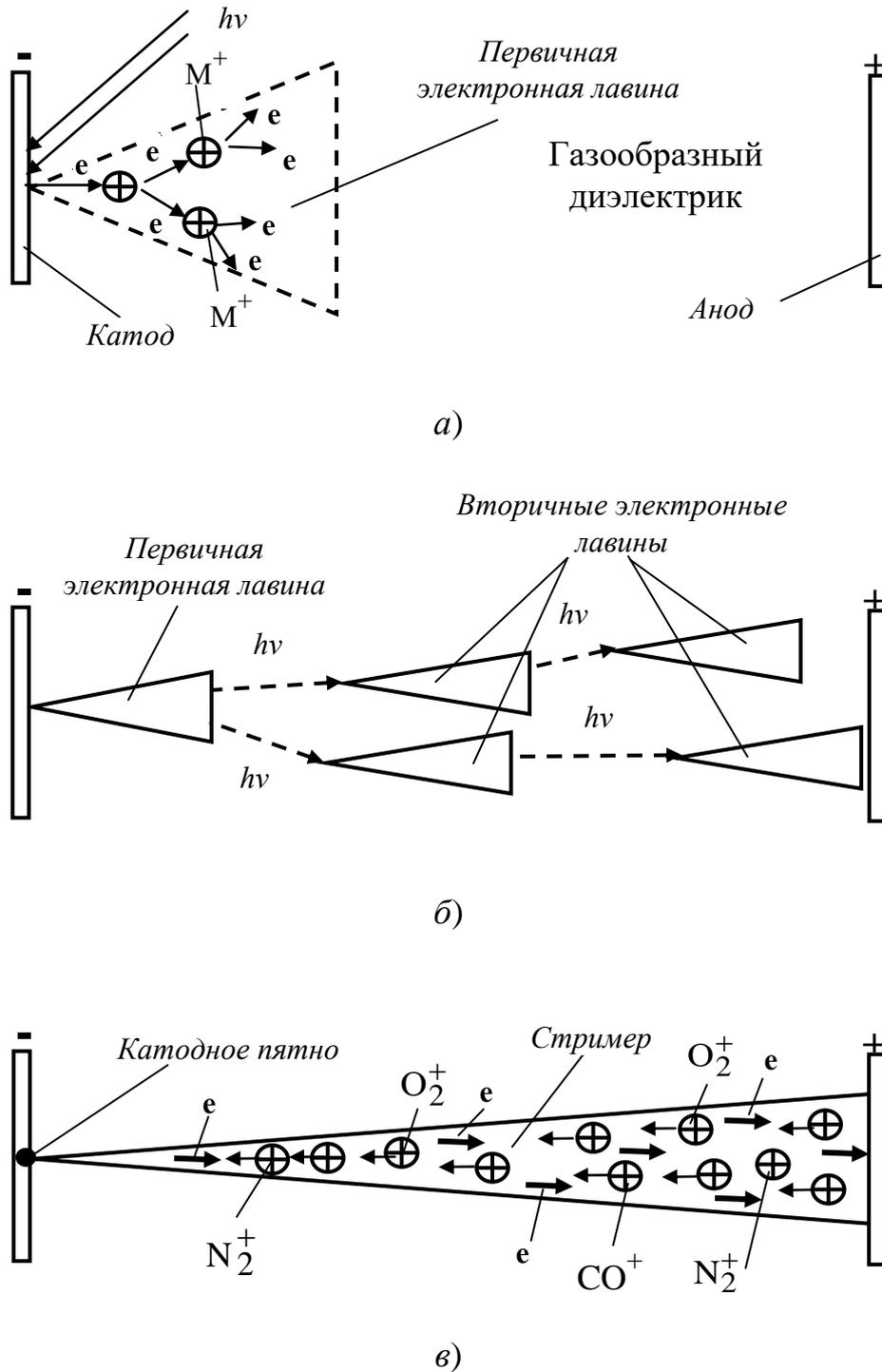
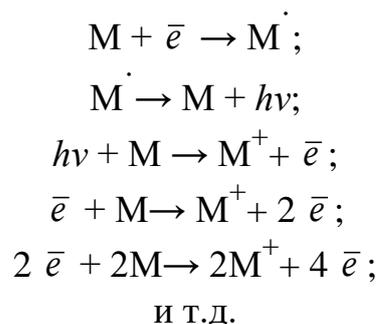


Рис. 2.38. Механизм пробоя газообразных диэлектриков:
 а – фотоионизация катода и образование первичной электронной лавины;
 б – возникновение вторичных электронных лавин; в – появление стримера



4. Слияние электронных лавин и образование стримера.

Стример – токопроводящий канал между анодом и катодом, состоящий, главным образом, из положительных ионов газа.

5. Пробой газа.

Положительные ионы бомбардируют катод и создают в нем высокотемпературное «катодное пятно», излучающее электроны. Последние устремляются к аноду. Этот процесс наблюдается в межэлектродном пространстве как *искра*, а при большой мощности источника напряжения в виде непрерывного *дугового разряда*.

Зависимость $E_{\text{пр}}$ газообразных диэлектриков от различных факторов

Зависимость $E_{\text{пр}}$ от давления показана на рис. 2.39.

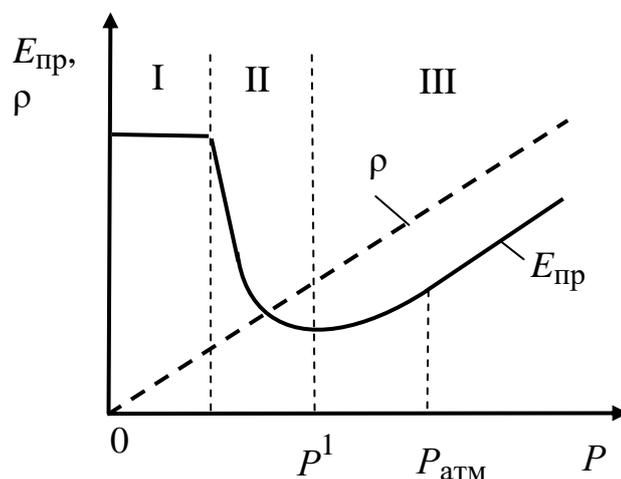


Рис. 2.39. Зависимость $E_{\text{пр}}$ и плотности ρ газообразного диэлектрика от давления [2, 8]

Участок I – глубокий вакуум; имеет очень высокую электрическую прочность ввиду отсутствия молекул и атомов для ионизации. Пробой обусловлен явлением «холодной эмиссии» электронов – «вырыванием» их из металлического катода под действием электрического поля.

Участок II – при увеличении давления возрастают плотность газа и вероятность образования электронных лавин, поэтому $E_{\text{пр}}$ уменьшается.

Участок III – при увеличении P повышается плотность газа и уменьшается длина свободного пробега электронов λ . Следовательно, в соответствии с выражением (2.61), здесь для достижения электроном энергии ионизации газа $W_{\text{и}}$ требуется большая напряженность электрического поля E и поэтому $E_{\text{пр}}$ возрастает. Газы под высоким давлением применяются в качестве изоляции в кабелях и конденсаторах высокого напряжения.

Зависимость $E_{\text{пр}}$ от частоты напряжения показана на рис. 2.40.

Участок I – до $f = 10^4$ Гц $E_{\text{пр}}$ не зависит от частоты напряжения, здесь время перемещения электронов и ионов к электродам меньше полупериода приложенного напряжения ($T/2$), т. е. все заряды достигают электродов.

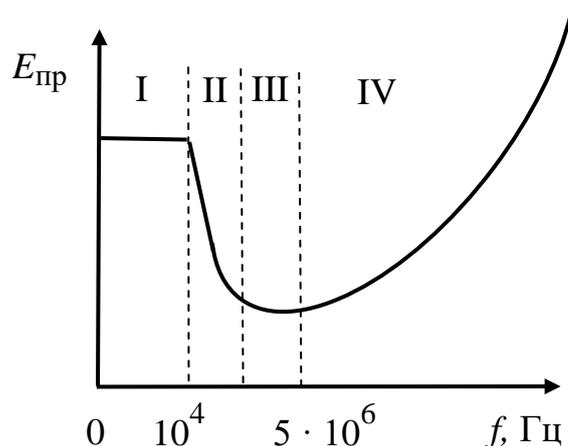


Рис. 2.40. Зависимость $E_{\text{пр}}$ газообразного диэлектрика от частоты напряжения [2, 8]

Участок II – при увеличении f за время $T/2$ ионы не успевают достигать электродов, создаются положительные объемные заряды, которые повышают локальную E . Следовательно, в соответствии с выражением (2.61), здесь для достижения электроном энергии, равной энергии ионизации газа $W_{\text{и}}$, требуется меньшая λ . Поэтому $E_{\text{пр}}$ уменьшается.

Участок III – при увеличении f за время $T/2$ электроны не успевают достигать электродов, создаются отрицательные объемные заряды, которые повышают локальную E .

Участок IV – при увеличении f время формирования электронных лавин становится больше $T/2$, уменьшается вероятность образования стримера. Поэтому $E_{\text{пр}}$ увеличивается.

Зависимость $E_{\text{пр}}$ от расстояния между электродами h и влажности газа

Уменьшение h приводит к снижению λ , и, следовательно, в соответствии с выражением (2.61), для достижения электроном энергии ионизации газа $W_{\text{и}}$ требуется большая напряженность электрического поля E . Поэтому $E_{\text{пр}}$ увеличивается (рис. 2.4.6).

Вода имеет низкую энергию ионизации, следовательно, при росте влажности газа его энергия ионизации будет уменьшаться, и она может быть достигнута при меньшей E . Следовательно, $E_{\text{пр}}$ газа при повышении влажности будет уменьшаться.

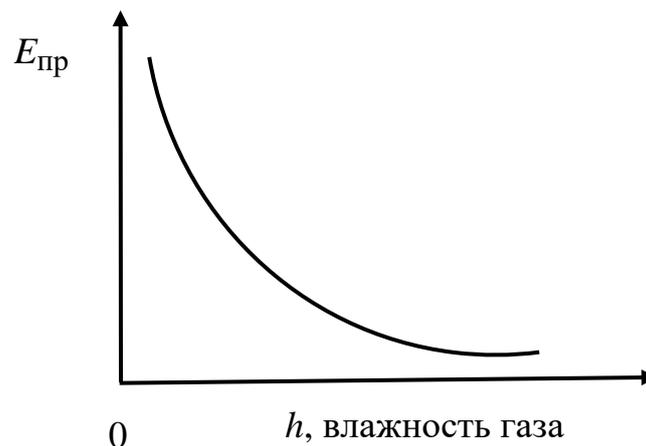


Рис. 2.41. Зависимость $E_{\text{пр}}$ газообразного диэлектрика от расстояния между электродами h и влажности газа

Закон Пашена

Закон устанавливает следующее: для каждого газа существует минимальное значение пробивного напряжения $U_{\text{пр min}}$ в зависимости от произведения давления P на расстояние между электродами h [2, 6, 8] (рис. 2.42). Приведенные на рис. 2.4.7 данные справедливы для неионизированного газа в однородном электрическом поле при частоте 50 Гц.

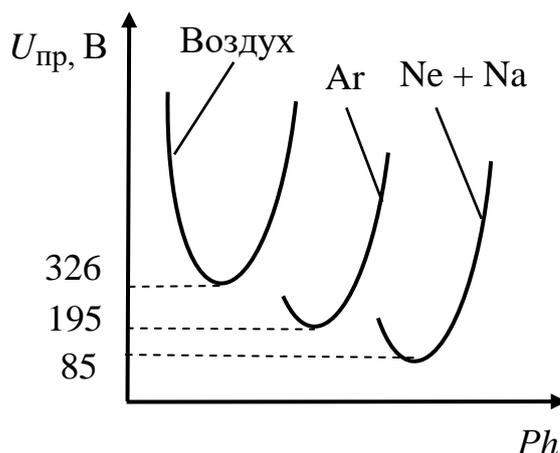


Рис. 2.42. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ газов от произведения давления P на расстояние между электродами h

Для снижения пробивного напряжения газоразрядных приборов их заполняют инертными газами (Ne, Xe и др.), а электроды изготавливают из материалов с присадкой щелочных металлов (Na, K и др.), имеющих малую работу выхода электрона.

Пробой газа в неоднородном электрическом поле

Неоднородное электрическое поле возникает между электродами «плоскость – игла», коаксиальными цилиндрами, сферическими поверхностями, если расстояние между ними более диаметра сфер, а также между неизолированными проводами линий электропередач (рис. 2.43).

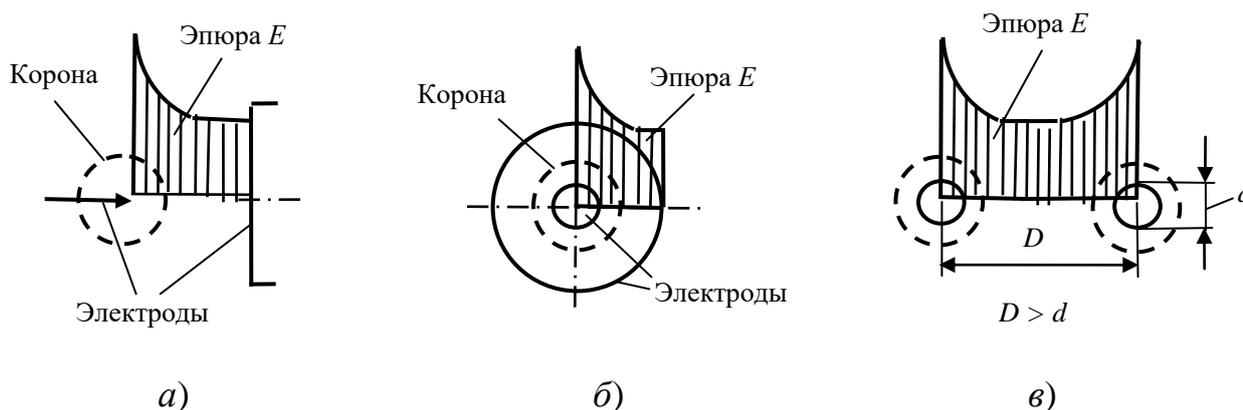


Рис. 2.43. Неоднородное электрическое поле между электродами:
 а – «плоскость – игла», б – коаксиальные цилиндры, в – сферические поверхности

В неоднородном поле электрическая прочность диэлектриков ниже, чем в однородном, так как его средняя напряженность оказывается выше номинальной. В области повышенной E возникает *неполный пробой* в виде

коронного разряда, который представляет собой область ионизированного газа со слабым свечением и характерным шипением. При возрастании напряжения или увеличении влажности газа коронный разряд переходит в искровой или дуговой.

2.5.4. Электрическая прочность жидких диэлектриков

Зависимость электрической прочности жидких диэлектриков от времени выдержки под напряжением τ приведена на рис. 2.44 [8].

Участок I – электрический пробой.

Электрический пробой жидких диэлектриков реализуется в идеально и технически чистых диэлектриках при $\tau < 10^{-2}$ с, $E_{пр} \approx 10^8$ В/м.

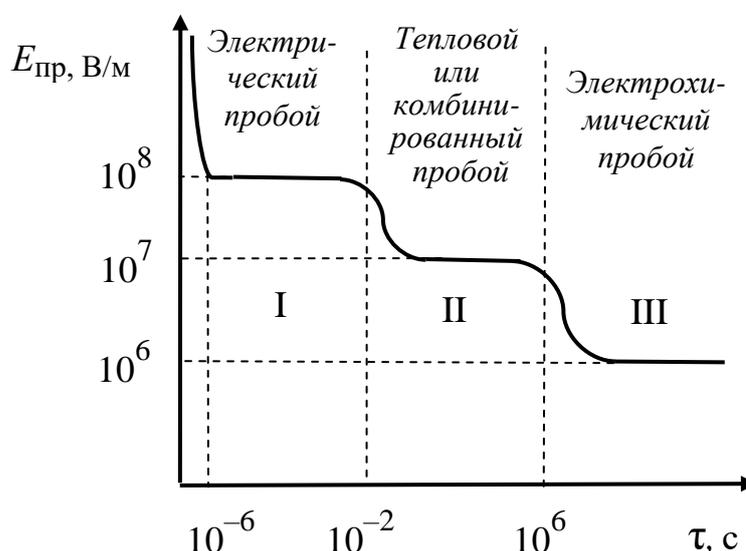


Рис. 2.44. Зависимость электрической прочности жидких диэлектриков от времени выдержки под напряжением τ

Участок II – электротепловой или комбинированный пробой.

Он реализуется в технически чистых жидких диэлектриках при $\tau = 10^{-2} - 10^6$ с, $E_{пр} \approx 10^7$ В/м. Реальные диэлектрики всегда содержат включения газов, эмульгированной воды и твердых веществ, которые попадают в него в результате контакта с окружающей средой, окисления жидкого диэлектрика и твердой изоляции, коррозии металлических частей электрических аппаратов и устройств.

Возможно несколько вариантов пробоя:

1. Комбинированный пробой жидкого диэлектрика с газовыми включениями; он включает следующие этапы:

- ионизационный пробой газовых включений (частичные разряды);
- разогрев и вскипание объемов жидкости, прилегающих к газовым включениям с образованием «газовых пузырей»;
- поляризация и деформация «газовых пузырей» под действием электрического поля («газовые пузыри» приобретают форму эллипсоидов вращения);
- втягивание «газовых пузырей» в межэлектродное пространство и образование сплошного газового канала с низкой электрической прочностью;
- электрический пробой газового канала.

2. *Тепловой пробой жидкого диэлектрика с эмульгированной водой* включает поляризацию капель воды, их деформацию, втягивание капель в межэлектродное пространство, образование сплошного водяного канала с низкой электрической прочностью и тепловой пробой канала;

3. *Тепловой пробой жидкого диэлектрика с твердыми включениями* представляет собой их поляризацию, их втягивание в межэлектродное пространство, образование сплошного канала с низкой электрической прочностью и тепловой пробой канала.

Участок III – электрохимический пробой (электрохимическое старение или вольтаризация жидкости).

Он реализуется в технических жидких диэлектриках при $\tau > 10^6$ с, $E_{пр} \approx 10^6$ В/м. В случае углеводородных диэлектриков, например трансформаторного масла, в предпробойный период происходит медленное увеличение вязкости диэлектрика, что приводит к тепловому пробую. Одновременно происходит разложение трансформаторного масла с образованием газообразного водорода, что ведет к электрическому пробую по рассмотренному выше механизму для жидкости с газообразными включениями.

2.5.5. Электрическая прочность твердых диэлектриков

В зависимости от времени выдержки под напряжением и температуры пробой может носить электрический, тепловой или электрохимический характер [8]. Зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от времени выдержки под напряжением τ приведена на рис. 2.45. Как видно, $E_{пр}$ твердых диэлектриков при различных видах пробоя на порядок выше, чем $E_{пр}$ жидких диэлектриков.

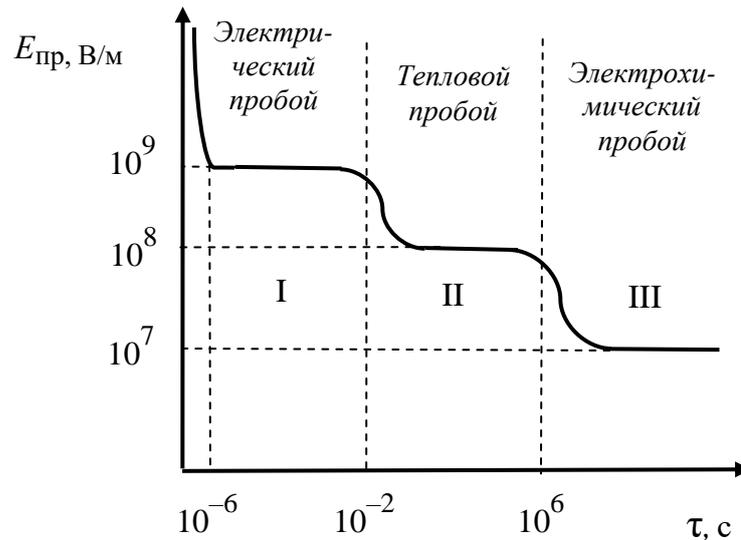


Рис. 2.45. Зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от времени выдержки под напряжением τ

Влияние различных факторов на электрическую прочность твердых диэлектриков

Влияние природы диэлектрика

На величину $E_{\text{пр}}$ твердых диэлектриков влияют их химический состав и строение. При электротепловом пробое $E_{\text{пр}}$ диэлектрика тем ниже, чем больше значения его ϵ и $\text{tg } \delta$ и меньше удельное сопротивление ρ_v (см. формулы 2.68 и 2.69).

Электрическая прочность полимерных диэлектриков снижается в ряду: *неполярные полимеризационные полимеры, полярные полимеризационные полимеры, поликонденсационные полимеры.*

Диэлектрики ионного строения в порядке уменьшения $E_{\text{пр}}$ могут быть расположены в следующей последовательности: *кристаллические с плотной упаковкой ионов, кристаллические с неплотной упаковкой ионов, аморфные.*

Влияние температуры

С увеличением температуры $E_{\text{пр}}$ изменяется с характерным изломом (рис. 2.46). При низкой температуре $E_{\text{пр}}$ не зависит от нее, здесь пробой носит электрический характер. Выше критической температуры $T_{\text{кр}}$ происходит резкое снижение $E_{\text{пр}}$, и отсюда начинается развитие теплового пробоя.

У кристаллизующихся полимеров излом зависимости $E_{\text{пр}} = f(T)$ наблюдается при достижении температуры плавления, у аморфных полимеров – при температуре стеклования, а затем – текучести. Это связано с тем, что выше температур фазовых и физических переходов в полимерах увеличивается тепловыделение, обусловленное релаксационными диэлектрическими потерями, – возрастает интенсивность дипольно-сегментальной и дипольно-групповой поляризации.

Для диэлектриков ионного строения (керамика, стекло и др.) излом на кривой $E_{\text{пр}} = f(T)$ обусловлен увеличением интенсивности ионно-релаксационной поляризации при тепловом расширении вещества.

При повышении температуры окружающей среды T_0 $E_{\text{пр}}$ диэлектрика уменьшается в соответствии с выражениями (2.68) и (2.69).

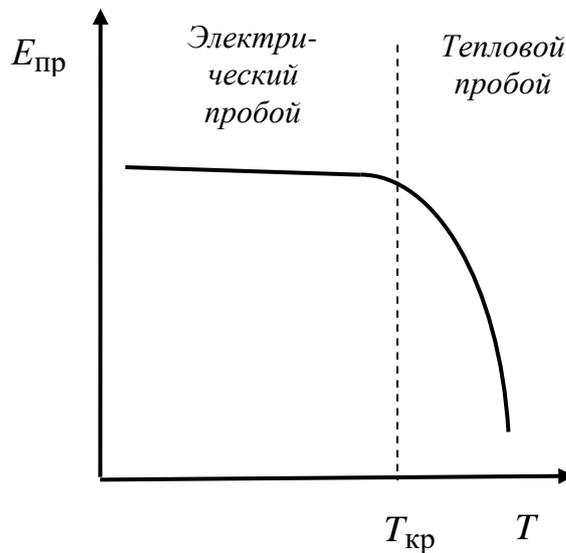


Рис. 2.46. Зависимость электрической прочности $E_{\text{пр}}$ твердых диэлектриков от температуры T [2]

Влияние толщины диэлектрика

С увеличением толщины диэлектрика h его электрическая прочность уменьшается (рис. 2.47).

В случае *электрической формы пробоя* (рис. 2.4.12) при толщине образцов $h \leq 10\text{--}20$ мкм, у неорганических и органических диэлектриков наблюдается *электрическое упрочнение* – резкое возрастание $E_{\text{пр}}$ при уменьшении h . Причиной электрического упрочнения является уменьшение средней длины пробега электрона λ при понижении толщины диэлектрика. При $h > 10\text{--}20$ мкм в однородном поле, в отсутствие разрядов

на поверхности и в порах, а также объемных зарядов, $E_{\text{пр}}$ практически не изменяется с увеличением толщины образца.

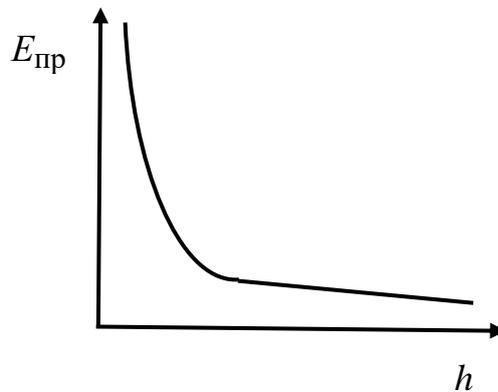


Рис. 2.47. Зависимость электрической прочности $E_{\text{пр}}$ твердых диэлектриков от толщины h [2]

При *электротепловой форме пробоя* $E_{\text{пр}}$ уменьшается при увеличении h , так как с повышением толщины образца снижается коэффициент теплопередачи от системы «диэлектрик – электроды» в окружающую среду в соответствии с выражением (2.66) и количество тепла, отводимого от диэлектрика в соответствии с равенством (2.65.). В результате неравенство (2.62) достигается при меньшей напряженности электрического поля.

Влияние пористости диэлектрика

Наличие в диэлектрике пор, микротрещин, инородных включений, имеющих величину относительной диэлектрической проницаемости ϵ , отличную от ϵ самого диэлектрика, приводит к увеличению в нем неоднородности электрического поля. В результате на его локальных участках возрастает напряженность электрического поля, и пробой наступает при более низком напряжении. Электрическая прочность сильнопористых диэлектриков мало отличается от $E_{\text{пр}}$ воздуха. Поэтому для увеличения $E_{\text{пр}}$ их пропитывают жидкими или воскообразными диэлектриками, электроизоляционными лаками или компаундами.

Влияние площади электродов

Электрическая прочность очень тонких образцов диэлектриков снижается с увеличением площади электродов. Это объясняется тем, что с повышением площади электродов возрастает вероятность попадания под них слабых (дефектных) мест диэлектрика.

Влияние числа слоев изоляции

Электрическая прочность многослойной изоляции имеет экстремальную зависимость от числа слоев (рис. 2.48). Тонкая (несколько микрометров) однослойная изоляция из неоднородного материала (например, бумаги, высыхающих лаков) имеет невысокую $E_{пр}$, если размер неоднородностей (например, пор) соизмерим с толщиной изоляции. При использовании двух–трех слоев изоляции $E_{пр}$ возрастает, так как происходит перекрытие дефектных мест одного слоя другим без дефектов. При дальнейшем увеличении числа слоев изоляции $E_{пр}$ снижается ввиду ухудшения отвода тепла.



Рис. 2.48. Зависимость $E_{пр}$ тонкослойной изоляции от числа слоев [2]

Влияние частоты напряжения

При электрической форме пробоя $E_{пр}$ твердых диэлектриков не зависит от частоты приложенного напряжения. Однако при пробое на импульсах напряжения продолжительностью 10^{-7} с и менее $E_{пр}$ возрастает. Это связано с уменьшением вероятности образования электронных лавин при малом времени приложения напряжения.

В случае электротепловой формы пробоя с увеличением частоты $E_{пр}$ снижается, так как повышается количество выделяемого тепла в результате возрастающих диэлектрических потерь в соответствии с выражением (2.64).

Электрохимический пробой

Пробой обусловлен образованием в диэлектрике газовых, водяных или металлических дендридов [2, 8].

Дендриды – ветвящиеся микроскопические трещины, заполненные газом, водой или металлом.

Газовые дендриды образуются в пористых твердых диэлектриках по следующему механизму. При напряжении больше напряжения ионизации газа возникает пробой газовых пор – так называемые *частичные разряды*. Образовавшиеся при частичных разрядах электроны и ионы бомбардируют стенки пор и разрушают их с появлением микротрещин. Создается заполненный ионизированным газом канал, по которому протекает электрический пробой диэлектрика.

Водные дендриды или водные тринги (water trees) обусловлены расширением воды в порах в результате ее нагрева под действием диэлектрических потерь и разрушения стенок пор.

Металлические дендриды образуются в результате движения к катоду примесных и собственных ионов щелочных металлов диэлектрика. Наблюдаются, например, при постоянном напряжении в неорганических щелочных стеклах в виде тонких токопроводящих нитей металлического натрия. Металлические дендриды также формируются в результате миграции металла анода внутрь диэлектрика и отложения его на катоде. Это свойство особенно характерно для серебра.

Контрольные вопросы к подглаве 2.5

1. Какое явление называется пробоем диэлектрика?
2. Что называется пробивным напряжением $U_{пр}$?
3. Что такое коэффициент запаса электрической прочности?
4. Как вычисляется электрическая прочность диэлектриков $E_{пр}$?
5. Каков механизм электрического пробоя диэлектриков?
6. Какова причина теплового пробоя диэлектриков?
7. В чем заключается электрохимический пробой диэлектриков?
8. В чем заключается ионизационный пробой твердых диэлектриков?
9. Как зависит $E_{пр}$ тонколистовой изоляции от площади электродов и числа слоев?

2.6. Физико-химические и механические свойства диэлектриков

2.6.1. Тепловые свойства диэлектриков

Нагневостойкость материала – его способность без недопустимого ухудшения эксплуатационно-технических характеристик выдерживать кратковременное или длительное (в течение нескольких лет) воздействие высоких температур, а также термоудары [2, 6, 8].

Нагревостойкость твердых диэлектриков оценивают значением *максимальной рабочей температуры*, при которой начинается существенное ухудшение их электрических или механических свойств (уменьшение предела прочности, ударной вязкости, удельного сопротивления, электрической прочности, увеличение ϵ и $\operatorname{tg} \delta$).

Твердые электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах и аппаратах, разделяют на следующие *классы нагревостойкости* (в скобках указана максимальная рабочая температура в °С): *Y* (90), *A* (105), *E* (120), *B* (130), *F* (155), *H* (180), 200, 220, 250, 275.

К классам *Y*, *A* и *E* относятся в основном чисто органические диэлектрики:

– *класс Y* – волокнистые материалы на основе целлюлозы, хлопка, шелка – бумага, картон, ткани и т.п.;

– *класс A* – волокнистые материалы, относящиеся к классу *Y*, но пропитанные лаками или погруженные в масло, а также эфиры целлюлозы, полиамидные смолы (пленки), древесно-слоистые пластики и т.п.;

– *класс E* – пластмассы с органическим наполнителем и термоактивным связующим типа фенолформальдегидной смолы (гетинакс, текстолит), а также эпоксидные смолы без наполнителя.

К другим классам относятся следующие диэлектрики:

– *класс B* – шпательная слюда, асбест, стекловолокно в сочетании с органическими связующими;

– *класс F* – те же материалы, что и в классе *B*, но в качестве связующего использованы органические вещества повышенной нагревостойкости: кремнийорганические, эпоксидные и др.;

– *класс H* – материалы, где в качестве связующего применяется кремнийорганическая смола особо высокой нагревостойкости;

– *классы 200, 220, 250* – неорганические диэлектрики, например, слюда, кварц, асбест, бесщелочные стекла, оксид алюминия, для склеивания или пропитки которых не используют органические вещества. Из органических веществ к этим классам относятся политетрафторэтилен и полиимиды.

При оценке нагревостойкости жидких диэлектриков, а также растворителей, применяемых в производстве электроизоляционных лаков и эмалей, используют следующие характеристики:

– *температура вспышки* – минимальная температура жидкости, при которой смесь ее паров с воздухом воспламеняется от внешнего источника тепла – накаливаемой спирали, электрической искры и т. п.;

– *температура воспламенения* – минимальная температура, при которой происходит воспламенение жидкости от внешнего источника тепла;

– температура самовоспламенения – минимальная температура жидкости, при которой происходит ее самопроизвольное воспламенение.

Для трансформаторного масла температура вспышки должна составлять не менее 135 °С, температура воспламенения – 165 °С, температура самовоспламенения – 350–400 °С.

Холодостойкость – способность материала выдерживать воздействие низких температур (от –70 до +60 °С) без недопустимого ухудшения эксплуатационно-технических характеристик.

При низких температурах электрические свойства изоляции улучшаются, однако ухудшаются механические свойства – материалы становятся хрупкими, легко разрушаются при вибрациях.

Теплопроводность – процесс переноса теплоты от более нагретых частей материала к менее нагретым, приводящий к выравниванию его температуры.

Теплопроводность материалов характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , входящим в уравнение Фурье:

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} dS \cdot dt, \text{ Вт/м} \cdot \text{град}, \quad (2.71)$$

где Q – теплота, переданная через площадку dS за время dt при градиенте температуры dT/dx .

Чем выше λ , тем более стоек диэлектрик к тепловому пробую.

Тепловое расширение – оценивают температурным коэффициентом линейного расширения:

$$TK_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}, \text{ К}^{-1}. \quad (2.72)$$

Чем меньше TK_l тем, как правило, выше нагревостойкость материала (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Нагревостойкость некоторых материалов

Материал	$TK_l \cdot 10^6, \text{ К}^{-1}$	Максимальная рабочая температура, °С
Полиэтилен	100–145	80–90
Политетрафторэтилен	100	270
Силикатное стекло	9,2	800–1000
Фарфор	3,5	1200

Стойкость к термоударам – способность материала выдерживать многократное резкое изменение температуры без недопустимого ухудшения свойств [2, 6, 8].

2.6.2. Механические свойства диэлектриков

В процессе эксплуатации детали из твердых электроизоляционных материалов подвергаются действию различных факторов: статических, динамических и циклических механических нагрузок; воздействиям электромагнитного поля; высоких температур, радиационного облучения, химического действия окружающей среды.

Для надежной работы в указанных условиях материалы должны обладать определенными механическими свойствами: прочностью, пластичностью, ударной вязкостью, твердостью, эластичностью, выносливостью и др. Механические характеристики диэлектриков определяются по стандартизированным методикам [1].

Для жидких диэлектриков важной характеристикой является вязкость. Она определяет интенсивность конвективного теплообмена в электрических аппаратах.

Вязкость (внутреннее трение) – свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению слоев вещества относительно друг друга [2, 8].

Вязкость жидкостей характеризуют следующими параметрами.

Коэффициент динамической вязкости, или коэффициент внутреннего трения, η (Па · с) – это коэффициент пропорциональности в формуле Стокса:

$$f = \eta \frac{dV}{dx} dS, \quad (2.73)$$

где f – сила трения между слоями жидкости площадью dS при градиенте скорости слоев в направлении перпендикулярном вектору скорости dV/dx .

Коэффициент кинематической вязкости:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (2.74)$$

где ρ – плотность жидкости.

2.6.3. Влажностные свойства диэлектриков

Вода является сильнополярным веществом ($\epsilon = 81$) с низким удельным сопротивлением ($\rho_v = 10^3 - 10^4$ Ом · м). Попадание воды в поры диэлектриков ведет к резкому ухудшению их диэлектрических свойств – уменьшаются ρ_v , ρ_s и $E_{пр}$, увеличиваются ϵ и $\text{tg } \delta$.

Для оценки взаимодействия диэлектриков с водой определяют следующие характеристики.

Гигроскопичность – способность материала впитывать влагу из окружающей среды [2, 8].

$$\Gamma = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100, \% \quad (2.75)$$

где m и m_0 – масса воды, содержащаяся в единице объема вещества в условиях испытания при нормальных условиях ($P = 0,1$ МПа, $t = 20$ °С, относительная влажность воздуха – 65 %).

Смачиваемость – способность поверхности материала смачиваться водой или другой жидкостью [2].

Смачиваемость характеризуется краевым углом смачивания θ . Для смачиваемых (гидрофильных) материалов $\theta < 90$ °, для несмачиваемых (гидрофобных) $\theta > 90$ ° (рис. 2.49).

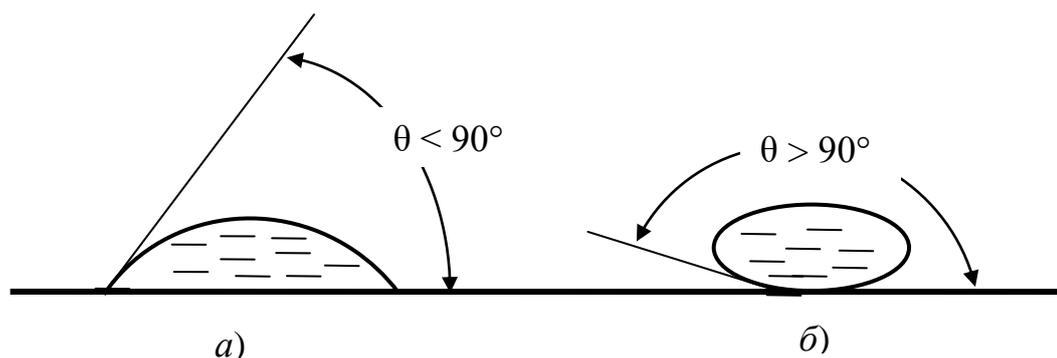


Рис. 2.49. К понятию смачиваемость: *a* – гидрофильный материал, *б* – гидрофобный материал

Влагопроницаемость (Π) – способность материала пропускать через свой объем пары воды.

Влагопроницаемость является коэффициентом пропорциональности в выражении:

$$dm = \Pi \frac{dp}{dx} dS \cdot dt, \quad (2.76)$$

где dm – масса влаги, проходящая за время dt через поверхность материала dS при градиенте давления паров воды dp/dx .

Для уменьшения гигроскопичности и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов (бумага, картон и др.) их пропитывают гидрофобными составами. Для снижения смачиваемости поверхности полярных диэлектриков водой ее покрывают гидрофобными лаками и эмалями.

2.6.4. Химические свойства диэлектриков

Химическая стойкость – способность диэлектрического материала сохранять необходимый уровень электрических и механических свойств в условиях воздействия агрессивных сред (растворы кислот, щелочей, солей; масла, топлива и пр.) в течение времени эксплуатации [2, 8].

Радиационная стойкость – способность диэлектрического материала сохранять необходимый уровень электрических и механических свойств в условиях воздействия радиационного облучения в течение времени эксплуатации [2, 8].

Тропикостойкость – способность диэлектрического материала сохранять необходимый уровень электрических и механических свойств в условиях воздействия тропических факторов ($t = 40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$, высокая влажность, влияние плесневых грибков и представителей тропической фауны) в течение времени эксплуатации [2, 8].

С целью повышения плеснестойкости в состав органической электрической изоляции вводят *фунгициды* – вещества, являющиеся ядами для плесени, задерживающие ее развитие (органические соединения, содержащие азот, хлор, ртуть и др.).

Контрольные вопросы к подглаве 2.6

1. Какие тепловые свойства диэлектриков Вы знаете?
2. Что понимается под нагревостойкостью диэлектрика?
3. Назовите классы нагревостойкости диэлектриков.
4. Какие материалы относятся к классу нагревостойкости *H*?
5. Что такое динамическая, кинематическая и условная вязкость?
6. Как связана вязкость с электропроводностью диэлектриков?
7. Какие влажностные свойства диэлектриков Вы знаете?
8. Какие химические свойства диэлектриков Вы знаете?

2.7. Газообразные диэлектрики

2.7.1. Функции и свойства газообразных диэлектриков

Газообразные диэлектрики в электрических машинах и аппаратах выполняют следующие функции [2, 4, 5, 8]:

- электроизоляционная – отделяют части электрических машин и устройств, находящихся под различными электрическими потенциалами;
- охлаждающая – отводят тепло от обмоток и магнитопроводов электрических машин и аппаратов, выделяющееся в процессе их работы;

– дугогасящая – способствуют гашению электрической дуги в коммутационных аппаратах.

Диэлектрические свойства газообразных диэлектриков:

- малая ϵ , $\epsilon \approx 1$, например для воздуха $\epsilon = 1,00059$;
- высокое удельное сопротивление, для воздуха $\rho_v = 10^{18}$ Ом · м;
- малое значение $\text{tg } \delta$; $\text{tg } \delta = 10^{-8} - 10^{-5}$;
- электрическая прочность на один, два порядка ниже, чем у жидких и твердых диэлектриков; для воздуха $E_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^6$ В/м;
- восстанавливают электрическую прочность после пробоя.

Некоторые свойства газообразных диэлектриков приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Свойства газообразных диэлектриков

Газообразный диэлектрик	Молекулярная масса	$E_{\text{пр}}^{\text{газ}} / E_{\text{пр}}^{\text{возд}}$
Гелий, He	4	0,06
Водород, H ₂	2	0,6
Азот, N ₂	24	1
Воздух (20 % O ₂ , 80 % N ₂)	29	1
Дихлордифторметан (фреон-12, хладон-12), CCl ₂ F ₂	129	2,4
Гексафторид серы (элегаз), SF ₆	146	2,9
Перфторированные углеводороды – газы (CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , C ₄ F ₁₀) и пары (C ₇ F ₁₄ , C ₈ F ₁₆ , C ₁₄ F ₂₄)	160–600	4–10

Из табл. 2.2 видно, что увеличение молекулярной массы газа и содержания в нем электроотрицательных элементов (Cl и F) приводит к повышению электрической прочности диэлектрика. Указанное связано с возрастанием энергии ионизации газа.

2.7.2. Виды газообразных диэлектриков

Инертные газы

Аргон Ar, неон Ne, гелий He, гелий с парами ртути или натрия и другие инертные газы имеют низкую электрическую прочность, применяются в газоразрядных приборах, например в лампах дневного освещения.

Водород

Имеет высокую теплопроводность – на порядок больше, чем у воздуха (λ воздуха – 0,03 Вт/м · град, λ водорода – 0,2 Вт/м · град). Применяется в качестве электроизоляционной и охлаждающей среды в мощных электрических генераторах.

Использование водорода вместо воздуха позволяет улучшить охлаждение электрических машин, уменьшить потери на трение в подшипниковых узлах, замедлить старение электрической изоляции, снизить опасность пожара при коротком замыкании, улучшить работу электрических щеток, увеличить коэффициент полезного действия и мощность электрических машин.

Недостатки водорода: повышенная опасность – H_2 с воздухом при содержании 4–75 % об. образует взрывоопасные («гремучие») смеси. Для повышения безопасности работы внутри аппаратов создают избыточное давление.

Азот

Является нейтральным веществом, не взаимодействует с металлами, твердыми и жидкими диэлектриками. Применяется для заполнения газовых конденсаторов и свободных объемов трансформаторов с целью предотвращения окисления трансформаторного масла кислородом воздуха.

Воздух

Естественный, бесплатный диэлектрик, используется в качестве естественной изолирующей среды в открытых линиях электропередач, открытых распределительных устройствах (ОРУ), воздушных выключателях.

Дихлордифторметан

Достоинство: относительно высокая электрическая прочность.

Недостатки: токсичен, вызывает коррозию металлов и некоторых твердых органических электроизоляционных материалов, экологически опасен – разрушает озоновый слой земной атмосферы.

Элегаз

Достоинства: нетоксичен, не разлагается до температуры 800 °С; при давлениях до 2,0 МПа сохраняет газообразное состояние, при этом имеет высокую электрическую прочность (на уровне жидких диэлектриков) и низкую плотность, что позволяет создавать легкие и компактные электрические устройства и аппараты.

Недостатки: продукты разложения токсичны и химически активны.

Применяется в высоковольтных кабелях, газовых выключателях, коммутационных аппаратах, закрытых распределительных устройствах, трансформаторах при $U > 110$ кВт.

Перфторированные углеводороды

Достоинства: при нормальном давлении их электрическая прочность находится на уровне жидких диэлектриков, при этом они имеют на три порядка меньшую плотность, что позволяет уменьшить массу электрических аппаратов, нетоксичны, имеют высокую нагревостойкость, стойки к электрическому старению.

Недостатки: относительно высокая стоимость.

Применяется в высоковольтных кабелях, газовых выключателях, закрытых распределительных устройствах, малогабаритных трансформаторах.

Контрольные вопросы к подглаве 2.7

1. Назовите основные диэлектрические свойства газообразных диэлектриков.
2. От каких параметров зависит электрическая прочность газообразных диэлектриков?
3. Какие функции выполняют газообразные диэлектрики в электрических машинах и аппаратах?
4. Назовите виды газообразных диэлектриков.
5. Каковы основные свойства элегаза?

2.8. Жидкие диэлектрики

2.8.1. Функции и свойства жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики в электрических машинах и аппаратах выполняют следующие функции [2, 4, 5, 8]:

– *электроизоляционная* – пропитывают твердую пористую изоляцию в трансформаторах, кабелях и конденсаторах, увеличивая ее электрическую прочность; заполняют пустоты между витками обмоток электрических аппаратов, повышая электрическую прочность межвитковой изоляции;

– *охлаждающая* – отводят тепло от обмоток и магнитопроводов электрических аппаратов, выделяющееся в процессе их работы;

– *дугогасящая* – способствуют гашению электрической дуги в жидкостных коммутационных аппаратах.

Диэлектрические свойства жидких диэлектриков:

– $\varepsilon = 2-6$;

– $\rho_v = 10^{11}-10^{15}$ Ом · м;

– $\operatorname{tg}\delta = 10^{-4}-10^{-2}$;

– $E_{\text{пр}} = (2-5) \cdot 10^7$ В/м;

– восстанавливают электрическую прочность после пробоя.

Свойства некоторых жидких диэлектриков приведены в табл. 2.3.

2.8.2. Нефтяные электроизоляционные масла

Трансформаторное масло

Трансформаторное масло (ТМ) – очищенная фракция нефти (соляровое масло) с температурой кипения 300–400 °С.

Технологический процесс производства ТМ включает:

– фракционную перегонку нефти под вакуумом с получением бензина, лигроина, керосина, солярового масла, мазута, гудрона и других фракций;

– рафинирование солярового масла (очистка от нафтеновых кислот, смол, сернистых соединений, ненасыщенных соединений) путем обработки серной кислотой в количестве 12–15 % от массы данного масла; нейтрализация остаточных кислот щелочью (NaOH);

– промывку водой и сушку продувкой воздухом;

– адсорбционную очистку селикагелем или цеолитом от смол и кислот.

Состав ТМ:

– парафины (C_nH_{2n+2}) – 10–15 %;

– нафтены (циклопарафины – C_nH_{2n}) – 60–70 %, например, C_3H_6 ;

– ароматические углеводороды (бензол, нафталин, антрацен и др.) – 1–2 %;

– асфальтосмолистые вещества, сернистые и азотистые соединения – < 2 %;

– антиокислительные присадки (антиоксиданты), например, «ионол» – 0,2–0,5 %.

Физико-химические свойства:

ТМ – слабополярный диэлектрик, имеет низкие значения ε и $\operatorname{tg}\delta$, высокие значения ρ_v и $E_{\text{пр}}$, биоразлагаемый, нетоксичный, не разрушает озоновый слой атмосферы, плотность – 0,8–0,9 г/см³, вязкость в 1,5 раза выше вязкости воды.

Таблица 2.3

Свойства жидких диэлектриков

Диэлектрик	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$	$\rho_V, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	$E_{\text{пр}}, \text{ В/м}$	$t_{\text{всп}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Температура застывания, $^\circ\text{C}$	Относительная стоимость
1. Нефтяные масла							
Трансформаторное масло	2,1–2,4	$3 \cdot 10^{-3}$ (20 $^\circ\text{C}$) $2 \cdot 10^{-2}$ (90 $^\circ\text{C}$) $2 \cdot 10^{-1}$ (грязное)	10^{13} (20 $^\circ\text{C}$) $5 \cdot 10^{10}$ (90 $^\circ\text{C}$)	$2,8 \cdot 10^7$	135	–45÷–35 (для южных районов) –60÷–70 (для арктических сортов)	1
2. Синтетические трудногорючие и негорючие жидкости							
Полихлордифенилы	3–6	$(1,5–3,0) \cdot 10^{-2}$ (20 $^\circ\text{C}$)	$10^9–10^{12}$ (20 $^\circ\text{C}$)	$2 \cdot 10^7$	Не горючи	+5 (совол) –30 (совтол) –60 (гептол)	4–10
Кремнийорганические жидкости	2,5–3,5	$(2,0–3,0) \cdot 10^{-4}$ (20 $^\circ\text{C}$)	$10^{11}–10^{12}$ (20 $^\circ\text{C}$)	$(1,4–1,8) \cdot 10^7$	300	< –60	80–370
Фторорганические жидкости	1,8–2,0	$(1,0–2,0) \cdot 10^{-4}$	$10^{12}–10^{15}$	до $5 \cdot 10^7$	Не горючи		до 1150
3. Диэлектрические жидкости растительного происхождения							
Касторовое масло	3,5–4,5	10^{-2} (20 $^\circ\text{C}$) 0,2–0,8 (90 $^\circ\text{C}$)	$10^8–10^{10}$ (20 $^\circ\text{C}$)	$(1,5–2,0) \cdot 10^7$		–10÷–18	10

Достоинства: высокий комплекс диэлектрических и физико-механических свойств, низкая стоимость.

Недостатки: повышенная пожароопасность ввиду низкой температуры вспышки ($t_{всп} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$).

Через год эксплуатации ТМ подвергают *очистке* от воды и механических примесей путем отстоя, центрифугирования или фильтрования. Через 4–5 лет эксплуатации ТМ подвергают *регенерации* путем обработки кислотами, щелочами и абсорбентами.

Способы продления срока службы:

- герметизация или заполнение электротехнического оборудования инертными газами, например азотом, с целью исключения окисления ТМ кислородом воздуха;
- циркуляция ТМ через термосифонные фильтры;
- введение в состав ТМ антиоксидантов.

Конденсаторные масла

Применяют для пропитки бумажной изоляции конденсаторов. Изготавливают из ТМ путем глубокой очистки. Имеют меньшие по сравнению с ТМ диэлектрические потери ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$).

Кабельные масла

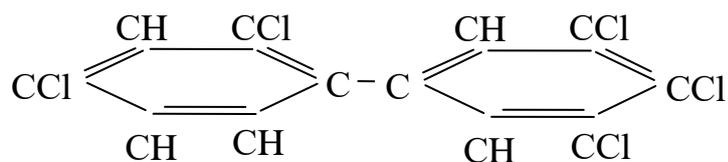
Применяют для пропитки бумажной изоляции электрических кабелей. По сравнению с ТМ имеют более высокие значения вязкости и $t_{всп}$ и меньший $\text{tg } \delta$.

2.8.3. Синтетические трудногорючие и негорючие жидкости

Хлордифенилы

В электроэнергетике применяют следующие хлордифенилы:

- «совол» – пентахлордифенил $\text{C}_{12}\text{H}_5\text{Cl}_5$:



- «совтол-10» – раствор совола в трихлорбензоле $\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_3$ (10 %);
- «гексол» – 20 % совола + 80 % гексахлорбутадиена C_4Cl_6 .

Физико-химические свойства:

Хлордифенилы – полярные диэлектрики; по сравнению с ТМ имеют более низкие диэлектрические характеристики.

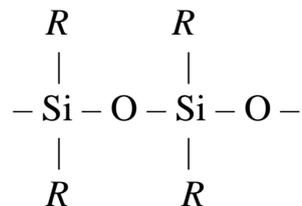
Достоинства: негорючесть.

Недостатки: токсичны, разрушает озоновый слой атмосферы, в 4–10 раз дороже ТМ.

Применяются в трансформаторах, эксплуатируемых в пожаро- и взрывоопасных производствах (шахты, химические, нефтеперерабатывающие и нефтехимические заводы, заводы по производству взрывчатых веществ, порохов, ракетных топлив).

Кремнийорганические жидкости (силиконы, силоксаны)

Имеют следующее строение:



здесь R – углеводородный радикал, например, CH_3 , C_2H_5 и др.

Диэлектрические свойства: неполярные диэлектрики; имеют значения ϵ , $\text{tg } \delta$, ρ_v и $E_{\text{пр}}$ на уровне ТМ.

Достоинства: нетоксичны, экологически безопасны, имеют высокую температуру вспышки ($t_{\text{всп}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$).

Недостатки: пожароопасны, высокая стоимость (до 400 раз дороже ТМ).

Перфторорганические жидкости

Образуются при замещении в углеводородах всех атомов углерода на атомы фтора, например: C_5F_{12} , C_6F_{14} , $C_{14}F_{28}$ и др.

Диэлектрические свойства: неполярные диэлектрики; по сравнению с трансформаторным маслом имеют меньшие значения ϵ и $\text{tg } \delta$ и большие значения ρ_v и $E_{\text{пр}}$.

Достоинства: негорючесть, высокая термическая стабильность (не разлагаются до $t = 400 \text{ }^\circ\text{C}$), высокая инертность к металлам, твердым диэлектрикам, резинам; нетоксичность, отсутствие запаха, высокий коэффициент объемного расширения, что позволяет в 3–4 раза увеличить скорость отвода тепла от обмоток и магнитопроводов трансформаторов; экологическая безопасность.

Недостатки: высокая стоимость (до 1150 раз дороже трансформаторного масла).

Применяются в трансформаторах и блоках радиоэлектронной аппаратуры, работающих при высоких температурах.

2.8.4. Диэлектрические жидкости растительного происхождения

Касторовое масло

Получают из семян клещевины.

Достоинства: не растворяются в бензине, не вызывают набухания резины. *Недостатки:* в 10 раз дороже трансформаторного масла, низкие диэлектрические свойства. *Применяются* для пропитки бумажной изоляции конденсаторов, работающих в импульсных условиях.

Контрольные вопросы к подглаве 2.8

1. Назовите основные диэлектрические свойства жидких диэлектриков.
2. От каких параметров зависит электрическая прочность жидких диэлектриков?
3. Какие функции выполняют жидкие диэлектрики в электрических машинах и аппаратах?
4. Назовите виды жидких диэлектриков.
5. Каковы основные свойства трансформаторного масла?

2.9. Твердые диэлектрики

2.9.1. Полимеры

В зависимости от диэлектрических свойств полимерные диэлектрики могут быть разделены на три большие группы: неполярные полимеризационные, полярные полимеризационные и поликонденсационные полимеры [2] (табл. 2.4, рис. 2.50).

I. Неполярные полимеризационные полимеры

Данные полимеры получают полимеризацией, они являются термопластами. Имеют симметричные в электрическом отношении элементарные звенья. Ниже T_c имеет место только электронная поляризация, выше T_c – электронная и дипольно-сегментальная. Имеют низкие значения ε и $\operatorname{tg} \delta$, высокие значения ρ_v и $E_{пр}$ (табл. 2.4). Являются высокочастотными

диэлектриками. Применяются при высоких (< 800 МГц) и сверхвысоких (> 800 МГц) частотах.

Таблица 2.4

Диэлектрические характеристики полимерных диэлектриков

№ п/п	Полимеры	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$	ρ_v , Ом · м	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм при толщине диэлектрика	
					1 мм	0,1 мм
I	Неполярные полимеризационные (ПЭ, ПС, ПТФЭ и др.)	2,0–2,5	10^{-4}	10^{14} – 10^{18}	60	250
II	Полярные полимеризационные (ПВХ, ПТФХЭ и др.)	3–6	10^{-2}	10^{11} – 10^{14}	40	180
III	Поликонденсационные (ФФС, ЭС, КОС и др.)	4–8	10^{-1} – 10^{-3}	10^9 – 10^{14}	20	80

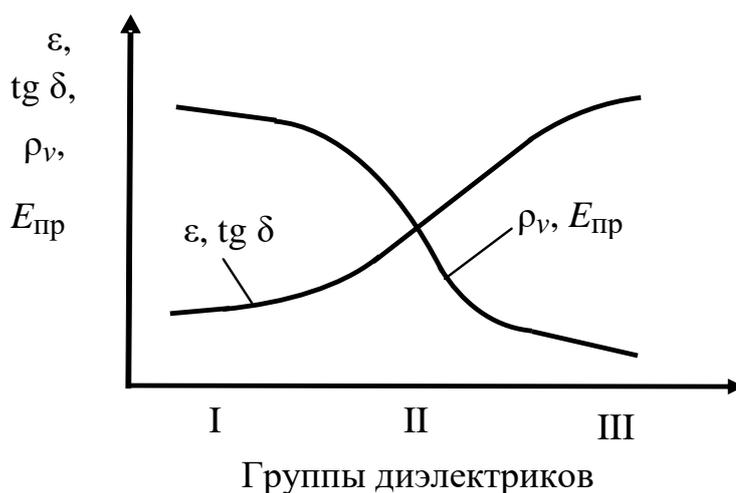
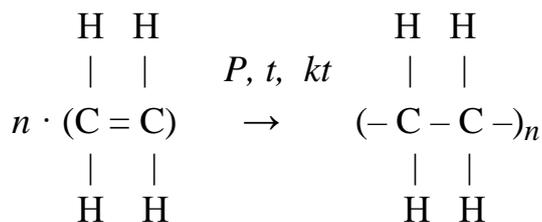


Рис. 2.50. Зависимость характеристик полимерных диэлектриков от строения и способа получения (схема)

Полиэтилен (ПЭ)

Получение:



Этилен (мономер)

Полиэтилен (полимер)

здесь n – степень полимеризации.

Физико-химические свойства [2]: плотность 910–970 кг/м³, температура размягчения $t_{\text{разм}} = 110\text{--}130\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура хрупкости $t_{\text{хр}} = -70\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительное удлинение $\delta = 300\text{--}750\text{ }%$, предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{раст}} = 10\text{--}15\text{ МПа}$, нагревостойкость – 80–90 °С.

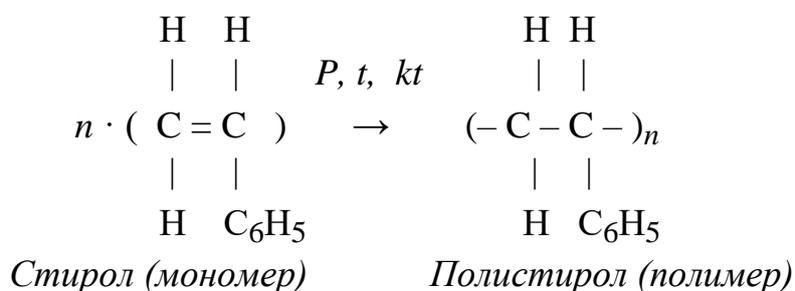
Полиэтилен физиологически безвреден, стоек к действию щелочей, минеральных и органических кислот, растворов солей; при $t > 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ растворяется в углеводородах и их галогенопроизводных.

Применяется для изготовления изоляции проводов и кабелей, в том числе высокочастотных и силовых.

Перерабатывается в изделия методом экструзии.

Полистирол (ПС)

Получение:



Физико-химические свойства [2]: плотность 1005 кг/м³, $\delta = 1\text{--}4\text{ }%$, предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{в}} = 35\text{--}60\text{ МПа}$, нагревостойкость – 70–80 °С.

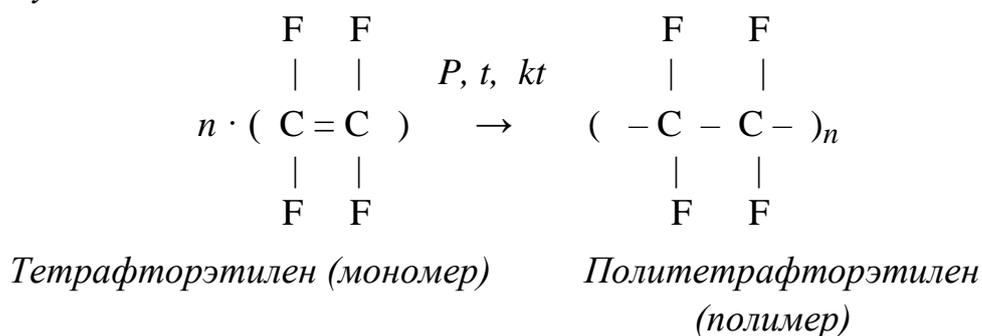
Полистирол физиологически безвреден, химически стоек, растворяется в ароматических и хлорированных углеводородах, этиловом эфире.

Применяется для изготовления деталей электро- и радиооборудования, изоляции высокочастотных кабелей, электротехнических лаков и компаундов; тонкой пленки для конденсаторов (6–200 мкм) – «стирофлекс».

Перерабатывается в изделия методами экструзии и литья под давлением.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4)

Получение:



Физико-химические свойства [2]: белый, жирный на ощупь, степень кристалличности 50–90 %, плотность 2150–2240 кг/м³, $\delta = 250\text{--}300\%$, $\sigma_{\text{в}} = 15\text{--}30$ МПа, при $t > 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинает разлагаться с выделением высокотоксичных газов HF и CO, температура начала интенсивного разложения – 415 °C, температура длительной эксплуатации – от –250 до +269 °C.

Физиологически безвреден, по химической стойкости превосходит платину и золото, не горюч, не растворяется ни в чем, не смачивается водой. *Имеет наиболее высокие диэлектрические характеристики в группе неполярных полимеризационных полимеров.*

Недостатки: ползучесть при относительно низких температурах, низкая устойчивость к действию коронного разряда, сложная технология изготовления изделий (спекание предварительно отформованных из порошка заготовок при $t = 360\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$; склеивание деталей в тлеющем разряде; изготовление тонкой пленки путем резания заготовок с последующим вальцеванием полученной ленты).

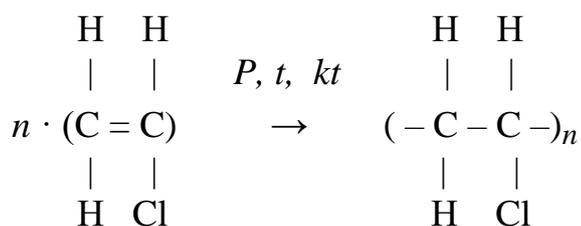
Применяется для изготовления изоляции электротехнических изделий, работающих при низких и высоких температурах, а также в агрессивных средах.

II. Полярные полимеризационные полимеры

Данные полимеры получают полимеризацией, они являются термопластами. Имеют несимметричные в электрическом отношении элементарные звенья. Ниже T_c имеют место электронная и дипольно-групповая виды поляризации, выше T_c – электронная и дипольно-сегментальная. По сравнению с неполярными полимерами имеют более высокие значения ε и $\text{tg } \delta$ и меньшие значения $\rho_{\text{в}}$ и $E_{\text{пр}}$ (табл. 2.4). Являются низкочастотными диэлектриками, применяются при постоянном напряжении или при частотах менее 100 Гц.

Поливинилхлорид (полихлорвинил, ПВХ)

Получение:



Хлористый винил (мономер)

Поливинилхлорид (полимер)

Физико-химические свойства [2]: не горюч, плотность 1350–1360 кг/м³, при $t = 130\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$ начинается медленное, а при $t = 170\text{ }^\circ\text{C}$ интенсивное разложение с выделением токсичного HCl, нагревостойкость – 60–70 °С.

Нерастворим в воде, спирте и бензине, стоек к действию кислот и смазочных масел.

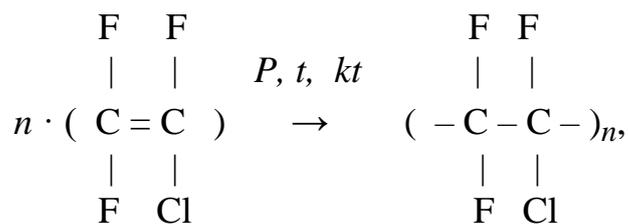
ПВХ используется в двух модификациях:

– *непластифицированный ПВХ* (винипласт), имеет $t_c = 80\text{--}105\text{ }^\circ\text{C}$, в условиях эксплуатации находится в стеклообразном состоянии, применяется для изготовления изоляционных и конструкционных деталей электротехнических устройств;

– *пластифицированный ПВХ* – содержит до 50 % низкомолекулярного пластификатора, имеет $t_c = -40\text{ }^\circ\text{C}$, в условиях эксплуатации находится в высокоэластическом состоянии, широко применяется для изготовления изоляции проводов и кабелей.

Политрифторхлорэтилен (ПТФХЭ, фторопласт-3)

Получение:



Трифторхлорэтилен (мономер) ПТФХЭ (полимер)

Физико-химические свойства [2]: по сравнению с фторопластом-4 имеет меньшую термическую стойкость, при $t > 260\text{ }^\circ\text{C}$ начинает интенсивно разлагаться с выделением хлора, температура длительной эксплуатации – от -195 до $+190\text{ }^\circ\text{C}$, имеет высокую химическую и радиационную стойкость.

Перерабатывается в изделия методом горячего прессования при $t = 220\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$.

Применяется при изготовлении кабельных изделий, конденсаторов, радиотехнических деталей сложной формы.

III. Поликонденсационные полимеры

Могут быть линейными и пространственными, термо- и реактопластами. При поликонденсации выделяются побочные низкомолекулярные продукты, которые не всегда могут быть удалены из полимера. Кроме того, полимеры имеют несимметричное строение элементарных

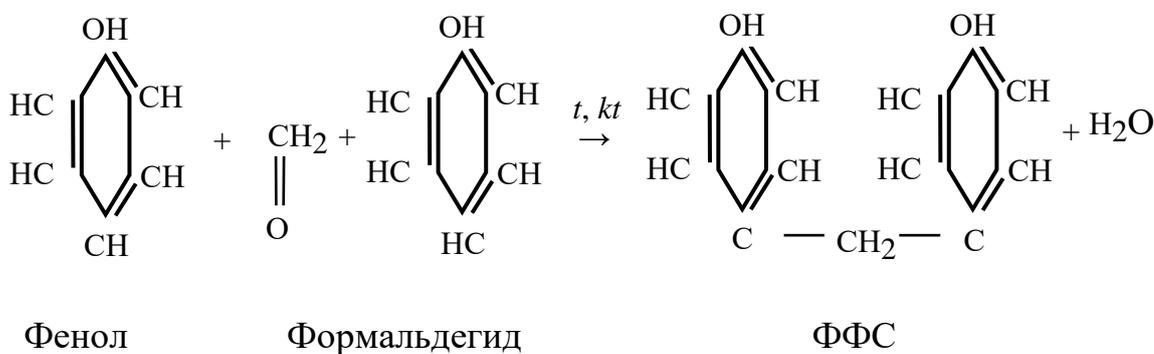
звеньев. Указанные факторы приводят к ухудшению электрических свойств полимеров по сравнению с группами I и II (табл. 2.4): ϵ и $\text{tg } \delta$ увеличиваются, ρ_v и $E_{\text{пр}}$ уменьшаются (рис. 2.50).

Фенолформальдегидные смолы (ФФС)

Различают термопластичные смолы (новолачные) и термореактивные (бакелиты).

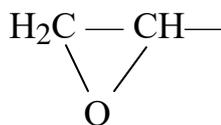
Применение: новолачные – для изготовления электроизоляционных лаков, бакелиты – для изготовления слоистых пластиков (текстолит, гетинакс), электроизоляционных изделий сложной формы (ламповые патроны и др.).

Получение:



Эпоксидные смолы

Характеризуются наличием в молекулах эпоксидных «колец»:



Общие свойства: вязкие, прозрачные жидкости светло-желтого цвета. Под действием отвердителя, например полиэтиленполиамина (ПЭПА), переходят в твердое состояние, становясь термореактивным материалом.

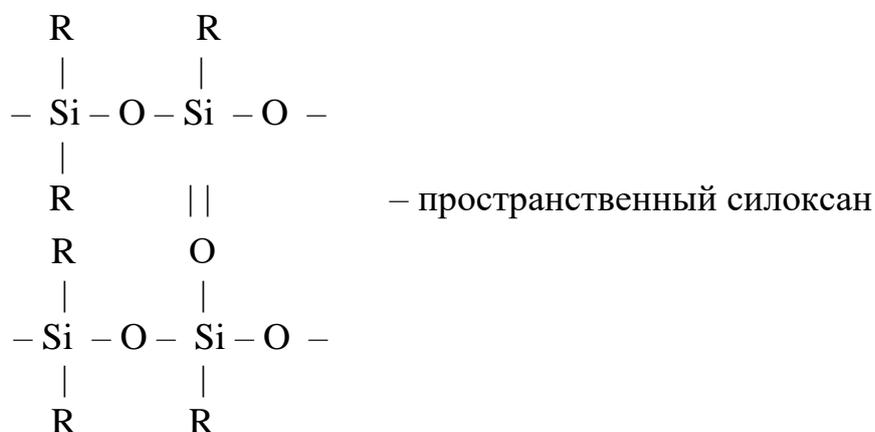
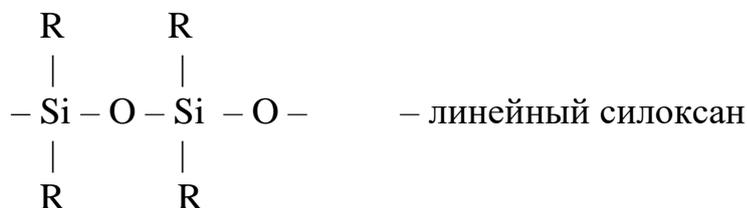
Достоинства: способность отверждаться без давления, при низких и высоких температурах в толстых слоях с малой усадкой (0,5–2 %).

Недостатки: смолы и отвердители токсичны, однако отвержденные смолы не токсичны.

Применение: для изготовления клеев, электроизоляционных лаков, эмалей и компаундов, а также в качестве матрицы в композиционных материалах, используемых в судо-, авиа- и приборостроении.

Кремнийорганические смолы (силоксаны, силиконы)

Строение: представляют собой «силоксановую цепочку», к которой присоединяются органические радикалы R ($-C_6H_5$, $-C_2H_5$, $-CH_3$ и др.). Бывают линейные и пространственные:



Достоинства: высокая химическая стойкость, несмачиваемость водой, высокая нагревостойкость ввиду значительной прочности связи Si–O, температура длительной эксплуатации – 180–220 °С.

Недостатки: низкая механическая прочность, низкая маслостойкость, плохая адгезия к другим материалам, высокая стоимость.

Применение:

- для изготовления силиконовых лаков;
- в качестве связующего в композиционных электротехнических материалах (слодяные материалы, стеклоткани, слоистые пластики);
- для изготовления пропиточных составов обмоток электрических машин влагостойкого исполнения, а также работающих в тропических условиях.

2.9.2. Пластические массы

Пластмассы (ПМ) – многокомпонентные материалы на основе полимеров, предназначены для изготовления изоляционных и конструкционных деталей электрических машин и устройств [2, 4, 6, 8].

ПМ включают следующие компоненты.

1. *Связующее* (70–80 %); в качестве него применяют различные полимеры, которые определяют диэлектрические свойства ПМ.

2. *Наполнители* (до 30 % и более) вводятся в состав ПМ для уменьшения стоимости, увеличения прочности и твердости материала. Используют органические (волокна хлопка, льна, древесной целлюлозы; бумажная крошка) и неорганические вещества (тальк, белая сажа SiO_2 , TiO_2 , ZnO и др.).

3. *Отвердители полимеров и ускорители полимеризации.*

4. *Пластификаторы* – вещества, увеличивающие пластичность массы в процессе ее переработки и уменьшающие хрупкость готовых изделий. Применяют низкомолекулярные вещества – дибутилфталат, трансформаторное масло и др.

5. *Органические красители и минеральные пигменты.*

6. *Стабилизаторы стойкости* – вещества, замедляющие процессы деструкции ПМ под действием света, тепла, кислорода воздуха, ионизирующих излучений и других факторов.

Технологический процесс производства ПМ включает следующие стадии: смешение компонентов, гранулирование или таблетирование массы, формование изделий, окончательные операции (зачистка, удаление литьевых элементов, сворачивание в рулоны или бухты, обрезка листов на требуемый размер и пр.).

Изделия из ПМ получают методами компрессионного (прямого) прессования, литьем под давлением или экструзией. *Экструзия* – процесс непрерывного изготовления готовых изделий или полуфабрикатов из полимерной массы, находящейся в вязкотекучем состоянии, на червячных прессах – экструдерах.

2.9.3. Слоистые пластики

Гетинакс – прессованная бумага, пропитанная термореактивной смолой.

Технологический процесс производства гетинакса включает:

– пропитку бумаги раствором термореактивной смолы (ФФС, ЭД и др.);

– сушку при $t = 100\text{--}140\text{ }^\circ\text{C}$;

– вырезание листов требуемого размера и укладку их в пачки;

– прессование при $t = 150\text{--}160\text{ }^\circ\text{C}$ и $P = 6\text{--}10\text{ МПа}$ с одновременным отверждением смолы;

- охлаждение и извлечение листов из прессы;
- обрезку листов на заданный размер и упаковку.

Электрические свойства: $\varepsilon = 5-6$, $E_{\text{пр}} = 20-40$ кВ/мм (в направлении, перпендикулярном слоям). В продольном направлении $E_{\text{пр}}$ в 5–8 раз меньше, а ρ_v в 50–100 раз меньше, чем поперек слоев.

Текстолит – прессованная ткань, пропитанная терморезактивной смолой. При изготовлении текстолита применяют хлопчатобумажные ткани, стеклоткани и др.

Достоинства текстолита: повышенные прочность и стойкость к истиранию по сравнению с гетинаксом.

Недостатки: цена в 5–6 раз больше стоимости гетинакса.

ДСП (древесно-слоистый пластик) – прессованный древесный шпон, пропитанный и склеенный терморезактивной смолой. Имеет относительно низкие электрические характеристики и высокую гигроскопичность, низкую стоимость.

2.9.4. Электротехнические резины

Резины – материалы, получаемые в процессе вулканизации каучука с различными добавками [2, 4, 6, 8].

Главным ценным качеством резины является высокая эластичность (*способность к значительной упругой деформации*). Относительная упругая деформация резин достигает 1000 % и более, модуль нормальной упругости $E = 1,0-10$ МПа. Для сравнения: у металлов эти характеристики составляют, соответственно, 2,0–60 % и $(2-5) \cdot 10^5$ МПа.

Компоненты резины:

1. *Синтетический или натуральный каучук* – основа резины.

Резины изготавливают на основе неполярных каучуков, которые имеют высокие диэлектрические характеристики: $\varepsilon = 2,5-4,0$; $\text{tg } \delta = 10^{-3}-10^{-2}$ (20 °С); $\rho_v = 10^{13}-10^{20}$ Ом · м, $E_{\text{пр}} = 10-30$ кВ/мм.

Рассмотрим некоторые виды каучуков, применяемых для изготовления электроизоляционных резин.

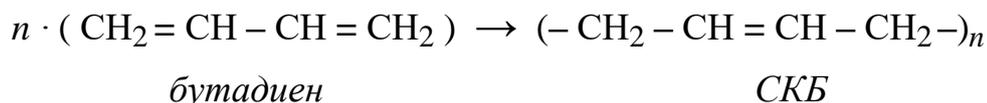
Натуральный каучук (НК). Получают из млечного сока (латекса) растений каучуконосов, например, гивеи. Является полимером изопрена (C_5H_8).

Физико-химические свойства:

– имеет очень высокие диэлектрические свойства: $\varepsilon = 2,5-4,0$; ρ_v – до 10^{20} Ом · м;

– растворяется в бензине, бензоле, хлороформе, имеет высокую эластичность, прочность, водо- и газонепроницаемость, при $t > 80-100^\circ\text{C}$ становится пластичным, при $t > 200^\circ\text{C}$ разлагается, при $t = -70^\circ\text{C}$ делается хрупким.

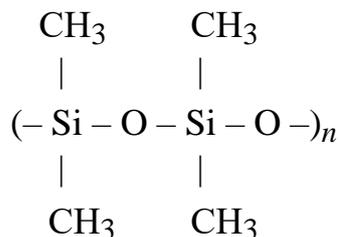
СКБ – синтетический каучук бутадиеновый ($t_{\text{хр}}$ до -45°C):



СКС – синтетический каучук бутадиен-стирольный ($t_{\text{хр}}$ до -77°C), получается при совместной полимеризации бутадиена ($\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH} = \text{CH}_2$) и стирола ($\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_5$).

СКИ – синтетический каучук изопреновый – продукт вулканизации изопрена (C_5H_8), по свойствам близок к НК.

СКТ – синтетический каучук теплостойкий ($t_{\text{экспл}}$ от -60 до $+250^\circ\text{C}$):



Достоинства: хорошие диэлектрические свойства, высокие нагревостойкость, водостойкость, гидрофобность.

Недостатки: повышенная газопроницаемость, низкие механические свойства, малая стойкость к растворителям, высокая стоимость.

Для улучшения свойств каучуков применяют следующие способы:

– введение в основную цепь каучука атомов бора и фосфора, что увеличивает теплостойкость до $350-400^\circ\text{C}$;

– введение фенильной группы (C_6H_5), что повышает морозостойкость до -100°C .

2. *Наполнители.* Вводятся в состав резины для увеличения прочности и твердости, а также для уменьшения стоимости. В качестве наполнителя применяют сажу, белую сажу (SiO_2), тальк, мел, оксиды титана и цинка и другие вещества.

3. *Вулканизирующие вещества (вулканизаторы)* – вещества, способствующие созданию пространственно-сетчатой структуры материала. В качестве вулканизаторов применяют серу, *тиурам*

(органическое соединение серы), селен, перекиси. Сера в электротехнических резинах не используется, так как она интенсивно взаимодействует с медными проводниками с образованием сернистой меди CuS. Для высококачественных электротехнических резин в качестве вулканизатора применяют тиурам, который не взаимодействует с медью.

4. *Пластификаторы (мягчители)* – (10–30 %). Облегчают переработку резиновой смеси в изделия, увеличивают эластичность и морозостойкость резины. Применяют парафин, ДБФ, растительные и минеральные масла, трансформаторное масло.

5. *Ускорители процесса вулканизации.*

6. *Красители* (белые, желтые, зеленые и др.) – защищают резину от воздействия светового излучения.

7. *Противостарители (антиоксиданты)* – замедляют процессы старения резины, которые приводят к ухудшению их эксплуатационных свойств.

Технологический процесс производства резиновых изделий включает следующие стадии:

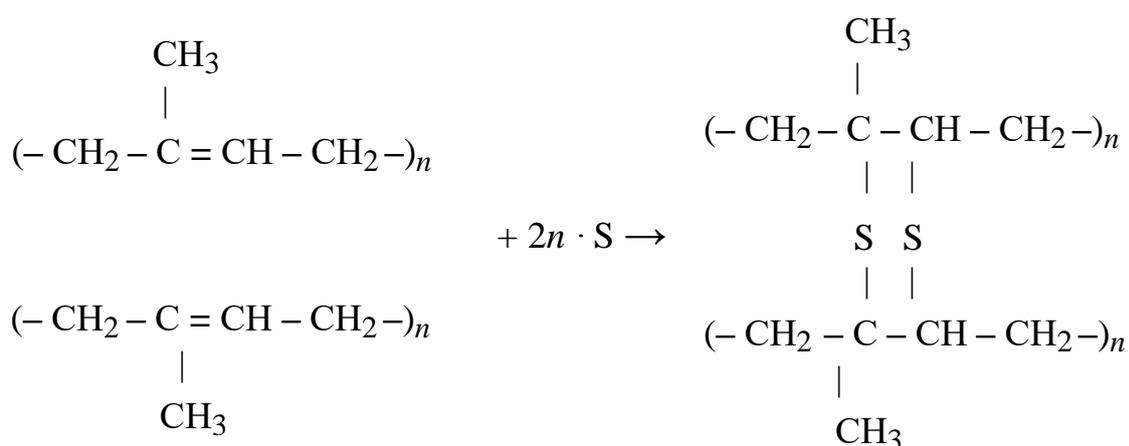
1) *приготовление резиновой смеси* путем смешения компонентов;

2) *формирование изделий* различными технологическими методами (прессование, литье под давлением, экструзия);

3) *вулканизация изделий* при повышенной температуре.

При вулканизации увеличиваются прочность, твердость, износостойкость резины, уменьшаются ее пластичность и растворимость.

Процесс вулканизации натурального каучука протекает по следующей схеме:



В электротехнике и электроэнергетике применяют электроизоляционные, электропроводящие резины и пластмассы на основе каучука – эбонит и эскапон.

Электроизоляционные резины

Электроизоляционные резины применяют для следующих целей:

- в качестве изоляции токоведущих жил проводов и кабелей;
- для изготовления установочных изоляторов (кремнийорганические резины);
- для изготовления средств защиты от поражения электрическим током – защитных перчаток, обуви, ковриков и т.п.

Электрические свойства обычных резин (на основе СКБ, СКТ, СКИ):
 $\varepsilon = 3,0-7,0$; $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2}-10^{-1}$ (20 °С); $\rho_v \approx 10^{13}$ Ом · м, $E_{\text{пр}} = 20-30$ кВ/мм.

Недостатки обычных резин:

- низкая нагревостойкость: для сернистых резин – +55 °С, для тиурамовых – +65 °С; при нагреве резина стареет – становится хрупкой и трескается;
- малая стойкость к действию неполярных растворителей (бензин, бензол и др.);
- малая стойкость к действию ультрафиолетового излучения и озона.

В настоящее время широкое распространение получили *кремний-органические резины*. Они имеют высокие диэлектрические свойства, хорошую нагревостойкость (до 250 °С), водостойки и гидрофобны.

Электропроводящие резины

Применяются для изготовления экранированных проводов, кабелей, эластичных заземляющих шин. В качестве наполнителя в этих резинах используют сажу или графит в количестве 65–70 % от массы резины. Имеют низкое удельное сопротивление – 10^4-10^6 Ом · м.

Эбонит и эскапон

Эбонит – твердый электроизоляционный материал на основе каучука, содержащий 30–35% серы, хорошо обрабатывается резанием, имеет низкое относительное удлинение – 2–6 %. Применяется в качестве электроизоляционного и конструкционного материала.

Эскапон (синтетический каучук Л.Т. Пономарева). Получают из СКБ при нагреве до 200–300 °С без вулканизатора. Вулканизация осуществляется за счет раскрытия двойных связей. Имеет высокие электроизоляционные свойства ($\varepsilon = 2,7-3,0$; $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$). Используется для изготовления электроизоляционных лаков, компаундов, лакотканей.

2.9.5. Керамические диэлектрики

Керамика (κεραμος, греч. – глина) – неорганический материал, получаемый путем спекания измельченных и тщательно перемешанных минералов и оксидов [2, 4, 6, 8].

Строение: керамика – трехфазный материал, включает кристаллическую фазу (хаотически разбросанные по материалу кристаллы), аморфную фазу, скрепляющую (склеивающую) кристаллы и поры (2–25 %).

При увеличении количества аморфной фазы, числа пор и их размера электрические и механические свойства керамических диэлектриков ухудшаются: повышается ϵ за счет роста интенсивности ионно-релаксационной поляризации, возрастает $\operatorname{tg} \delta$ за счет увеличения электропроводности в аморфной фазе, релаксационных, ионизационных и миграционных потерь.

Технологический процесс производства керамических диэлектриков включает следующие стадии: приготовление технологической массы путем очистки компонентов, их измельчения и смешения с водой; формование изделий путем прессования, литья или экструзии; сушку, глазурирование и обжиг при температуре 1300–1400 °С.

Глазурирование – покрытие поверхности керамических диэлектриков глазурью. Глазурь – это стекловидная масса (SiO_2 – 70 %, Al_2O_3 – 30 %, окислы других металлов). Температура плавления глазури меньше температуры обжига. При обжиге глазурь расплавляется, заполняет поверхностные поры и микротрещины и покрывает тонким слоем поверхность изолятора. Глазурь защищает изоляторы от загрязнения и увлажнения. Глазурирование увеличивает ρ_s , ρ_v , $E_{\text{пр}}$ и σ_v изоляторов на 15–20 %.

Низкочастотная установочная керамика (рабочая частота менее $2 \cdot 10^4$ Гц)

Применение: низковольтные и высоковольтные изоляторы (до 1150 кВ переменного напряжения и до 1500 кВ постоянного напряжения); ламповые патроны; детали штепсельных розеток и вилок и пр.

Недостатки: по сравнению с другими видами керамики имеет наиболее низкие электрические и механические свойства.

Достоинства: возможность изготовления деталей сложной формы, недифицитность сырья, низкая стоимость.

К данному виду относятся электротехнический фарфор, высоковольтная стеатитовая и кордиеритовая керамики.

Электротехнический фарфор

Компоненты фарфора: каолиновая глина $[\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot (2-4)\text{H}_2\text{O}]$ – 50 %, кварц SiO_2 – 25 %, полевого шпата $(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2)$ – 25 %.

Готовое изделие имеет следующий состав: SiO_2 – 70 %; Al_2O_3 – 25 %; K_2O , Na_2O , CaO и Fe_2O_3 – 5 %.

Оксиды натрия и других щелочных металлов уменьшает стоимость диэлектрика за счет уменьшения температуры обжига и вязкости фарфоровой массы, но ухудшает его электрические и механические свойства.

Электрические свойства: $\varepsilon = 5-7$; $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-2}$ (20 °С), 0,12–0,15 (100 °С); $E_{\text{пр}} = 25-30$ кВ/мм, $\rho_v = 10^{11}-10^{12}$ Ом · м. Электрические свойства фарфора ухудшаются при увеличении температуры. Срок службы подвесных изоляторов составляет 20–30 лет.

Высоковольтная стеатитовая керамика

Состав: тальк $(3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$ – 70–80 %, глинистые вещества – до 10 %, BaO – до 15 %.

Достоинства: не содержит оксиды щелочных металлов и оксиды железа, поэтому имеет более высокие электрические и механические свойства по сравнению с электротехническим фарфором, например, меньший TK_l .

Недостатки: по сравнению с электротехническим фарфором имеют более высокую температуру обжига и большую стоимость.

Электрические свойства: $\text{tg } \delta = 10^{-3}$, остальные параметры находятся на уровне параметров электротехнического фарфора.

Кордиеритовая керамика

Состав: основной компонент керамики – минерал *кордиерит* $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$.

Достоинства: низкий TK_l , термо- и дугоустойчивость, высокая стойкость к термоударам.

Высокочастотная установочная керамика

(рабочая частота более $2 \cdot 10^4$ Гц)

Применяется: в радиоэлектронике для изготовления различных установочных деталей – каркасов катушек индуктивности, корпусов полупроводниковых приборов, изоляторов и пр.

Электрические свойства: $\operatorname{tg} \delta = 10^{-4} - 10^{-3}$ (20 °С), $\rho_v = 10^{14} - 10^{17}$ Ом · м.

К этому виду керамики относятся:

- стеатитовая (основа – минерал стеатит – $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$);
- форстеритовая (основа – минерал форстерит – $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$);
- цельзиановая (основа – минерал цельзиан – $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$);
- глиноземистая (основа – ультрафарфор – содержит до 65 % Al_2O_3);
- корундовая высокоглиноземистая – содержит до 99,7 % кристаллического корунда $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Конденсаторная керамика

Применяется для изготовления диэлектрических элементов конденсаторов.

Низкочастотная конденсаторная керамика

(рабочая частота менее 10^4 Гц)

Состав: титанаты стронция и висмута – SrTiO_2 и $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ($\varepsilon = 900 - 9800$; $\operatorname{tg} \delta = 10^{-3} - 10^{-2}$ (20 °С); $E_{\text{пр}} = 5 - 15$ кВ/мм).

Высокочастотная конденсаторная керамика

(рабочая частота более 10^4 Гц)

Применяется:

- стронциевая керамика на основе титаната стронция SrTiO_2 ;
- титаноциркониевая керамика $\text{ZrTiO}_3 - \text{TiO}_2$;
- лантановая керамика $\text{LaAl}_2\text{O}_3 - \text{CaTiO}_3$.

Электрические свойства: $\varepsilon = 15 - 250$; $\operatorname{tg} \delta = (3 - 5) \cdot 10^{-4}$ (при 20 °С).

2.9.6. Электротехническое неорганическое стекло

Неорганическое стекло – аморфный термопластичный материал, образующийся в результате переохлаждения расплава оксидов [2, 4, 6, 8].

Стекло – многофазный материал, состоящий из кристаллической, аморфной фаз и газовых пор. Поры могут занимать до 60 % объема стекла.

Классификация стекла по составу

Оксидные стекла содержат в своем составе:

1. *Стеклообразующие оксиды*, которые являются основой стекла.

Стекло, имеющее в основе SiO_2 , называется силикатным, B_2O_3 – боратным, P_2O_5 – фосфатным, GeO_3 – германатным, V_2O_5 – ванадиевым и т.д.

2. *Модифицирующие оксиды* (Li_2O , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 , PbO , BaO , Zr_2O , CaO , MgO и др.), которые придают стеклу различные специфические свойства:

– Li_2O , Na_2O , K_2O – улучшают его технологичность, так как уменьшают температуру его размягчения, снижают стоимость, но ухудшают электрические характеристики: падают ρ_v (в 10^2 – 10^3 раз) и $E_{\text{пр}}$, увеличивается $\text{tg } \delta$;

– Al_2O_3 – повышает химическую стойкость стекла и стойкость к термоударам;

– PbO , BaO – уменьшают $\text{tg } \delta$ до 10^{-4} и увеличивают ϵ до 16 и более.

Галогенидные стекла – это стекла на основе галогенидов металлов, например, фторбериллатные стекла на основе фторида бериллия BeF_2 .

Халькогенидные стекла – стекла на основе халькогенидов, т.е. соединений S, Se и Te с различными химическими элементами, например, стекла на основе As_2Se_3 , As_2S_3 , Te_2S и др.

Свойства стекла

Электропроводность имеет, главным образом, ионный характер, обусловлена присутствием ионов щелочных и щелочноземельных металлов (Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^+), а также ионов F^- и OH^- . Чем больше содержание указанных ионов, тем меньше ρ_v и ρ_s . Халькогенидные и ванадиевые стекла имеют электронную или смешанную проводимость.

Поляризация. В стеклах имеют место электронная, ионная, ионно-релаксационная поляризации; в сегнетоэлектриках – спонтанная поляризация. Минимальные значения ϵ имеют кварцевое ($\epsilon = 2,8$ – $3,7$) и боратное ($\epsilon = 3,1$ – $3,2$) стекла. Оксиды Na_2O , K_2O , Zr_2O , PbO обладают высокой поляризуемостью, увеличивают ϵ до 20 и более.

Диэлектрические потери обусловлены потерями на электропроводность, на неоднородность материала, а также релаксационными и ионизационными. Минимальное значение $\text{tg } \delta$ у кварцевого стекла – $2 \cdot 10^{-4}$; Li_2O , Na_2O , K_2O увеличивают $\text{tg } \delta$.

Электрическая прочность – пробой имеет электрический или тепловой характер. $E_{\text{пр}} = 20\text{--}500$ кВ/мм. Li_2O , Na_2O , K_2O уменьшают $E_{\text{пр}}$. Чем больше пористость, тем меньше электрическая прочность стекла.

Механическая прочность зависит от числа и размера пор. Чем они больше, тем меньше предел прочности и ударная вязкость стекла.

Температура размягчения. Чем меньше температура размягчения стекла, тем ниже его стоимость ввиду уменьшения энергоемкости технологического процесса производства изделий. Температура размягчения зависит от состава стекла. Например, у кварцевого стекла $t_{\text{разм}} = 1740$ °С, для щелочного боратного стекла – 300 °С.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) – характеристика, важная для получения вакуумно плотного и надежного спая стекла с металлами. Для этого необходимо, чтобы ТКЛР стекла был равен ТКЛР металла. Названия стекол – вольфрамовое, молибденовое, титановое, платинитовое и т.д. – указывают, что их ТКЛР близки к ТКЛР данных металлов. Чем меньше ТКЛР стекла, тем выше его стойкость к термоударам.

Типы электротехнических стекол

Изоляторные стекла

Применяются для изготовления изоляторов высоковольтных линий электропередач (ЛЭП), электрофильтров, радиоэлектронных приборов.

Кварцевое стекло. Изготавливают из горного хрусталя или особо чистых кварцевых песков. Обладает наиболее высокими *электрическими характеристиками*: $\varepsilon = 2,8\text{--}3,7$; $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ (20 °С); $\rho_v = 10^{15}$ ом · м, $E_{\text{пр пост}} = 500$ кВ/мм, $E_{\text{пр перем}} = 80$ кВ/мм.

Достоинства: высокие электрические и механические свойства, а также высокая химическая стойкость.

Недостаток: высокая стоимость.

Закаленное щелочное стекло. Содержит оксиды щелочных и щелочноземельных металлов. Закалка изделий включает нагрев выше температуры стеклования и последующее охлаждение в масле или в потоке воздуха. Электрические и механические характеристики и стоимость ниже, чем у кварцевого стекла.

Незакаленное щелочное стекло. Имеет наиболее низкие электрические и механические свойства и малую стоимость. Предел прочности в 3–6 раз, а ударная вязкость в 5–7 раз меньше, чем у закаленного стекла.

Электрoвакуумные стекла

Применяются для изготовления баллонов и ножек осветительных ламп, корпусов электроннолучевых трубок, мониторов и т.п.

Конденсаторные стекла

Используются для изготовления диэлектрических элементов конденсаторов.

Стеклоэмали

Стеклоэмали – стекловидные покрытия, наносимые на поверхности металлических и керамических изделий с целью создания электрической изоляции, защиты от коррозии и воздействия влаги, придания определенной окраски, улучшения внешнего вида.

Стекловолокно

Стекловолокно – стеклянные волокна диаметром 3–30 мкм. Применяется для изоляции монтажных и обмоточных проводов, для изготовления стеклотканей и оптоволоконных кабелей. Оптоволоконные кабели имеют диаметр 5–6 мм и состоят из 10^3 – 10^4 стеклянных волокон диаметром 20–30 мкм.

Ситаллы (стеклокpисталлы)

Ситаллы – кристаллическое стекло со степенью кристалличности до 95 %.

Образуется при введении в состав стекла высокодисперсных порошков Ag, Au, Cu или Pb, фторидов или фосфатов щелочноземельных металлов, которые выполняют функцию искусственных центров кристаллизации.

Ситаллы имеют следующие свойства:

- электрические характеристики выше, чем у аморфного стекла того же состава;
- высокая термостойкость – до 700–800 °С;
- высокая химическая стойкость (не стойки только в HF);
- твердость и модуль упругости в два раза выше, чем у аморфного стекла;
- предел прочности при изгибе меньше, чем у аморфного стекла.

2.9.7. Электроизоляционные лаки, эмали и компаунды

Электроизоляционные лаки представляют собой коллоидные растворы пленкообразующих веществ, создающие после удаления растворителя пленку, обладающую электроизоляционными свойствами [2, 4, 6, 8].

В качестве пленкообразующих веществ применяют синтетические или природные смолы (глифталевые, бакелитовые, кремнийорганические, шеллак и др.), высыхающие растительные масла (олифа др.), битумы, эфиры целлюлозы.

Растворителями могут служить ароматические углеводороды, спирты, сложные и простые эфиры, скипидар и др.

В состав лака, кроме того, могут входить следующие дополнительные вещества. *Сиккативы* – вещества, ускоряющие процесс высыхания растительных масел и лаков. *Пластификаторы* – вещества, придающие эластичность и ударную прочность лаковой пленке. *Отвердители* – соединения, способствующие отверждению пленки лака. *Инициаторы и ускорители* процесса полимеризации лаковой основы – вещества, ускоряющие процесс образования полимеров.

По назначению и выполняемым функциям электроизоляционные лаки принято подразделять на три основные группы: пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки предназначены для пропитки пористой изоляции (бумажной, тканевой) обмоток электрических аппаратов и машин с целью увеличения электрической прочности, теплопроводности, нагревостойкости, уменьшения гигроскопичности.

Покровные лаки применяют для образования на поверхности изделий гладкой механически прочной и влагостойкой пленки.

Клеящие лаки служат для склеивания листов твердых диэлектриков, диэлектриков и металлов и пр.

Электроизоляционные эмали представляют собой лаки, в составе которых имеются пигменты – высокодисперсные неорганические вещества, повышающие твердость и механическую прочность лаковой пленки, теплопроводность, дугостойкость.

В качестве пигментов часто применяют двуокись титана, железный сурик и др.

Электроизоляционные компаунды – это пропиточные и заливочные составы, состоящие из компонентов, входящих в состав лаковой основы электроизоляционных лаков, но не содержащие растворителей.

В момент применения при нормальной и повышенной температурах компаунды находятся в жидком состоянии и твердеют при охлаждении или в результате происходящих в них химических процессов.

В состав компаунда могут также входить наполнители – неорганические и органические, порошкообразные или волокнистые, применяемые для уменьшения усадки, улучшения теплопроводности, снижения температурного коэффициента расширения и стоимости. В качестве наполнителей используют пылевидный кварц, тальк, слюдяную пыль, асбестовое и стеклянное волокна и ряд других.

По химическому составу электроизоляционные компаунды делятся на изготавливаемые на основе нефтяных битумов, растительных масел и канифоли, а также синтетических смол. Компаунды на основе синтетических смол изготавливаются из полиэфирных, эпоксидных, эпоксидно-полиэфирных, кремнийорганических и прочих смол и композиций.

Электроизоляционные компаунды делятся на термопластичные и терморезистивные.

В электро- и радиотехнике компаунды применяют для пропитки обмоток электрических машин, трансформаторов и дросселей, заливки радиосхем и приборов, герметизации различных узлов, изготовления литой изоляции и т. п.

2.9.8. Электротехнические бумаги и картоны

Электротехнические бумаги и картоны – листовые или рулонные материалы, получаемые путем химической переработки древесины. Состоят в основном из древесной целлюлозы: $[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$.

Картон отличается от бумаги большей толщиной и твердостью.

Технология производства бумаги и картона состоит из варки щепы и опилок в щелочном растворе с различными добавками. Целлюлозные волокна разделяются, полученная пульпа загущается удалением некоторого количества воды, из нее удаляются посторонние примеси. Затем следует прокатка между валками при повышенных давлении и температуре. Чем больше плотность бумаги и картона, тем выше их механическая и электрическая прочность.

Конденсаторная бумага – наиболее тонкий и высококачественный вид электроизоляционных бумаг. Применяется для изготовления диэлектрика конденсаторов. Плотность конденсаторных бумаг достигает 1600 кг/м^3 , т.е. в 1,6 раза превышает плотность воды. Электрическая прочность бумаги толщиной 10 мкм, пропитанной трансформаторным маслом, составляет до 10^3 МВ/м .

Кабельная бумага используется:

- для изготовления изоляции силовых кабелей и арматуры для них;
- для изготовления изоляции телефонных кабелей (телефонная бумага);
- для экранирования изоляции силовых высоковольтных кабелей (полупроводящая бумага).

Трансформаторная бумага служит в качестве межслоевой изоляции обмоток трансформаторов.

Пропиточная бумага используется в производстве гетинакса.

Намоточная бумага применяется для производства электроизоляционных изделий – цилиндров, трубок и д.

Электротехнический картон используется в качестве диэлектрических дистанцирующих прокладок, шайб, распорок, а также изоляции магнитопроводов, пазовой изоляции вращающихся машин и т. п.

С целью уменьшения гигроскопичности картон пропитывают лаками и компаундами, на его поверхность наносят покровные лаки или эмали.

Электрическая прочность пропитанного трансформаторным маслом картона достигает 40–50 кВ/мм. Поскольку она выше прочности трансформаторного масла (3 кВ/мм), для увеличения электрической прочности трансформаторов в среде масла устанавливают специальные барьеры из картона. *Маслобарьерная изоляция* обычно имеет электрическую прочность $E_{пр} = 30\text{--}40$ кВ/мм. Недостатком картона является высокая гигроскопичность, в результате попадания влаги уменьшаются его механическая и электрическая прочности – в четыре и более раз.

Фибра – материал, изготавливаемый пропиткой тонкой бумаги раствором хлорида цинка с последующим прессованием нескольких слоев. Для повышения электрической прочности фибру пропитывают парафином или воском. Фибра применяется в качестве конструктивно-изоляционного и дугогасящего материала.

2.9.9. Слюдавые материалы

Слюда является основой большой группы слюдяных электроизоляционных материалов и изделий. Слюда – природный минерал сложного состава. В электротехнике используют два вида слюды: *мусковит* $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ и *флогопит* $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. Главные достоинства слюды – большая термостойкость и достаточно высокие электроизоляционные характеристики [2, 4, 6, 8].

Хорошие электроизоляционные характеристики слюды обязаны ее слоистому строению. Слюда можно расщеплять на плоские тонкие пластинки толщиной до субмикронных размеров (более 100 нм). Разрушающие напряжения при отрыве одного слоя от другого составляют примерно 0,1 МПа, тогда как при растяжении вдоль слоя – 200–300 МПа.

Электрические свойства слюды: относительно низкий $\text{tg } \delta$ (более 10^{-2}), высокие удельное сопротивление (более 10^{12} Ом · м), высокая электрическая прочность (более 100 кВ/мм), термостойкость – температура плавления более 1200 °С.

Применяется более 20 видов электротехнических материалов на основе слюды, в том числе миканиты, слюдиниты, слюдопласты, микафоллий, микаленты и др.

Миканиты – листовые или рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков щипаной слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани, которая наклеивается с одной или двух сторон с целью увеличения прочности на разрыв и предотвращения отставания лепестков при изгибе.

В зависимости от области использования различают следующие виды миканитов: *коллекторный миканит* (твердые изоляционные прокладки между коллекторными пластинами в электрических машинах), *прокладочный* (твердые изоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах), *гибкий* (пазовая и межвитковая изоляция), *формовочный* (электроизоляционные изделия фасонного профиля – конусы, манжеты коллекторные и другая продукция, получаемая горячим прессованием), *термоупорный* и др.

Слюдиниты – листовые или рулонные материалы, изготовленные из слюдяной бумаги на основе мусковита. Слюдяная бумага производится на бумагоделательных машинах по технологии, близкой к технологии обычной бумаги. Бумаги, пропитанные лаком или другим связующим, обладают лучшими механическими и электрофизическими характеристиками, чем непропитанные бумаги, но их термостойкость обычно ниже, так как она определяется свойствами связующего. Слюдиниты изготавливают также с подложкой из стеклоткани (*стеклослюдиниты*) или полимерной пленки (*пленкослюдиниты*).

Слюдопласты – листовые материалы, полученные из слюдяной бумаги на основе флогопита и пропитанные связующими. Как и слюдиниты, они также комбинируются с другими материалами. По сравнению со слюдинитами, они обладают худшими электрофизическими характеристиками, но имеют меньшую стоимость.

Слюдиниты и слюдопласты имеют те же разновидности, что и миканиты.

2.9.10. Активные диэлектрики

Диэлектрики, предназначенные для создания функциональных элементов электроники, свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий, относятся к группе *активных диэлектриков* [2, 5, 6].

К ним относятся *сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и пироэлектрики; электрооптические, магнитооптические и акустооптические материалы; диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами, жидкие кристаллы и др.*

Сегнетоэлектрики – вещества, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля.

В настоящее время известно несколько сотен сегнетоэлектриков, которые по типу химической связи и физическим свойствам принято подразделять на две основные группы:

– *ионные кристаллы*, к которым относятся титанат бария (BaTiO_3), титанат свинца (PbTiO_3), ниобат калия (KNbO_3), барий-натриевый ниобат ($\text{BaNaNb}_5\text{O}_{15}$) или сокращенно «банан» и др.;

– *дипольные кристаллы*, к которым относятся сегнетова соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), триглицинсульфат ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COONH}_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$), дигидрофосфат калия (KH_2PO_4) и др.

Сегнетоэлектрики находят применение для изготовления малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью, материалов с высокой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств, для модуляции и преобразования лазерного излучения, в акустических и пьезоэлектрических преобразователях.

Пьезоэлектрики – вещества с сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом. Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. При обратном пьезоэффекте происходит изменение размеров диэлектрика под действием приложенного электрического поля.

В различных пьезопреобразователях используют кристаллы кварца, сульфата лития, сегнетовой соли, ниобата и танталата лития. Широко применяется для изготовления пьезопреобразователей пьезоэлектрическая керамика, изготавливаемая в основном на основе твердых растворов цирконата – титаната свинца.

Пироэлектрики – диэлектрики, обладающие пироэлектрическим эффектом. Он состоит в изменении спонтанной поляризованности диэлектриков при колебании температуры. К типичным линейным пироэлектрикам относятся *турмалин и сульфит лития*. Пироэлектрики спонтанно поляризованы, но, в отличие от сегнетоэлектриков, направление их поляризации не может быть изменено электрическим полем. Пироэффект используется для создания тепловых датчиков и приемников лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и СВЧ–излучения. Значительным пироэффектом обладают некоторые сегнетоэлектрические кристаллы, к числу которых относятся ниобаты бария и стронция, триглицинсульфат, ниобат и танталат лития.

Контрольные вопросы к подглаве 2.9

1. Чем отличаются полярные и неполярные полимеры?
2. Какие материалы относятся к неполярным полимеризационным полимерам?
3. Какие материалы относятся к поликонденсационным полимерам?
4. Какие полимеры обладают наиболее высокими диэлектрическими свойствами и почему?
5. Какие компоненты включают пластические массы?
6. Чем отличаются каучуки от резин?
7. Назовите области применения, достоинства и недостатки электротехнических резин.
8. Каковы особенности строения керамических диэлектриков?
9. Назовите наиболее широко применяемый керамический электротехнический материал.
10. Каковы области применения керамики с высокой относительной диэлектрической проницаемостью?
11. Перечислите области применения электротехнического стекла.
12. Какова специфика электрических и механических свойств электротехнического стекла?
13. Чем стекло отличается от ситаллов?
14. В чем отличие миканитов, слюдинитов и слюдопластов?
15. Чем отличаются электротехнические лаки, эмали и компаунды?
16. Каковы области применения электротехнических лаков, эмалей и компаундов?
17. Какие виды электротехнических бумаг Вы знаете?
18. В чем отличие пассивных диэлектриков от активных?
19. Какие виды активных диэлектриков Вы знаете?
20. В чем заключается отличие сегнетоэлектриков от пьезоэлектриков?

Глава 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводниковые материалы обладают рядом характерных свойств [2, 5, 8]:

– по удельному сопротивлению (10^{-6} – 10^8 Ом · м при 20 °С) занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками;

– ширина запрещенной зоны таких материалов имеет величину в пределах от 0,05 до 3 эВ;

– при введении малого количества примесей их удельное сопротивление резко изменяется;

– сильная зависимость электропроводности от интенсивности внешних энергетических воздействий – температуры, длины волны светового потока, освещенности, напряженности электрического и магнитного полей, давления и т.д.

Управляемость электропроводностью полупроводниковых материалов посредством температуры, света, электрического поля, механического напряжения положена в основу принципа действия соответствующих приборов: терморезисторов, фоторезисторов, нелинейных резисторов (варисторов), тензорезисторов и т.д.

Применение полупроводников с двумя типами проводимости в одном кристалле (электронной и дырочной), так называемых *p-n*-переходов, положено в основу работы диодов, транзисторов, тиристоров, варикапов, стабилитронов и других устройств.

3.1. Классификация полупроводников

В зависимости от природы различают следующие виды полупроводников [2, 5, 8]:

1. *Простые полупроводники*. К ним относятся кремний Si, германий Ge, селен Se, бор B, фосфор P, мышьяк As, сера S, теллур Te, иод I, а также некоторые модификации олова Sn (серое), сурьмы Sb и углерода C (алмаз).

2. *Полупроводниковые химические соединения*:

– $A^{IV} B^{IV}$ (например, SiC); (здесь буквы A и B – символы химических элементов, цифры – валентности этих элементов);

– $A^{III} B^V$ (фосфида, арсениды, антимониды, например, арсенид галлия AsGa, фосфид галлия PGa, антимонид индия InSb и др.);

– $A^{II} B^{IV}$ (сульфиды, селениды, теллуриды, например, PbS, HgSe, CdTe и др.);

- оксиды металлов, например закись меди Cu_2O ;
- соединения сложного химического состава, например, $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$.

3. *Полупроводниковые комплексы* – многофазные материалы с полупроводящей или проводящей фазами, например SiC и графит, сцепленные глинистой, стеклянной или другой связкой (тирит, вилит, лэтин, силит).

4. *Органические полупроводники* – антрацен, полинафталин полиацетилен и др.).

5. *Стеклообразные полупроводники* (халькогенидные стекла).

6. *Жидкие полупроводники*.

Изготовленные из полупроводниковых материалов приборы обладают рядом достоинств: большой срок службы, малые габариты и масса, простота и надежность конструкции, высокая механическая прочностью (не боятся вибрации и ударов), отсутствие цепей накала, что при замене ими электронных ламп приводит к снижению потребления мощности и инерционности.

3.2. Собственные и примесные полупроводники

Величина и тип электропроводности полупроводников зависят от природы и концентрации примеси, в том числе специально введенной (легирующей).

Собственные полупроводники

Собственные полупроводники не содержат легирующих добавок; к ним относятся высокой степени чистоты простые полупроводники: кремний Si, германий Ge, селен Se, теллур Te и др., а также многие полупроводниковые химические соединения: арсенид галлия GaAs, антимонид индия InSb, арсенид индия InAs и др. [2, 5].

В собственных полупроводниках в результате внешнего энергетического воздействия электроны переходят из валентной зоны (ВЗ) в зону проводимости (ЗП) и становятся свободными. Необходимая для этого перехода энергия определяется шириной запрещенной зоны (ЗЗ) – ΔW полупроводника. С уходом электрона в ЗП в валентной зоне остается свободный энергетический уровень, называемый *дыркой*, а сама ВЗ становится не полностью заполненной (рис. 3.1, а). Электрон имеет отрицательный заряд, дырку принято считать положительно заряженной частицей, численно равной заряду электрона.

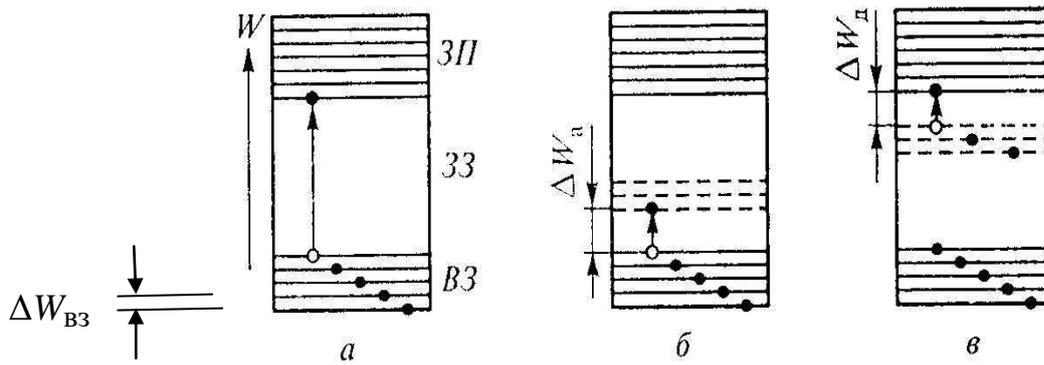


Рис. 3.1. Энергетические диаграммы полупроводников:
a – без легирующей примеси; *б* – с акцепторной примесью; *в* – с донорной примесью;
 ΔW_a – энергия активации (образования) дырок в валентной зоне полупроводника за счет перехода электронов на уровни акцепторной примеси; ΔW_d – энергия активации электрона, необходимая для перехода электронов с уровней донорной примеси в ЗП полупроводника [2]

Таким образом, в кристалле образуется пара свободных носителей заряда – электрон в ЗП и дырка в ВЗ, которые и создают собственную электропроводность полупроводника.

В отсутствие внешнего электрического поля электроны и дырки совершают тепловые хаотические движения в пределах кристалла, а под действием поля осуществляют направленное движение – дрейф, обуславливая тем самым электрический ток. Если концентрации свободных электронов и дырок равны между собой, то их подвижность различна. В результате более низкой эффективной массы (из-за различной инерционности при движении в поле кристаллической решетки) свободные электроны более подвижны, чем дырки. Поэтому собственная электропроводность полупроводников имеет слабо преобладающий электронный характер.

Примесные полупроводники

В производстве полупроводниковых приборов примесные полупроводники используют чаще, поскольку в них свободные носители заряда образуются при более низких температурах, по сравнению с собственными полупроводниками, которые отвечают рабочему интервалу температур такого прибора [2, 5].

Примесные полупроводники всегда содержат донорную или акцепторную примесь. Концентрация примеси обычно незначительна, она составляет один атом на 10^{10} – 10^{12} атомов полупроводника.

Если в четырехвалентный кремний Si ввести примесь пятивалентного химического элемента мышьяка As, то каждый атом As образует четыре ковалентные связи с соседними атомами кремния.

При этом на образование химических связей будут использованы четыре валентных электрона As. Пятый электрон будет связан с атомом As лишь слабыми силами электростатического взаимодействия (рис. 3.2, в).

При небольшой энергии внешнего воздействия

$$W_{\text{вн}} \geq \Delta W_{\text{д}},$$

где $\Delta W_{\text{д}}$ – энергия разрыва электростатической связи электрона с атомом As (см. рис. 3.1, в), пятый электрон будет оторван от атома As и переведен в зону проводимости. Таким образом, проводимость полупроводника в данном случае (при отсутствии собственной проводимости) осуществляется за счет электронов примесей, не участвующих в образовании химических связей.

Проводимость называется электронной, проводник *n*-типа, а примесь донорной. Электроны называются основными носителями зарядов, дырки – неосновными носителями зарядов.

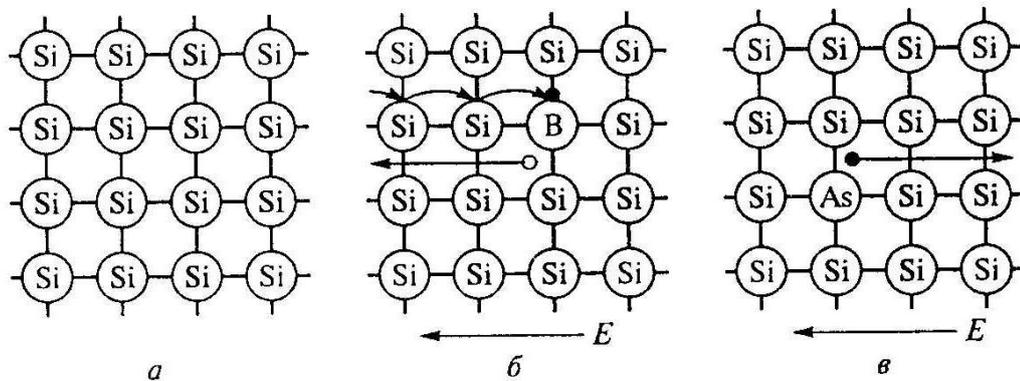


Рис. 3.2. Кристаллическая решетка кремния:
a – без легирующей примеси; *б* – с акцепторной примесью – бором В; *в* – с донорной примесью – мышьяком As [2]

Введем в кристалл Si примесь трехвалентного бора В. При этом каждый атом бора обобществляет валентные электроны с электронами атомов кремния, образуя три ковалентные связи. У одного из 4-х атомов Si ковалентная связь оказывается незавершенной. Для образования четвертой связи атом бора «заимствует» недостающий электрон у соседнего атома кремния, при этом в его кристаллической решетке создается свободный энергетический подуровень или, так называемая, «дырка» (рис. 3.2, б).

Энергия внешнего энергетического воздействия ($W_{\text{вн}}$) при этом составляет:

$$W_{\text{вн}} \geq \Delta W_a,$$

где ΔW_a – энергия образования дырок в валентной зоне полупроводника за счет перехода электронов на уровни акцепторной примеси.

Дырке условно присваивается положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона.

Далее в эту дырку может переместиться электрон другого атома Si. Таким образом возникает эстафетное движение дырки по ВЗ кристалла кремния. Это условно, на самом деле движется, конечно, электрон.

Таким образом, проводимость полупроводника в данном случае (при отсутствии собственной проводимости) осуществляется путем эстафетного движения валентных электронов Si в его ВЗ или, как условно принято, перемещением «дырки». Затраты энергии на перемещение «дырки» малы:

$$\Delta W_{\text{вз}} < \Delta W_a,$$

где $\Delta W_{\text{вз}}$ – разница энергий между энергетическими подуровнями в ВЗ кремния (см. рис. 3.2, а).

Такая проводимость называется «дырочной», полупроводник – *p*-типа (положительного типа), примесь акцепторной, т.е. принимающей электроны. Здесь «дырки» называются основными носителями зарядов, а электроны – не основными.

3.3. Электропроводность полупроводников

Плотность тока через собственный полупроводник j_c :

$$\begin{aligned} j_c &= j_n + j_p = n_n q_n v_n + n_p q_p v_p = n_n q_n a_n E + n_p q_p a_p E = \\ &= \sigma_n E + \sigma_p E = (\sigma_n + \sigma_p) E, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где j_n – плотность тока, обусловленная электронной проводимостью, j_p – плотность тока, обусловленная дырочной проводимостью, n_n и n_p – концентрации электронов и дырок соответственно (в единице объема), $n = p$; q_n – заряд электрона, q_p – заряд «дырки», равный, но противоположный по знаку, заряду электрона, v_n и v_p – средние

скорости упорядоченного движения электронов и дырок под действием электрического поля, a_n и a_p – подвижности электронов и дырок соответственно, E – напряженность электрического поля, σ_n и σ_p – удельные электро-проводности, обусловленные электронами и дырками, соответственно.

Плотность тока через полупроводник n -типа:

$$j_n = n_n q_n v_n = n_n q_n a_n E = \sigma_n E. \quad (3.2)$$

Плотность тока через полупроводник p -типа:

$$j_p = n_p q_p v_p = n_p q_p a_p E = \sigma_p E. \quad (3.3)$$

Зависимость проводимости от температуры

При увеличении температуры повышаются n , p , a_n и a_p , что приводит к росту проводимостей полупроводников σ_n и σ_p .

Для собственного полупроводника зависимость $\sigma_c = f(T)$ имеет вид:

$$\sigma_c = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W_{33}}{kT}\right), \quad (3.4)$$

где σ_0 – удельная проводимость при $T \rightarrow \infty$, ΔW_{33} – ширина запрещенной зоны, k – постоянная Больцмана.

Для примесного полупроводника:

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_{\text{пр}}, \quad (3.5)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – примесная удельная проводимость.

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W_{33}}{kT}\right) + \sigma_{0\text{пр}} \exp\left(-\frac{\Delta W_{\text{и}}}{kT}\right), \quad (3.6)$$

где $\sigma_{0\text{пр}}$ – удельная проводимость, обусловленная примесями при $T \rightarrow \infty$, $\Delta W_{\text{и}}$ – энергия ионизации примесей, $\Delta W_{\text{и}} = \Delta W_{\text{д}}$ или $\Delta W_{\text{а}}$ в зависимости от типа проводимости полупроводника.

На рис. 3.3 представлена зависимость удельной электропроводности примесного полупроводника от температуры в координатах $\ln \sigma = f(1/T)$.

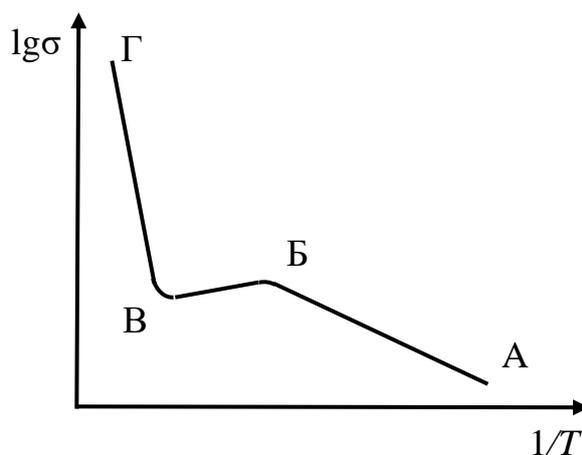


Рис. 3.3. Зависимость удельной электропроводности примесного полупроводника от температуры [2]

На участках AB и $BВ$ (рис. 3.3) имеет место примесная проводимость.

Повышение σ полупроводника при увеличении температуры в области низких температур обусловлено возрастанием концентрации свободных электронов и «дырок» за счет ионизации примесей (рис. 3.3, область AB). На участке $BВ$ проводимость практически не зависит от температуры, так как происходит ионизация всех примесей – «истощение примесей». На участке $BГ$ наблюдается собственная проводимость полупроводника.

Зависимость проводимости от напряженности электрического поля

Характер зависимости удельной электропроводности у полупроводников от напряженности электрического поля в широком интервале, представленной на рис. 3.4, такой же, как для твердых и жидких диэлектриков.

До напряженности электрического поля, называемой критической $E_{кр}$, удельная электропроводность σ не зависит от напряженности поля, т.е. соблюдается закон Ома – $j = \sigma E$. Выше $E_{кр}$ удельная электропроводность σ с увеличением напряженности поля возрастает по экспоненциальному закону

$$\sigma = \sigma_0 \exp \beta \sqrt{E}, \quad (3.7)$$

где β – коэффициент, зависящий от природы полупроводника. При $E = E_{пр}$ наступает пробой. С повышением температуры кривая зависимости $\sigma = f(E)$ перемещается вверх, а наклон возрастающей части становится меньше.

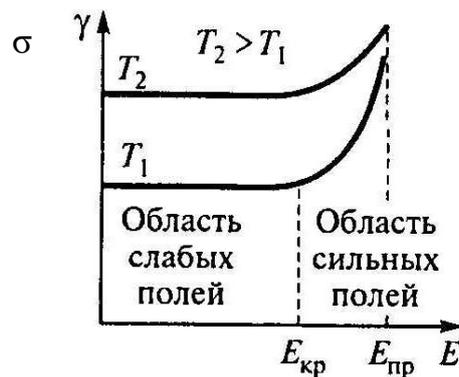


Рис. 3.4. Зависимость удельной электропроводности σ полупроводника от напряженности электрического поля E при различных температурах:

$E_{кр}$ – критическая напряженность электрического поля, $E_{пр}$ – напряженность электрического поля при которой наступает пробой полупроводника [2]

В области слабых электрических полей скорости упорядоченного движения носителей заряда v_n и v_p (см. выражение 3.1) значительно меньше скорости их теплового хаотического движения, поэтому здесь увеличение E не приводит к повышению v_n и v_p . В данной области энергии электрического поля недостаточно для роста концентрации носителей свободных зарядов n_n и n_p (см. выражение 3.1).

Указанные причины приводят к независимости удельной электропроводности полупроводника от напряженности поля. В этой области под действием электрического поля изменяются только направления скоростей носителей заряда.

В области сильных электрических полей скорость упорядоченного движения носителей заряда соизмерима со скоростью их теплового движения, что приводит к увеличению v_n и v_p . Кроме того, с увеличением напряженности поля возрастают концентрации носителей зарядов. Эти два фактора приводят к резкому увеличению электропроводности при $E > E_{кр}$.

3.4. Технологии очистки и получения монокристаллических полупроводников

Технологический процесс создания особо чистых монокристаллических слитков полупроводников включает ряд операций: получение технически чистого полупроводника; предварительную очистку путем образования промежуточного вещества (например, тетрахлорида) и термическое восстановление из него чистого полупроводника; приготовление поликристаллического слитка; глубокую очистку слитка методом зонной плавки и выращивание монокристалла.

Глубина очистки полупроводникового материала должна быть такой, чтобы готовый материал имел удельное сопротивление, близкое к собственному. Для этого требуется снизить в нем содержание случайных примесей до очень низкой концентрации, например, у Ge и Si до 10^{17} – 10^{19} атомов на кубический метр.

Один из эффективных методов глубокой очистки полупроводниковых материалов – *метод зонной плавки* – состоит из следующих основных операций. Поликристаллический полупроводниковый материал, полученный после предварительной очистки, помещают в графитовую или кварцевую лодочку (тигель), которую затем медленно перемещают сквозь виток высокочастотного индуктора либо виток индуктора двигают вдоль лодочки с материалом (рис. 3.5, а). Зонная плавка проводится в вакууме или в защитной (инертной) среде. Под действием тока высокой частоты материал под витком индуктора расплавляется и образуется узкая расплавленная зона шириной обычно не более 0,1 длины слитка. Примеси, содержащиеся в полупроводниковом материале, лучше растворяются в жидкой фазе, чем в твердой.

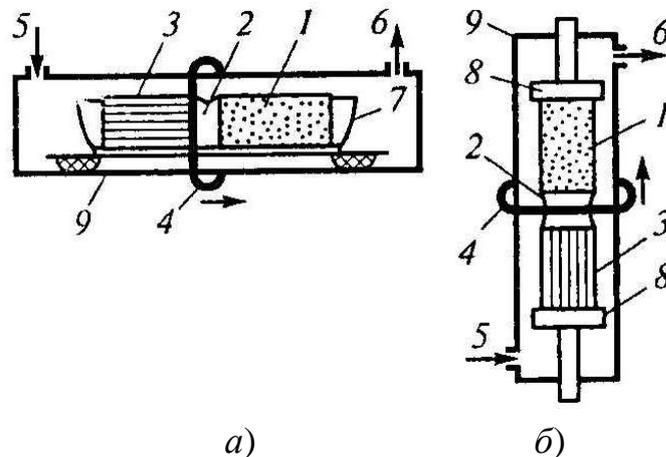


Рис. 3.5. Схемы: а – зонной плавки, б – бестигельной зонной плавки;
 1 – поликристаллический слиток, 2 – расплавленная зона, 3 – монокристалл,
 4 – виток высокочастотного индуктора, 5 – подача инертного (и легирующего газа),
 6 – выход газа к вакуумному насосу, 7 – лодочка (тигель),
 8 – держатель, 9 – кварцевая труба [2]

Поэтому при движении индуктора вдоль всей длины лодочки примеси вместе с расплавленной зоной будут также перемещаться в противоположный конец слитка и там концентрироваться. Индуктор перемещают с определенной скоростью, примерно равной 0,1–2,0 мм/мин.

При повторении этой операции несколько раз (иногда несколько десятков раз) полупроводник приобретет необходимую степень чистоты. На практике обычно делают несколько витков УВЧ-индуктора и тем самым создают несколько расплавленных зон. Каждая зона захватывает определенное количество примесей и переносит их в конец слитка, который затем отрезают и направляют на повторную очистку. Длина отрезанной части слитка обычно составляет 20–25 мм. Этим методом очищают германий.

Глубокую очистку полупроводников (например, кремния), которые в расплавленном состоянии химически взаимодействуют с материалом лодочки (тигля) – графитом, производят методом *бестигельной зонной плавки* (рис. 3.5, б). В этом случае слиток закрепляют в вертикальном положении, а расплавленную зону, образовавшуюся под витком высокочастотного индуктора, перемещают вдоль слитка вниз или вверх, концентрируя примеси в одном из его концов. Узкая расплавленная зона удерживает между собой твердые части слитка за счет сил поверхностного натяжения. Поэтому этот метод очистки можно применять только для материалов, имеющих достаточно высокое поверхностное натяжение (кремний, германий).

Методы зонной плавки сочетают высокую производительность с глубокой очисткой материала. Эффективность процесса определяется шириной расплавленной зоны и скоростью ее перемещения.

Из поликристаллического слитка, очищенного с помощью одного из рассмотренных методов, выращивают совершенные монокристаллы (нелегированные или легированные), производят эпитаксиальные слои или непосредственно используют в производстве некоторых типов полупроводниковых приборов (например, солнечных батарей из кремния).

Для получения объемных монокристаллов применяют следующие основные способы: вышерассмотренные методы зонной плавки (тигельный и бестигельный), метод вытягивания монокристалла из расплава, метод гарнисажной плавки. Их применяют для получения и легированных, и нелегированных монокристаллов из простых полупроводников и полупроводников-химических соединений. Чтобы исключить влияние воздушной среды, производство монокристаллов всеми перечисленными методами осуществляют в вакууме, в защитной газовой среде или под флюсом.

Монокристаллические слитки можно получать непосредственно в процессе их очистки *методом зонной плавки*. Для этого в образовавшуюся начальную расплавленную зону помещают затравку – кусочек

кристалла данного полупроводника. По мере перемещения индуктора расплавленная зона, затвердевая, будет повторять кристаллографическую структуру затравки.

Метод получения монокристаллов путем *вытягивания их из расплава* (метод Чохральского) заключается в следующем (рис. 3.6).

Затравку из кусочка монокристалла закрепляют на конце штока, ориентируя его в нужном кристаллографическом направлении. Шток осуществляет два вида движения: поступательное (вверх – вниз) и вращательное вокруг собственной оси.

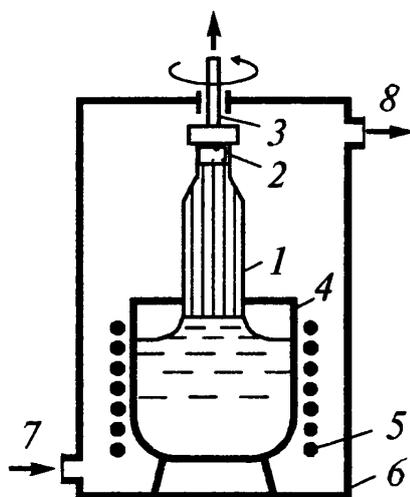


Рис. 3.6. Схема установки для вытягивания монокристаллов из расплава (метод Чохральского): 1 – растущий монокристалл; 2 – затравка; 3 – шток для вращения и вытягивания монокристалла; 4 – тигель с расплавом; 5 – нагреватель; 6 – камера; 7 – подача инертного газа; 8 – выход газа к вакуумному насосу [2]

Поликристаллический полупроводник, предварительно подвергнутый глубокой очистке, помещают в тигель. Создав в камере вакуум (или защитную среду), полупроводник расплавляют. Затем приводят в движение шток, и затравку вводят в соприкосновение с поверхностью расплава. Когда затравка оплавится и обеспечится ее смачивание расплавом, шток с затравкой начинают поднимать со скоростью $10^{-5} - 10^{-4}$ м/с. Одновременно его вращают вокруг оси для лучшего перемешивания расплава и выравнивания температуры, чтобы избежать преимущественного роста монокристалла в какую-либо сторону. По мере подъема затравки столбик расплава, тянущийся за ней, попадая в область более низких температур, остывает и направленно кристаллизуется. Кристаллизация происходит с той же ориентацией, которую имела затравка. Диаметр образующегося слитка можно регулировать с помощью температуры: при небольшом понижении

температуры он увеличивается, а при повышении – уменьшается. Чтобы монокристаллы имели строго постоянный диаметр по всей длине, необходимо температуру расплава поддерживать постоянной с точностью до десятых долей градуса.

Монокристаллы можно получать *гарнисажным методом Чохральского*, являющимся разновидностью бестигельной зонной плавки. Этот метод предусматривает расплавление не всего объема полупроводника, а только его части (рис. 3.7).

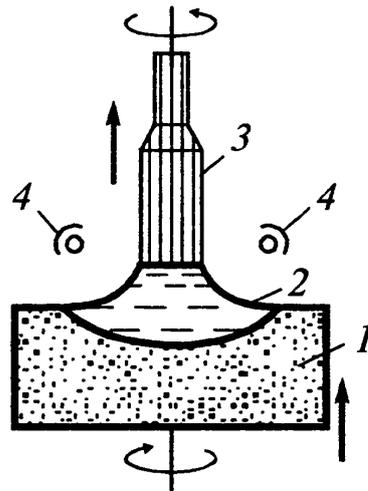


Рис. 3.7. Схема установки для выращивания монокристаллов методом гарнисажной плавки: 1 – исходный поликристаллический слиток; 2 – расплав; 3 – монокристалл; 4 – электронно-лучевой нагреватель [2]

Расплавленная зона образуется под действием электронно-лучевого нагрева в вакууме. Из этой зоны вытягивают монокристалл примерно таким же образом, как и в методе Чохральского.

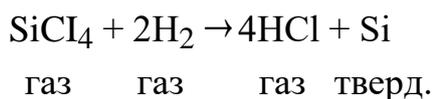
Преимуществом гарнисажного метода является большая однородность получаемых монокристаллических слитков и малое содержание в них кислорода, а недостатком – повышенная плотность дислокаций.

Для очистки и направленной кристаллизации полупроводниковых химических соединений $A^{III}B^V$ (GaP и InP, GaAs и InAs) получил распространение метод *газовых транспортных реакций*. Сущность метода заключается в том, что очищаемый твердый полупроводник, взаимодействуя с определенным веществом, образует газообразные продукты, которые перемещаются в другую часть системы, где иные условия равновесия (T и P); там они разлагаются с выделением из газовой среды исходного твердого полупроводника, но уже в виде крупных кристаллов высокой степени чистоты. Этот метод можно также использовать для глубокой очистки простых полупроводников и производства эпитаксиальных слоев.

Эпитаксиальные слои (структуры) – тонкие (20–100 мкм) монокристаллические слои полупроводника, осажденные на поверхности кристалла-подложки и сохранившие кристаллографическую ориентацию последнего.

Процесс осаждения полупроводникового материала получил название *эпитаксии*.

В качестве кристалла-подложки используют полупроводник или диэлектрик толщиной 200–300 мкм. Эпитаксия атомов простых полупроводников происходит в результате их испарения или сублимации либо распыления в разряде и осаждения на подложке. Эпитаксиальные пленки из простых полупроводников и полупроводниковых химических соединений получают также с помощью *газовых транспортных реакций*. Например, для получения эпитаксиального слоя из кремния обычно используют хлоридный способ, основанный на следующей реакции:



Из газовой фазы кремний непосредственно кристаллизуется на подложке, образуя эпитаксиальный слой.

Разработка технологии получения эпитаксиальных слоев была стимулирована интенсивным развитием микроэлектроники. Использование тонких слоев выгодно потому, что электрофизические процессы в большинстве полупроводниковых приборов протекают в очень узких граничных или поверхностных слоях. Остальная же часть монокристалла не только не участвует в работе прибора, но увеличивает его массу и стоимость и обычно ухудшает параметры самого полупроводникового прибора.

3.5. Свойства полупроводниковых материалов

3.5.1. Простые полупроводники

В электротехнике и электронике из простых полупроводников используют главным образом кремний, германий и селен. Наибольшее применение получил кремний ввиду относительной простоты технологии производства и широкого распространения в природе (табл. 3.1).

Кремний – химический элемент VI группы периодической системы Д.И. Менделеева. Физико-химические и электрофизические свойства приведены в табл. 3.1. Кремний является вторым по распространенности в природе химическим элементом после кислорода. В свободном виде в природе не встречается. Находится в виде двуокиси кремния SiO_2 и различных силикатов.

По химическим свойствам – металлоид. При температурах выше $900\text{ }^\circ\text{C}$ окисляется с образованием SiO_2 . В расплавленном состоянии химически активен. Поэтому его глубокую очистку производят методом бестигельной зонной плавки или в тиглях из кварца высокой степени чистоты.

Технический кремний, содержащий до 5 % примесей, получают путем восстановления SiO_2 коксом. Диаметр монокристаллических слитков кремния, полученных методом Чохральского, составляет 60–80 мм.

В качестве акцепторной примеси кремния используют элементы III группы: бор, алюминий, галлий, индий и таллий. В качестве донорной примеси применяют элементы V группы: мышьяк, сурьму, фосфор, висмут, в качестве амфотерной примеси – золото и цинк.

Кремний используют для изготовления дискретных полупроводниковых приборов, он является пока единственным материалом, применяемым в производстве интегральных микросхем для микроэлектроники.

Германий Ge – химический элемент IV группы периодической системы Д.И. Менделеева. Физико-химические и электрофизические свойства германия приведены в табл. 3.1. Кристаллический полупроводник твердый, хрупкий, серовато-белого цвета с характерным металлическим блеском. В расплавленном состоянии не взаимодействует с углеродом и кварцем (до $1500\text{ }^\circ\text{C}$). Поэтому в технологии получения германия используют графитовые или кварцевые тигли.

Сырьем для получения германия являются отходы переработки цинковых и полиметаллических руд (0,001–0,1% Ge) и продукты сгорания бурых углей – золы и сажи (до 1 % Ge). Для изготовления полупроводниковых приборов из поликристаллического германия производят монокристаллические слитки диаметром 25–35 мм и длиной более 40 мм.

Некоторые свойства полупроводниковых материалов [2, 4, 6, 8]

Свойства	Si	Ge	Se	SiC
Содержание в земной коре, % масс.	27,6	$7 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	–
Тип кристаллической решетки	кубическая типа алмаза	кубическая типа алмаза	моноклинная, гексагональная, аморфная	кубическая, гексагональная
Плотность, кг/м ³	2329	5327	4810 (гексаг.) 4280 (аморфн.)	3100 (куб.) 3200 (гексаг.)
Температура плавления, °С	1417	936	219	2830
Собственное удельное сопротивление при 20 °С, Ом · м	$2,3 \cdot 10^3$	0,68	10^3 (гексаг.) 10^{10} (аморфн.)	–
Концентрация свободных носителей заряда при 20 °С, м ⁻³	$3 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^{22}$ (дырки)	–
Ширина запрещенной зоны при 20 °С, эВ	1,12	0,72 (20 °С)	1,8 (гексаг.) 2,0 (аморфн.)	2,39 (β-куб.) 2,72–3,34 (α-гексаг.)
Подвижность электронов при 20 °С, м ² /В · с	0,145	0,390	–	0,1
Подвижность дырок при 20 °С, м ² /В · с	0,05	0,19	$2 \cdot 10^{-6}$	0,02
Работа выхода электронов, эВ	4,3	4,8	–	–
Диэлектрическая проницаемость	12,5	16,0	–	9,7–10
Рабочая температура, °С	до 200	–60 – +70	–	до 600

В качестве акцепторной примеси германия используют элементы III группы: галлий, индий и алюминий. В качестве донорной примеси применяют элементы V группы: мышьяк, сурьму и фосфор.

Германий применяют для изготовления диодов, транзисторов, фототранзисторов, фотодиодов, оптических фильтров и других устройств.

Селен – химический элемент VI группы периодической системы Д.И. Менделеева. Физико-химические и электрофизические свойства приведены в табл. 3.1. Наибольший интерес представляет гексагональный

и аморфный селен. Гексагональный селен серого цвета со слабым металлическим блеском. Стеклообразный селен в массиве имеет черный цвет, в тонких пленках – красный.

Сырьем для получения селена являются шламы, образующиеся при получении меди, и отходы производства серной кислоты.

Селен обладает высокой прозрачностью в инфракрасной области спектра, применяется для изготовления фильтров, линз и окон оптоэлектронных устройств. Также используется в производстве фоторезисторов, фотоэлементов и выпрямителей.

3.5.2. Карбид кремния

Карбид кремния SiC. Единственное бинарное полупроводниковое соединение типа $A^{IV}B^{IV}$ включает 70 % кремния и 30 % углерода (по массе). Физико-химические и электрофизические свойства приведены в табл. 3.1. Широкая запрещенная зона SiC позволяет создавать на его основе приборы с рабочей температурой до 600 °С. Материал имеет высокие показатели твердости, термической, химической и радиационной стойкости. Окисляется при температурах выше 800 °С.

Поликристаллический SiC получают путем восстановления SiO_2 углеродом. Монокристаллы образуются из газовой фазы или из растворов в расплаве. Классические методы формирования монокристаллов SiC не применимы из-за высоких значений температуры и давления, при которых существует расплав карбида кремния.

В качестве акцепторной примеси кремния используют элементы III группы: бор, алюминий, галлий, индий и элементы II группы – бериллий, магний, кальций. В качестве донорной примеси применяют элементы V группы: азот, мышьяк, сурьму, фосфор, висмут. Избыток кремния от стехиометрического состава создает электропроводность *n*-типа, а избыток углерода – *p*-типа.

Монокристаллический SiC используют для изготовления светодиодов, высокотемпературных силовых полупроводниковых приборов, полевых транзисторов, термо-, фоторезисторов.

Поликристаллический порошкообразный SiC используют для изготовления нелинейных резисторов (варисторов), высокотемпературных нагревателей, ионитронных поджигателей и волновых поглотителей.

Аморфный карбид кремния в виде пленок применяют для изготовления светодиодов и солнечных элементов.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Каковы характерные особенности полупроводниковых материалов?
2. Какие химические элементы относятся к простым полупроводникам?
3. Какие вещества относятся к полупроводниковым химическим соединениям?
4. Какие типы проводимости полупроводниковых материалов Вы знаете?
5. Как образуется электронная проводимость в полупроводниковых материалах?
6. Как образуется дырочная проводимость в полупроводниковых материалах?
7. Какова зависимость проводимости полупроводников от температуры?
8. Какие технологии очистки и получения монокристаллических полупроводников Вы знаете?
9. Какова технология формирования полупроводниковых эпитаксиальных слоев?
10. Назовите области применения полупроводниковых материалов.

Глава 4. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проводниковые материалы предназначены для передачи электрической энергии, преобразования ее в тепловую энергию и наоборот, а также для других целей [2, 4, 5, 8].

4.1. Классификация проводниковых материалов

По агрегатному состоянию различают:

- *твердые проводниковые материалы* – металлы, металлические сплавы, керамические проводниковые и углеродные материалы;
- *жидкие проводниковые материалы* – расплавленные металлы и электролиты;
- *газообразные проводниковые материалы* – ионизированные газы, пары металлов и др.

По типу проводимости различают:

- *проводники с электронной проводимостью* – металлы и металлические сплавы;
- *проводники с ионной проводимостью* – электролиты;
- *проводники со смешанной проводимостью* – ионизированные газы, пары металлов и др.

4.2. Характеристики проводниковых материалов

1. *Удельная электропроводность металлических проводников:*

$$\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2m_e v_T}, \quad (4.1)$$

где n – концентрация электронов, e – заряд электрона, λ – длина свободного пробега электрона, m_e – масса электрона; v_T – средняя скорость теплового движения электрона.

2. *Удельное сопротивление:*

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = R \frac{S}{l}, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = \text{мкОм} \cdot \text{м}, \quad (4.2)$$

где R – сопротивление проводника, S – площадь его поперечного сечения, l – его длина.

Сопротивление металлических проводников обусловлено рассеянием энергии электронов проводимости на дефектах кристаллической решетки и тепловых колебаниях ее узлов (*фононах*). При этом электроны передают часть своей энергии ионам металла и вызывают его нагрев.

Количество выделяющегося тепла определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = U^2/R, \quad (4.3)$$

где U – напряжение.

3. *Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления:*

$$TK_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, \text{ K}^{-1}. \quad (4.4)$$

Средний температурный коэффициент удельного электрического сопротивления в интервале температур $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$TK_{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \frac{\rho_2 - \rho_1}{T_2 - T_1}, \quad (4.5)$$

откуда

$$\rho_2 = \rho_1(1 + TK_{\rho} \cdot \Delta T), \quad (4.6)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные электрические сопротивления при температурах T_1 и T_2 соответственно.

4.3. Зависимость удельного сопротивления проводников от различных факторов

Зависимость ρ от напряженности электрического поля

В отличие от диэлектриков, проводимость проводниковых материалов практически не зависит от напряженности электрического поля (рис. 4.1). Для проводниковых материалов справедлив закон Ома:

$$j = \sigma E, \quad (4.7)$$

где j – плотность тока, E – напряженность электрического поля.

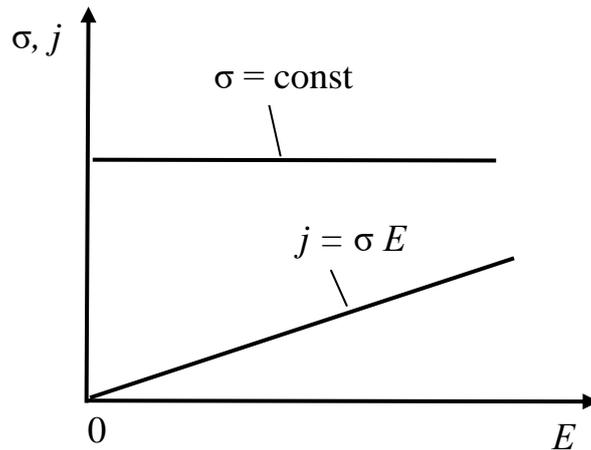


Рис. 4.1. Зависимость проводимости проводника σ и плотности тока j от напряженности электрического поля E

Влияние примесей

Примеси, образующие с основным металлом неограниченные твердые растворы, мало изменяют ρ , например, в сплаве Cu – Ag. Примеси, создающие с основным металлом сплавы – механические смеси, ограниченные твердые растворы или химические соединения значительно увеличивают ρ , например в сплавах Cu – Al и Cu – Fe (рис. 4.2).

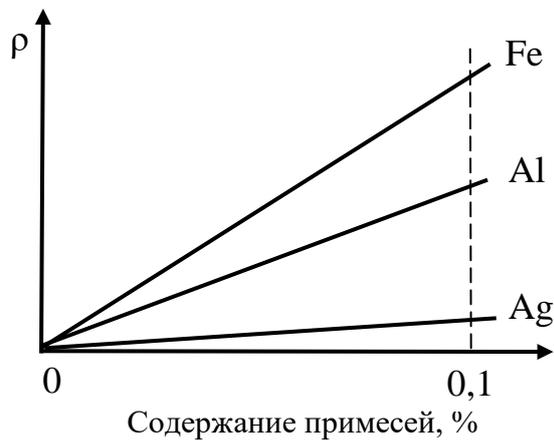


Рис. 4.2. Влияние содержания примесей на удельное сопротивление меди [2]

Удельное сопротивление сплавов

Для сплавов, где компоненты образуют механические смеси, зависимости удельного сопротивления ρ и удельной проводимости σ от его состава имеют линейный характер, например в сплаве Cu – W (рис. 4.3, I).

Для сплавов неограниченных (рис. 4.3, II) и ограниченных (рис. 4.3, III) твердых растворов, а также с компонентами, образующими химические соединения (рис. 4.3, VI), зависимость имеет экстремальный характер.

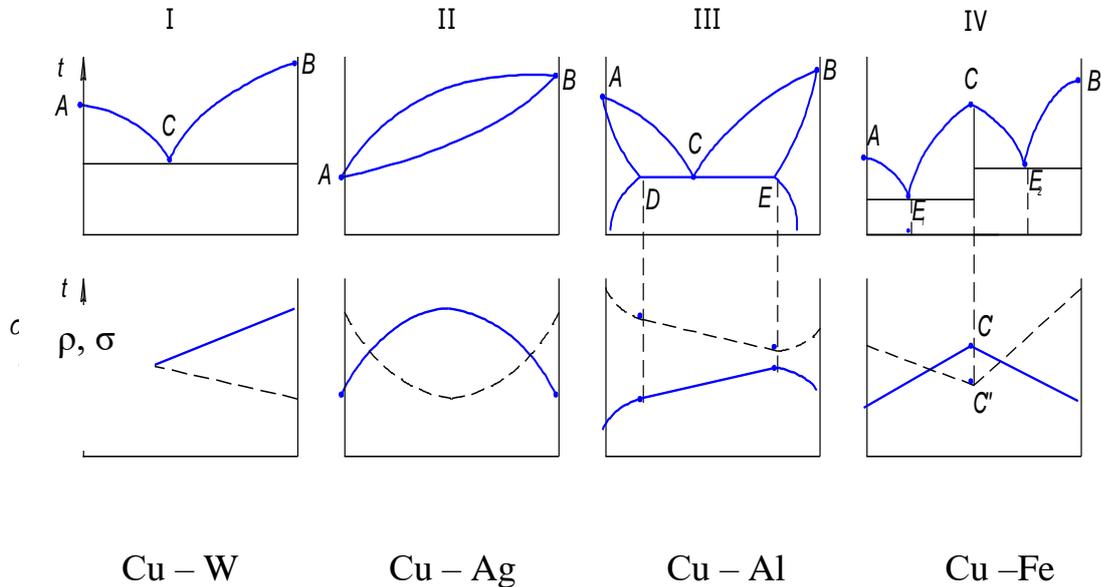


Рис. 4.3. Влияние типа сплава на зависимости удельного сопротивления ρ и удельной проводимости σ от его состава

Влияние механической деформации [2]

В результате холодной пластической деформации металла происходит искажение кристаллической решетки, увеличивается количество ее дефектов решетки (вакансий, дислокаций и пр.), что приводит к уменьшению λ (см. выражение 4.1) и росту ρ . При рекристаллизационном отжиге, т.е. при нагреве металла выше $T = 0,2-0,4 T_{пл}$, образуются новые неискаженные зерна, снижается количество дефектов кристаллической решетки и ρ .

Влияние температуры [2, 4, 5, 8]

Для идеального проводника без дефектов кристаллической решетки (рис. 4.4, участок 01) при $T = 0 \text{ К}$ $\lambda = \infty$, $\rho = 0$ (см. формулу 4.1). Увеличение ρ при повышении T здесь связано с ростом интенсивности теплового хаотического колебания узлов кристаллической решетки и уменьшением λ .

Для реального проводника:

– на участке I сопротивление обусловлено наличием примесей и дефектами кристаллической решетки ($\rho_{деф}$), $\rho = \rho_{деф}$;

– на участке II сопротивление увеличивается ввиду возрастания количества частот фононов, на которых рассеивается энергия электронов;

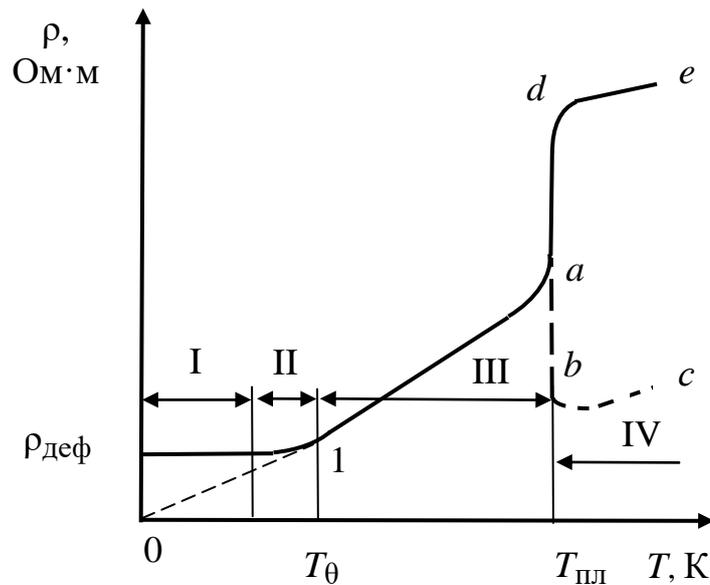


Рис. 4.4. Влияние температуры на удельное сопротивление металлов:

T_θ – температура Дебая [2]

– при $T = T_{пл}$ происходит резкое изменение объема металла; если объем увеличивается, то происходит уменьшение n (см. выражение 4.1) и повышение ρ (участок ad), если объем уменьшается, то n возрастает, а ρ снижается (участок ab);

– на участках III и IV увеличение ρ связано с повышением амплитуды тепловых колебаний узлов кристаллической решетки и уменьшением λ .

На участках II, III и IV сопротивление обусловлено как дефектами кристаллической решетки ($\rho_{деф}$), так и тепловыми колебаниями ее узлов различной частоты ($\rho_{тепл}$), $\rho = \rho_{деф} + \rho_{тепл}$.

Влияние магнитного поля

Магнитное поле искривляет траекторию движения электронов проводимости, уменьшает λ и увеличивает ρ .

4.4. Виды проводниковых материалов

Проводниковые материалы разделяют на следующие группы [2, 4, 5, 8]:

- металлы и сплавы высокой проводимости;
- сплавы с повышенным электрическим сопротивлением;
- контактные материалы;

- сверхпроводники и криопроводники;
- припои;
- сплавы для термопар;
- неметаллические проводниковые материалы.

4.4.1. Металлы и сплавы высокой проводимости

Используются для изготовления:

- неизолированных токоведущих и контактных проводов;
- токоведущих жил установочных, монтажных, обмоточных и самонесущих изолированных проводов (СИП);
- токоведущих жил кабелей.

К материалам предъявляются следующие требования:

- малое электрическое сопротивление;
- достаточная прочность и пластичность для обеспечения технологичности процесса изготовления проволоки;
- высокая коррозионная стойкость;
- возможность получения неразъемных соединений сваркой и пайкой.

Практическое применение получили следующие металлы особой, высокой и технической чистоты: Ag, Cu, Au, Al, W, Zn, Fe, Sn и др. (рис. 4.5).

Медь и медные сплавы

Свойства меди: металл красноватого цвета, $t_{\text{пл}} = 1083 \text{ }^{\circ}\text{C}$, плотность – $8,9 \text{ г/см}^3$, содержание в земной коре – 0,01 %, высокие показатели электро- и теплопроводности, прочности, пластичности, коррозионной стойкости, легко перерабатывается в проволоку диаметром до 0,01 мм, прокатывается в листы, ленты, фольгу толщиной до 0,005 мм, хорошо паяется.

Характерной особенностью меди является склонность к «водородной болезни». В присутствии водорода при повышенных температурах протекает реакция:



Водяной пар в порах медных изделий создает высокое давление, что приводит к их растрескиванию. Для предотвращения «водородной болезни» применяют бескислородную медь.

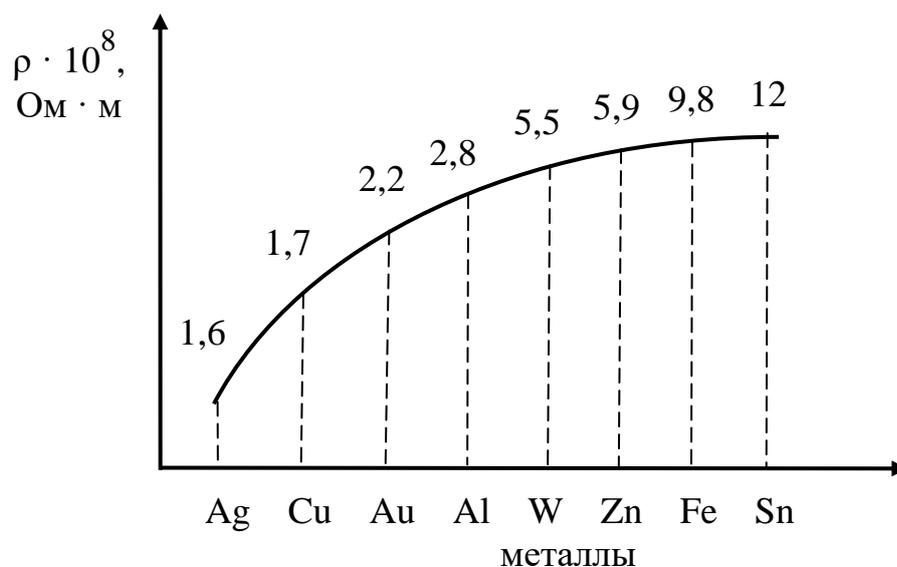


Рис. 4.5. Удельное сопротивление химически чистых металлов [2, 4, 8]

Марки меди приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Марки меди [2]

Марка	Содержание Cu, %	Примеси	Примечание
M00, M00б	99,99	Bi, Pb	Медь высокой чистоты
M0, M0б	99,95		
M1	99,9		Медь технической чистоты; индекс «б» – бескислородная медь
M2	99,7		
M3	99,5		
M4	99,0		

Марки медной проволоки:

МТ – медь твердая, твердотянутая или нагартованная; получают в процессе холодной прокатки или волочением. В результате «наклепа» имеет повышенные прочность и удельное сопротивление, пониженную пластичность. Применяется для изготовления подвесных токоведущих и контактных проводов, токоведущих жил кабелей, коллекторных пластин.

ММ – медь мягкая; получают в процессе рекристаллизационного отжига при $t = 600$ °С. По сравнению с МТ имеет повышенную пластичность, более низкие прочность и удельное сопротивление. Применяется для изготовления обмоточных проводов.

В электроэнергетике широко используют медные электротехнические сплавы, имеющие более высокие прочность и износостойкость по сравнению с медью: латуни (Л68, ЛС 59 – 1) и бронзы (БрК1, БрБ2, БрОФ 6,5 – 0,15) [1, 2, 4].

Алюминий и алюминиевые сплавы

Свойства алюминия: металл серебристо-белого цвета, $t_{\text{пл}} = 660$ °С, плотность – $2,7 \text{ г/см}^3$, содержание в земной коре – 8,8 %, высокие удельная прочность, пластичность, коррозионная стойкость, хорошо перерабатывается в проволоку, ленту, фольгу, дешевле меди.

Характерные особенности алюминия:

– на воздухе покрывается прочной и плотной оксидной пленкой с относительно высоким сопротивлением ($\rho > 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$); она затрудняет пайку, уменьшает гибкость проволоки, интенсивно поглощает влагу; однако может выполнять роль межвитковой изоляции, имеет $U_{\text{пр}} = 250 \text{ В}$;

– со многими металлами алюминий образует гальваническую пару, где является анодом, и в паре интенсивно подвергается электрохимической коррозии; для ее предотвращения разъёмные и неразъёмные соединения алюминиевых проводов с проводами из других металлов изолируют от внешней среды – покрывают лаками, эмалями, герметиками или применяют специальные герметизирующие устройства, например термоусадочные полимерные чехлы;

– *при одинаковых длине и сопротивлении алюминиевый провод по сравнению с медным имеет в 1,3 раза больший диаметр и в 2 раза меньшую массу и стоимость.*

Марки алюминия произведены в табл. 4.2.

Марки алюминиевой электротехнической проволоки:

АТП – *повышенной твердости*; АТ – *твердая*; АПТ – *полутвердая*; АМ – *мягкая*.

Проволоку из электротехнического алюминия марок А7Е, А6Е, А5Е, АЕ применяют для изготовления токоведущих и обмоточных проводов и кабелей.

Алюминий марки А97 используется для изготовления конденсаторной фольги.

Марки алюминия [2]

Марка	Содержание Al, %	Примеси	Примечание
A999	99,999	Fe, Si	Особой чистоты
A995	99,995		Высокой чистоты
A99	99,99		
A97	99,97		
A95	99,95		
A85	99,85		
A7, A7E	99,7		
A6, A6E	99,6		
A5, A5E	99,5		
A0, A, AE	99,0		

Для изготовления холоднотянутой электротехнической проволоки применяют алюминиевые деформируемые сплавы: АМц, АМг2, дюралюмины (Д1П, Д16П, Д18, В95) [1, 2, 4]. Состав дюралюминов: Cu – до 4,5 %, Mg – до 1,5 %, Mn – до 0,6 %, Al – остальное.

Сталь

Наиболее доступный и дешевый проводниковый материал. Для изготовления рельсов электрического транспорта (метро, трамвай) применяют специальные рельсовые высокоуглеродистые качественные стали М72, М74 (содержание углерода – 0,72 и 0,74 %, соответственно) и др.

Биметаллические провода

При большом расстоянии между опорами используют комбинированные биметаллические токоведущие провода. Для высокоскоростных электрифицированных железных дорог применяют биметаллические контактные провода. В этих проводах стальной сердечник воспринимает механические нагрузки, а алюминий или медь являются основным проводниковым материалом.

4.4.2. Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением

Резистивные сплавы (табл. 4.3) необходимы для изготовления:

- проволочных сопротивлений;
- элементов электротехнических устройств – реостатов, датчиков давления, термопар и др.

Свойства сплавов с повышенным электрическим сопротивлением

Название сплава	Марка сплава	Состав, %	Максимальная рабочая температура, °С	Примечание
Резистивные сплавы				
Манганин	МНМц-3-12	Ni – 3 %, Mn – 12 %, Cu – остальное	200	Для увеличения стабильности ρ и уменьшения TK_p применяют технологию отстаривания
Константан	МНМц-40-1,5	Ni – 40 %, Mn – 1,5 %, Cu – остальное	500	$TK_p \approx 0 \text{ K}^{-1}$
Жаростойкие сплавы				
Нихромы	X20H80	Cr – 20 %, Ni – 80 %	1100	
Нейзельбер (имитатор серебра)	МНЦ-15-20	Ni – 15 %, Zn – 20 %, Cu – остальное	1080	
Фехрали и хромали	X13Ю4 X23Ю5	Cr – 13 и 23 % Al – 4 и 5 % Fe – остальное	900 1200	Низкая стоимость, технологичность при изготовлении тонкой проволоки

Для увеличения стабильности удельного сопротивления во времени и уменьшения TK_p для резистивных сплавов применяют технологию отстаривания, которая включает следующие операции:

- отжиг при $t \approx 400 \text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме или инертном газе с медленным охлаждением;

- выдержку в течение 10 часов при температуре $140 \text{ }^\circ\text{C}$;

- выдержку в течение одного года при комнатной температуре.

Жаростойкие сплавы (табл. 4.3) используются для изготовления нагревательных элементов электрических печей и приборов.

К сплавам предъявляются следующие *требования*:

- высокая технологичность при изготовлении тонкой гибкой проволоки;

- стабильность сопротивления во времени;

- низкий TK_p ;

- хорошая нагревостойкость – способность длительное время работать на воздухе при $t \approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ без ухудшения свойств.

Высокая нагревостойкость жаростойких сплавов обусловлена образованием на их поверхности оксидной пленки с температурным коэффициентом расширения равным температурному коэффициенту расширения сплава. Равенство температурных коэффициентов расширения сплава и оксидной пленки обеспечивает сплошность оксидной пленки при термоударах, что предохраняет сплав от окисления кислородом воздуха.

4.4.3. Контактные материалы

Электрический контакт – поверхность соприкосновения токоведущих частей электротехнических устройств и соответствующие конструктивные приспособления.

Различают разрывные и скользящие контакты.

Разрывные контакты

Разрывные контакты обеспечивают периодическое замыкание и размыкание электрических цепей в реле, выключателях, коммутаторах и других устройствах.

К материалам разрывных контактов предъявляются следующие *требования*:

- высокие тепло- и электропроводность;
- стойкость к свариванию – материалы не должны свариваться под действием электрической дуги, возникающей при размыкании контактов;
- стойкость к электрической эрозии – материалы не должны разрушаться под действием электрической дуги;
- стойкость к действию ударных и сжимающих нагрузок.

Материалы для слаботочных разрывных контактов (ток менее 10 А):

- тугоплавкие металлы – W, Mo;
- благородные металлы – Pt, Au, Ag;
- сплавы благородных металлов – Au – Ag, Pt – Ru, Pt – Rh;
- металлокерамические материалы – Ag – CdO и др;
- твердая медь МТ;
- сплавы на основе меди – бронзы и латуни.

Материалы для сильноточных разрывных контактов (ток более 10 А):

- металлокерамические материалы – Ag – CdO, Ag – CuO, Cu – графит и др; Ag – Ni, Ag – Ni – графит, Ag – W – Ni, Cu – W – Ni;

- твердая медь МТ;
- сплавы на основе меди – бронзы и латуни.

В металлокерамических материалах Ag и Cu обеспечивают высокую электропроводность электрического контакта, а W, Ni и графит – стойкость контакта к механическому износу, электрической эрозии и свариваемости.

Скользящие контакты

Скользящие контакты обеспечивают переход электрического тока от неподвижной части электрического устройства к подвижной его части (например, контакт между коллектором и щетками электрических двигателей, контакт между токонесущим проводом и токосъемником в электрическом транспорте).

К материалам скользящих контактов предъявляется дополнительное требование:

- стойкость к истирающим нагрузкам в режиме сухого трения.

Материалы для скользящих контактов:

- твердая медь МТ;
- медь, легированная серебром;
- бронзы и латуни (БрК1, БрБ2, ЛС 59 – 1, ЛМц 58 – 2 и др.);
- металлокерамика;
- графит и графитсодержащие материалы – имеют наиболее высокую стойкость к истиранию и окислению, повышенное напряжение дугообразования.

4.4.4. Сверхпроводники и криопроводники

Сверхпроводимость – явление резкого уменьшения сопротивления материала (практически до нуля) при понижении температуры.

Вещества, обладающие свойством сверхпроводимости, называются *сверхпроводниками* (СВП) (рис. 4.6).

Применение СВП позволяет:

- уменьшить потери при передаче электрической энергии;
- увеличить КПД электрических машин и аппаратов до 90 % и более;
- использовать эффект сверхпроводникового подвеса (левитации) в подшипниках без трения, в скоростных электропоездах и для других целей.

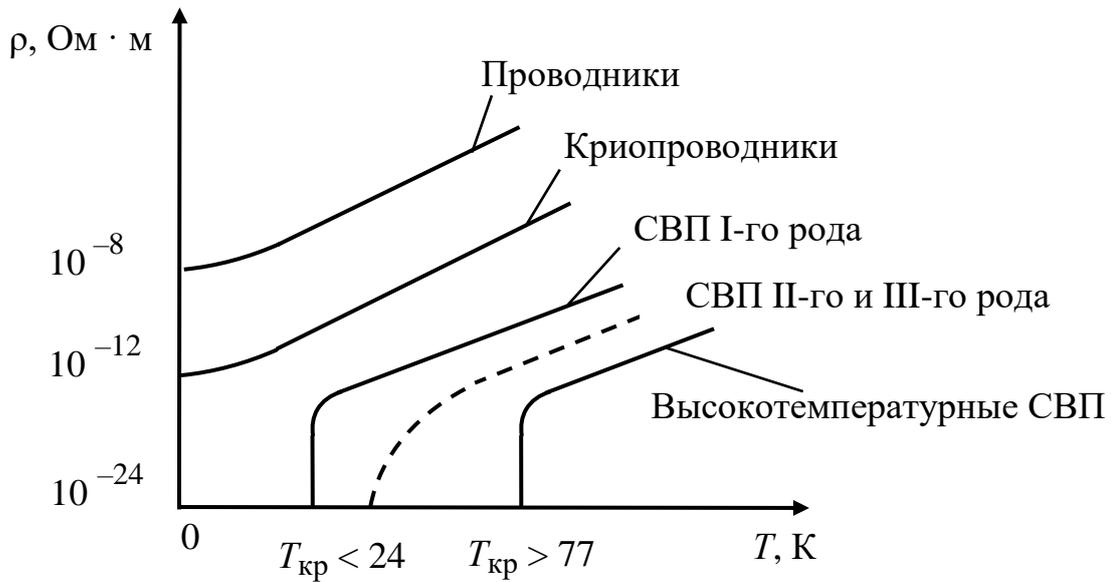


Рис. 4.6. Температурные зависимости сопротивления проводников, сверхпроводников и криопроводников

Сверхпроводниковое состояние веществ существует при температурах менее критической ($T < T_{кр}$), напряженности магнитного поля менее критической напряженности ($H < H_{кр}$) и плотности тока, индуцирующего магнитное поле, менее критического значения ($j < j_{кр}$) (рис. 4.7).

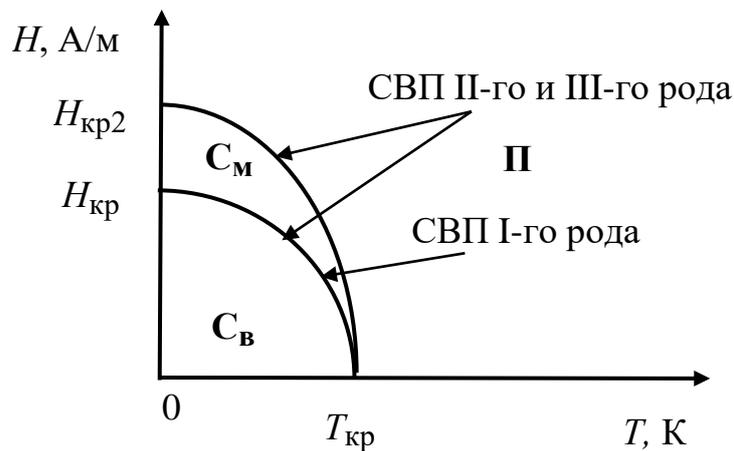


Рис. 4.7. Диаграммы состояния сверхпроводников:
 C_B – сверхпроводниковое состояние; C_M – смешанное состояние;
 Π – проводниковое состояние [5]

Низкотемпературные сверхпроводники ($T_{кр} < 24$ К)

Различают три группы низкотемпературных сверхпроводников.

Сверхпроводники I-го рода резко переходят в сверхпроводниковое состояние при $T < T_{кр}$ и $H < H_{кр}$, к этой группе относятся все чистые металлы, исключая переходные металлы (Fe, Ni, Co и др.), Au, Ag, Pt и Cu.

Например:

– W ($T_{кр} = 0,01$ К, $H_{кр} = 0,1$ кА/м);

– Pb ($T_{кр} = 7,2$ К, $H_{кр} = 65$ кА/м).

Сверхпроводники II-го рода – переходят в сверхпроводниковое состояние относительно плавно. При $H < H_{кр2}$ и $T < T_{кр}$ – находятся в смешанном состоянии, для которого одновременно имеют место обычная проводимость и сверхпроводимость, при $H < H_{кр}$ переходят в сверхпроводниковое состояние.

К этой группе относятся:

– чистые металлы – Nb ($T_{кр} = 9,22$ К, $H_{кр} = 155$ кА/м), V ($T_{кр} = 5,43$ К, $H_{кр} = 109$ кА/м);

– сплавы – химические соединения, например NbGe ($T_{кр} = 23,2$ К);

– тонкие пленки из СВП I-го рода.

СВП I и II-го рода способны проводить относительно малые токи.

Сверхпроводники III-го рода – это сверхпроводники II-го рода, имеющие крупные неоднородности (дефекты решетки и примеси), образующиеся, например, при холодной пластической деформации. Эти материалы переходят в сверхпроводниковое состояние при значительных величинах $H_{кр}$, имеют очень высокие значения критической плотности тока $j_{кр}$, т.е. способны пропускать значительные токи.

К этой группе относятся:

– сплавы и химические соединения на основе Nb и V с дефектами кристаллической решетки: Nb – Ti ($T_{кр} = 10$ К, $H_{кр2} = 8$ МА/м, $j_{кр} = 0,5$ ГА/м²), V – Ga ($T_{кр} = 14,2$ К, $H_{кр2} = 18$ МА/м, $j_{кр} > 1,6$ ГА/м²);

– сверхтонкие пленки из СВП I-го рода: Al ($T_{кр} = 5,8$ К при $h = 50$ нм), Bi ($T_{кр} = 8$ К при $h = 300$ нм).

Высокотемпературные сверхпроводники ($T_{кр} > T_{кип} N_2 = 77$ К)

К этой группе относится сверхпроводящая керамика: YBa₂Cu₃O₇ ($T_{кр} = 100$ К), Tl₂Ca₂Ba₂Cu₃O₁₀ ($T_{кр} = 127$ К), Hg–Ba–Ca–Cu–O ($T_{кр} = 135$ К) и др.

Криопроводники

Криопроводники – материалы, имеющие высокую проводимость при $T < 100 \text{ K}$, но не переходящие в сверхпроводниковое состояние.

Достоинством криопроводников является плавное увеличение сопротивления при повышении температуры. Недостатком СВП является резкий рост электрического сопротивления при увеличении температуры, что может привести к аварии на электроэнергетическом оборудовании за счет резкого выделения тепла.

К криопроводникам относятся Al и Cu особой чистоты и Be технической чистоты (рис. 4.6).

4.4.5. Сплавы для термопар

При соприкосновении двух металлов с различной работой выхода электронов ($A_{\text{ВЫХ}}$) часть из них перейдет от металла с меньшей $A_{\text{ВЫХ}}$ к металлу с большей $A_{\text{ВЫХ}}$. В результате первый металл зарядится положительно, а второй – отрицательно. Между проводниками возникнет *контактная разность потенциалов* U (рис. 4.8).

Если два проводника соединить в двух точках (рис. 4.9) и поддерживать в них различную температуру, то в цепи возникнет термоэлектродвижущая сила:

$$E = U_{\Gamma} + U_{\text{X}} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_{\Gamma} - T_{\text{X}}), \quad (4.8)$$

где U_{Γ} – контактная разность потенциалов горячего спая; U_{X} – контактная разность потенциалов холодного спая; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; n_1, n_2 – концентрации электронов проводимости в металлах 1 и 2 соответственно; T_{Γ}, T_{X} – температуры горячего и холодного спая, соответственно.

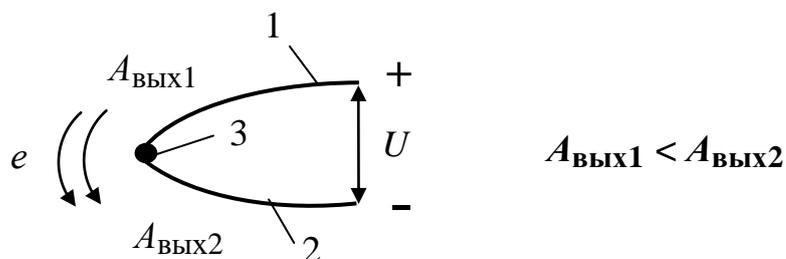


Рис. 4.8. Образование контактной разности потенциалов: 1, 2 – металлы; 3 – спай; U – контактная разность потенциалов

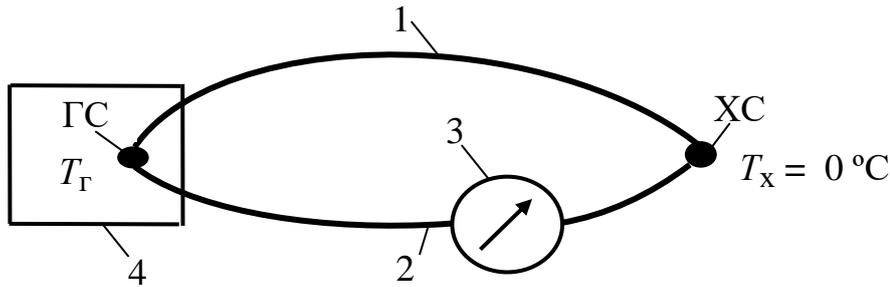


Рис. 4.9. Схема термопары:

1, 2 – металлы, 3 – милливольтметр, 4 – объект измерения температуры,
 ГС – горячий спай, ХС – холодный спай

Такое устройство называют *термопарой* и применяют для измерения температуры различных объектов.

Для пользования термопарой строят тарировочный график $T_{\Gamma} = f(E)$ при $T_{\text{Х}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{С}$.

Для изготовления термопар применяют следующие материалы:

- чистые металлы – Pt, Cu, Fe;
- сплавы – *хромель* (Ni – 90 %, Cr – 10 %), *алюмель* (Ni – 95 %, Al, Si, Mg – остальное), *копель* (Cu – 56 %, Ni – 44 %), *платинородий* (Pt – 90 %, Rh – 10 %), *константан*.

Максимальные рабочие температуры термопар приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Максимальные рабочие температуры некоторых термопар

Термопара	Максимальная рабочая температура, $^{\circ}\text{С}$
Медь – константан	350
Медь – копель	350
Железо – константан	600
Железо – копель	600
Хромель – копель	600
Хромель – алюмель	900–1000
Платинородий – платина	1600

4.4.6. Припой

Пайка – процесс соединения металлов, находящихся в твердом состоянии, посредством расплавленного присадочного металла, называемого *припоем* [2, 4, 5, 8]. Припой имеет температуру плавления меньше температуры плавления основного металла.

Твердые припои

Твердыми припоями называются такие, у которых температура плавления более 500 °С. Они имеют относительно высокую механическую прочность (σ_B до 500 МПа).

Для пайки меди, латуней, бронз, сталей применяют следующие припои:

1. Медные (чистая медь с $t_{пл} = 1083$ °С).
2. Медно-цинковые. Например, ПМЦ 36, ПМЦ 48, ПМЦ 54, Л62.

Расшифровка маркировки: ПМЦ 36 – припой медно-цинковый, содержит 36 % цинка и 64 % меди.

3. Медно-никелевые.
4. Серебряные. Например, ПСр 70, ПСр 45, ПСр 10.

Расшифровка маркировки: ПСр 70 – припой серебряный, содержит 70 % серебра, 26 % меди, 4 % цинка.

Пайка алюминия и его сплавов затруднена вследствие легкой окисляемости Al с образованием плотной оксидной пленки, а также вследствие слабой сопротивляемости коррозии мест пайки.

Для пайки алюминия и сплавов на его основе применяют:

- силумин (Si – 10–13 %, Cu – 0,8 %, Zn – 0,3 %, Al – остальное) – пайка Al и сплавов АМц;
- 34А (Si – 6 %, Cu – 28 %, Al – остальное) – пайка Al и сплавов АМг.

Мягкие припои

Ими называются легкоплавкие припои с температурой плавления менее 400 °С. Они имеют низкую механическую прочность ($\sigma_B = 50$ –70 МПа).

Мягкими припоями паяют медь, латуни, бронзы, стали, свинец и сплавы на основе свинца.

Марки припоев: ПОС-90, ПОС-61, ПОС-18 и др.

Расшифровка маркировки: ПОС-90 – припой оловянно-свинцовый, содержит 90 % олова, 10 % свинца.

4.4.7. Неметаллические проводниковые материалы

Углеродные материалы

Углерод существует в виде нескольких полиморфных модификаций: алмаз, графит, аморфный углерод (уголь), карбен, фуллерены (C_{60}), нанотрубки, графен и др. В качестве проводниковых материалов применяют графит и уголь.

Графит – темно-серое кристаллическое вещество со слабым металлическим блеском. Кристаллическая решетка слоистая, состоит из слоев гексагональных колец. Плотность – 2,2–2,3 г/см³, твердость НВ30, удельное электрическое сопротивление поликристаллического графита – $8 \cdot 10^{-6}$ Ом · м, монокристаллического – вдоль слоев – $4 \cdot 10^{-7}$ Ом · м, поперек слоев – 10^{-4} Ом · м. В природе графит встречается в самородном виде, получают искусственный графит.

Аморфный углерод (уголь) – состоит из мелких кристаллов, имеющих структуру графита. Плотность – 1,8–2,1 г/см³, $t_{пл} = 3600$ °С. Аморфный углерод получают при нагреве углеродсодержащих веществ без доступа воздуха.

Применяют следующие сорта угля:

- кокс (получают из каменного угля);
- древесный уголь;
- костяной уголь;
- сажа (копоть получают из природного газа);
- антрацит (ископаемый углерод), содержит до 95 % углерода.

Электроугольные изделия

1. Угольные электроды.

Используют в прожекторах, электрических печах и гальванических ваннах.

Технологический процесс производства электродов включает следующие стадии:

- приготовление технологической массы (смешение измельченного угля со связующим, например, жидким стеклом);
- формование изделий различными методами – глухое прессование, экструзия и др.;
- обжиг: при $t = 800$ °С получают угольные изделия, при $t = 2500$ – 3000 °С – графитованные изделия.

2. Щетки, которые служат для образования скользящего контакта между неподвижными и вращающимися частями электрической машины.

Применяют следующие марки щеток: УГ – угольно-графитовые; Г – графитовые; ЭГ – электрографитовые; М и МГ – медно-графитовые ($\rho = 5 \cdot 10^{-8}$ – $1,2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м).

Щетки М и МГ имеют наиболее низкие значения удельного электрического сопротивления и коэффициента сухого трения. Щетки УГ, Г, ЭГ имеют удельное электрическое сопротивление $\rho = (1-6) \cdot 10^{-6}$ Ом · м.

3. Угольные порошки для микрофонов (изготавливают из антрацита).

4. Непроволочные резисторы.

Проводниковые материалы особо высокой нагревостойкости

Материалы применяются для изготовления нагревателей высокотемпературных электрических печей и электродов магнитогазодинамических (МГД) генераторов, где они работают в условиях повышенного абразивного износа и высоких температур ($t = 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более). Используются тугоплавкие оксиды, например CeO_2 , и оксидная керамика, например $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$.

Контрольные вопросы к главе 4

1. От каких параметров зависит удельная электропроводность металлических проводников?
2. Как влияет холодная пластическая деформация на удельное электрическое сопротивление металлических проводников?
3. Как влияет температура на сопротивление металлического проводника?
4. Какие материалы относятся к металлам и сплавам высокой проводимости?
5. Как изменяется удельное электрическое сопротивление металлов в ряду $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Al} - \text{Fe}$?
6. Какие материалы применяют для изготовления нагревательных элементов электрических печей?
7. Для каких целей применяют углеродные проводниковые материалы?
8. Какие термопары позволяют измерять температуру до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$?
9. Какие металлы не переходят в сверхпроводниковое состояние при самых низких температурах?

Глава 5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. Магнитные характеристики материалов

Магнитная индукция материала:

$$B = B_0 + B_c, \quad (5.1)$$

где B_0 – внешняя магнитная индукция или индукция магнитного поля в вакууме.

Для линейного проводника

$$B_0 = \frac{F}{I \cdot l}, \text{ н / А} \cdot \text{м} = \text{Тл (тесла)}, \quad (5.2)$$

где F – сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля, I – ток, протекающий через проводник, l – длина проводника.

$$B_0 = \mu_0 H, \quad (5.3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная или постоянная Генри, H – напряженность магнитного поля, А/м.

Для линейного проводника (рис. 5.1) имеем:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r}, \quad (5.4)$$

где r – радиус произвольной концентрической окружности вокруг линейного проводника.

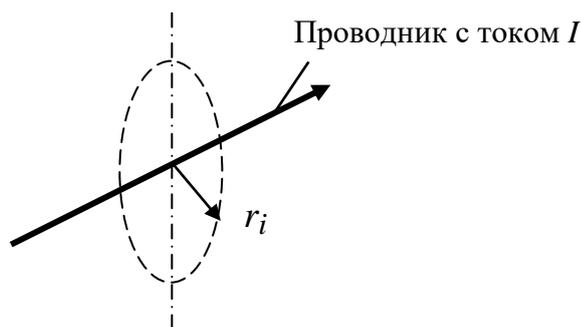


Рис. 5.1. К определению напряженности магнитного поля

B_c – собственная магнитная индукция вещества:

$$B_c = \mu_0 M, \quad (5.5)$$

где M – намагниченность вещества:

$$M = k_m H, \quad (5.6)$$

k_m – магнитная восприимчивость вещества.

Подставим выражения (5.3), (5.5) и (5.6) в формулу (5.1) и получим:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 k_m H = \mu_0 H (1 + k_m) = \mu_0 \mu H, \quad (5.7)$$

где $\mu = (1 + k_m)$ – относительная магнитная проницаемость вещества.

Относительная магнитная проницаемость вещества μ – физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается от индукции в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B_0 + B_c}{B_0} = 1 + \frac{B_c}{B_0} = 1 + k_m. \quad (5.8)$$

Намагниченность вещества:

$$M = \frac{\sum m_{ai}}{V}, \quad (5.9)$$

где m_{ai} – магнитный момент атома вещества, V – объем вещества.

$$m_{ai} = \sum m_{oi} + \sum m_{ci} + \sum m_{ди}, \quad (5.10)$$

где $\sum m_{oi}$ – суммарный орбитальный магнитный момент электронов, $\sum m_{ci}$ – суммарный спиновый магнитный момент электронов, $\sum m_{ди}$ – суммарный дополнительный магнитный момент электронов, обусловленный прецессией оси вращения электрона.

5.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

Вещества по магнитным свойствам подразделяют на следующие группы [2, 9]:

– диамагнитные вещества (диамагнетики);

- парамагнитные вещества (парамагнетики);
- ферромагнитные вещества (ферромагнетики);
- антиферромагнитные вещества (антиферромагнетики);
- ферримагнитные вещества (ферримагнетики или ферриты).

Диаманетики

Диаманетиками являются следующие вещества:

- инертные газы (Ne, Ar, Xe и др.);
- металлы (Pb, Hg, Zn и др.);
- неметаллы (S, P, Si и др.);
- некоторые газы: водород H_2 , аммиак NH_3 и др.;
- благородные металлы (Ag, Au, Cu,);
- неорганические вещества (стекло, мрамор, вода и др.);
- органические вещества (воск, нефть и др.).

В отсутствие внешнего магнитного поля ($H = 0$) магнитные моменты атомов $m_{ai} = 0$, так как орбитальные m_{oi} и спиновые m_{ci} моменты спаренных электронов направлены в разные стороны и компенсируют друг друга. Следовательно, намагниченность вещества $M = 0$. При наложении внешнего магнитного поля ($H \neq 0$) возникает дополнительный магнитный момент электронов m_{di} , направленный в сторону, противоположную внешнему полю. *Диаманетики незначительно ослабляют внешнее магнитное поле.*

Значения k_m и μ диаманетиков приведены в табл. 5.1. Эти параметры не зависят от температуры и напряженности магнитного поля.

Таблица 5.1

Значения k_m и μ для различных веществ

Вещество	k_m		μ
Диаманетики	< 0	$-10^{-6} \div -10^{-4}$	< 1
Парамагнетики	> 0	$10^{-6} \div 10^{-4}$	> 1
Ферромагнетики	$\ll 0$	$10^3 \div 10^6$	$\gg 1$
Антиферромагнетики	> 0	$10^{-4} \div 10^{-2}$	> 1
Ферримагнетики	$\gg 0$	$10^1 \div 10^4$	$\gg 1$

Парамагнетики

К парамагнитным веществам относятся: Al, Pt, щелочные металлы (Na, K, Rb и др.), O₂, воздух и др.

При $H = 0$ $m_{ai} \neq 0$, так как m_{oi} и m_{ci} не компенсируют друг друга, $M = 0$, так как m_{ai} направлены хаотично.

При $H \neq 0$ m_{ai} ориентируются по полю и усиливают его, m_{di} , как и в случае диамагнетиков, направлен в сторону, противоположную внешнему полю и ослабляет его. В результате парамагнетики незначительно усиливают внешнее магнитное поле. Зависимости $k_m(T)$ и $M(H)$ для диа- и парамагнетиков приведены на рис. 5.2.

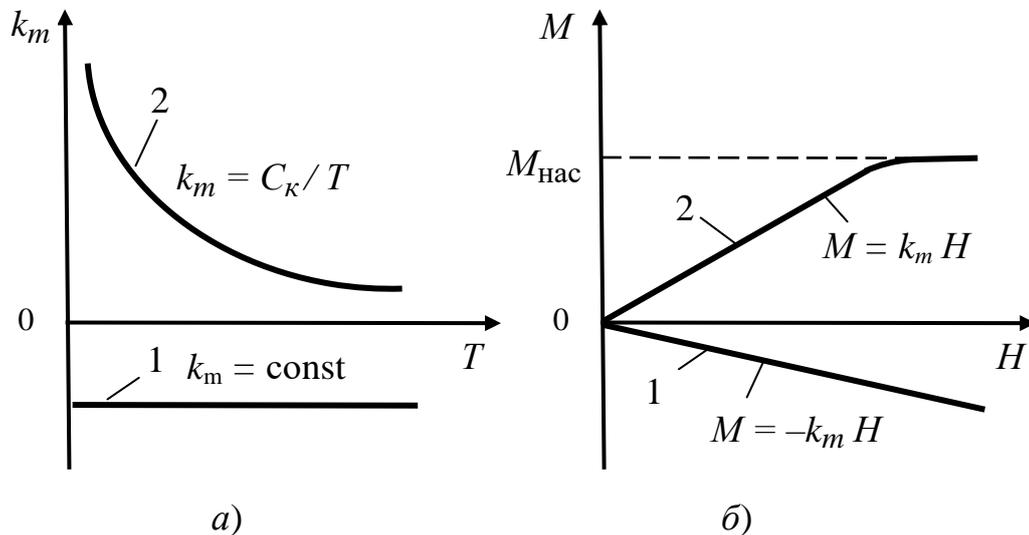


Рис. 5.2. Зависимости: *а* – магнитной восприимчивости k_m от температуры; *б* – намагниченности M от напряженности магнитного поля H ; 1 – для диамагнетиков; 2 – для парамагнетиков; C_K – постоянная Кюри, $M_{\text{нас}}$ – намагниченность насыщения [2, 9]

Ферромагнетики

К ферромагнетикам относятся [2, 9]:

- Fe, Ni, Co и сплавы на их основе;
- сплав Гейслера (Mn – Cu – Al);
- химические соединения MnSb, MnBi и др;
- 6 редкоземельных металлов: гадолиний Gd, тербий Tb, диспрозий Dy, эрбий Er, тулий Tm и гольмий Gd.

Ферромагнетики состоят из микрообъемов малого размера (10^{-3} – 10^2 мм³), которые называются *доменами*.

В доменах $m_{ai} \neq 0$, так как m_{oi} и m_{ci} не компенсируют друг друга и самопроизвольно направлены в одну сторону, образуя магнитный момент домена M_{si} . Вещество в пределах домена имеет максимальную степень намагниченности, т.е. самопроизвольно намагничено до насыщения.

В отсутствие электрического поля векторы намагниченности доменов M_{si} направлены в разные стороны, реализуется доменная структура с замкнутым магнитным полем, суммарная намагниченность вещества равна нулю – $\sum M_{si} = 0$ (рис. 5.3, а).

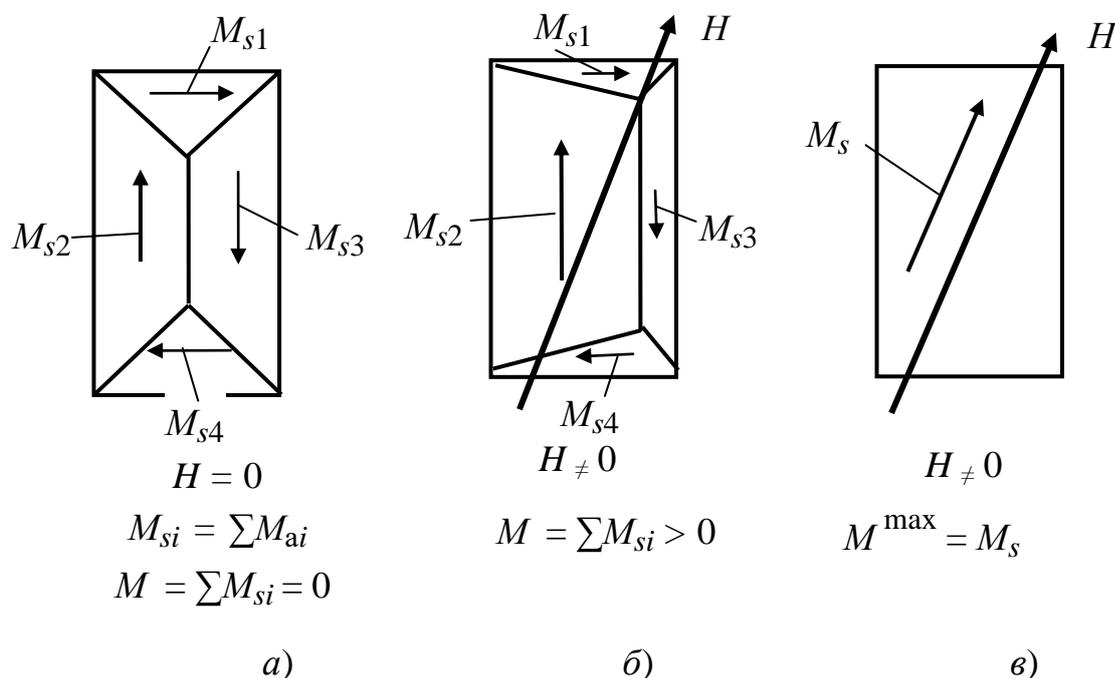


Рис. 5.3. Схема изменения доменной структуры ферромагнетика:
 а – без наложения магнитного поля; б – рост домена, где вектор намагниченности M_{s2} наиболее ориентирован в направлении вектора напряженности магнитного поля H ; в – образование однодоменной структуры

При наложении магнитного поля происходит рост размера тех доменов, где векторы намагниченности составляют минимальный угол с направлением вектора H – $\sum M_{si} > 0$ (рис. 5.3, б). В сильных полях доменная структура разрушается, каждый монокристалл или зерно становятся однодоменными, суммарный вектор намагниченности принимает максимальное значение M_s и ориентируется в направлении вектора H (рис. 5.3, в).

Ферромагнетики значительно усиливают внешнее магнитное поле.

5.3. Свойства ферромагнетиков

Магнитный гистерезис

Зависимость магнитной индукции B ферромагнетика от напряженности магнитного поля H имеет вид петли гистерезиса [2, 4, 9] (рис. 5.4).

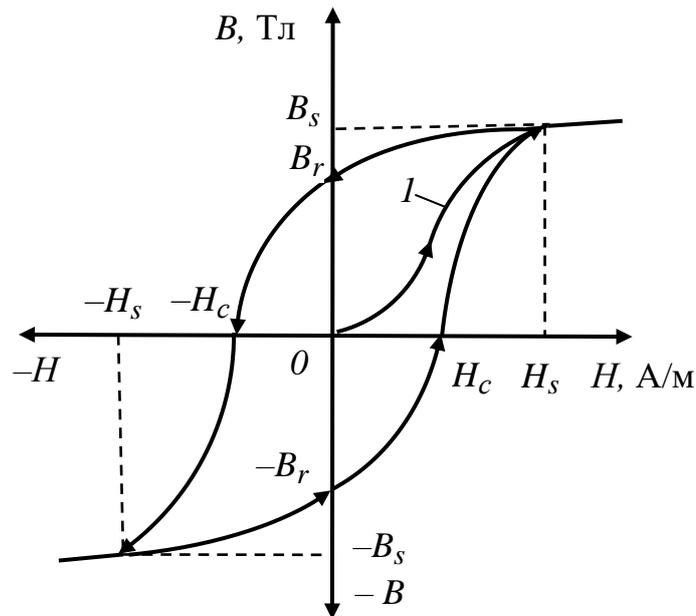


Рис. 5.4. Зависимость магнитной индукции B ферромагнетика от напряженности магнитного поля H : 1 – кривая начальной намагниченности; B_s – индукция насыщения; B_r – остаточная индукция; $-H_c$ – коэрцитивная сила [2, 4, 9]

При увеличении H B возрастает по кривой начальной намагниченности (1) и достигает индукции насыщения B_s . При последующем уменьшении H до 0 в веществе сохраняется остаточная намагниченность, характеризуемая остаточной индукцией B_r , так как остается частичная ориентированность векторов намагниченности доменов M_s в направлении поля. Если к веществу приложить поле с напряженностью $-H_c$, то магнитная индукция уменьшается до нуля.

Напряженность размагничивающего поля ($-H_c$), при которой магнитная индукция ферромагнетика становится равной 0, называется коэрцитивной силой.

Зависимость $\mu(H)$ для ферромагнетиков приведена на рис. 5.5. Значение μ определяется путем графического дифференцирования кривой

начальной намагниченности. Величина μ определяется как тангенс угла наклона прямой, проходящей через начало координат и точку на кривой начальной намагниченности. Зависимость $\mu(H)$ имеет экстремальный характер с максимумом (μ_{\max}).

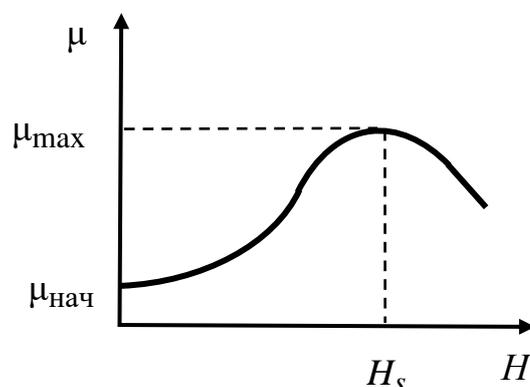


Рис. 5.5. Зависимость μ ферромагнетиков от напряженности магнитного поля H

Зависимость $\mu(T)$ для ферромагнетиков приведена на рис. 5.6.

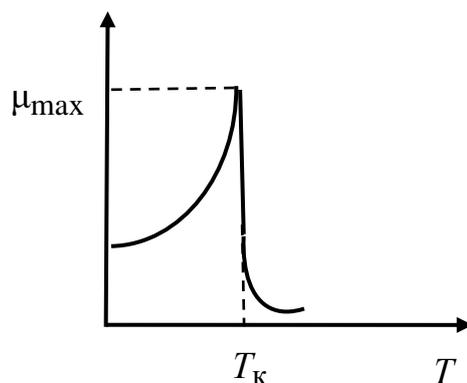


Рис. 5.6. Зависимость $\mu(T)$ для ферромагнетиков

При увеличении температуры до точки Кюри T_K μ растет до μ_{\max} , так как облегчаются процессы смещения доменных границ. При $T > T_K$ вследствие интенсивного теплового движения ионов доменная структура разрушается, ферромагнетик превращается в парамагнитное вещество и μ резко уменьшается.

Температура Кюри для Fe составляет 768 °С, для Co – 1131 °С, для Ni – 358 °С.

Магнитная анизотропия

При увеличении температуры до точки Кюри T_K μ растет до μ_{\max} , так как облегчаются процессы смещения доменных границ. При $T > T_K$ вследствие интенсивного теплового движения ионов доменная структура разрушается, ферромагнетик превращается в парамагнитное вещество и μ резко уменьшается.

Температура Кюри для Fe составляет 768 °С, для Co – 1131 °С, для Ni – 358 °С.

Магнитная анизотропия

Магнитная анизотропия – свойство магнитных материалов намагничиваться до насыщения при различных значениях напряженности магнитного поля в зависимости от кристаллографического направления [2, 9].

Например, в случае объемно-центрированной кубической кристаллической решетки, направлением «легкого» намагничивания является такое, которое совпадает с ребром куба, а направлением «трудного» намагничивания – совпадающее с диагональю куба (рис. 5.7).

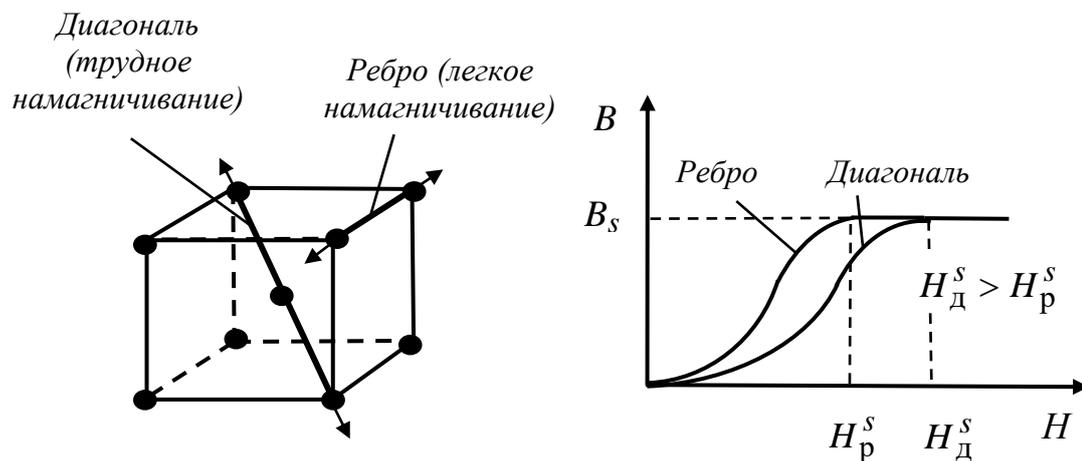


Рис. 5.7. Направления «легкого» и «трудного» намагничивания в кубической объемно-центрированной кристаллической решетке:

H_p^s , H_d^s – напряженности магнитного поля, при которых достигается индукция насыщения B_s при намагничивании в направлении ребра и диагонали, соответственно

Магнитострикция

Магнитострикция – изменение размеров или формы изделия из магнитного материала в процессе намагничивания.

Характеристики магнитострикции:

– коэффициент линейной магнитострикции:

$$\lambda_l = \pm \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (5.11)$$

где Δl – абсолютное изменение размера, l_0 – начальный размер изделия;

– коэффициент объемной магнитострикции:

$$\lambda_v = \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (5.12)$$

где ΔV – абсолютное изменение объема, V_0 – начальный объем изделия.

Потери энергии магнитного поля в магнитном материале

При перемагничивании материала в переменном магнитном поле часть энергии этого поля превращается в тепловую энергию, что проявляется в нагреве материала.

В материале возникают следующие виды удельных магнитных потерь.

Потери на гистерезис:

$$p_{\Gamma} = \eta B_m^n f, \text{ Вт/кг}, \quad (5.13)$$

где η – коэффициент, зависящий от природы материала, B_m – максимальная индукция в течение цикла намагничивания, $n = 1,6-2,0$ в зависимости от величины B_m , f – частота.

P_{Γ} определяется площадью под кривой гистерезиса.

Потери на вихревые токи:

$$p_f = \frac{1,64 \cdot B_m^2 f^2 h^2}{d\rho}, \text{ Вт/кг}, \quad (5.14)$$

где h – толщина элемента магнитопровода, d – плотность материала, ρ – удельное электрическое сопротивление материала.

Вихревые токи индуцируются в материале магнитным полем, возникающим вокруг обмоток электротехнического устройства.

Для уменьшения потерь на вихревые токи:

- используют материалы с большим значением ρ ;
- магнитопроводы изготавливают из тонких листов ферромагнитных материалов, изолированных друг от друга (уменьшение h);
- в порошковых магнитных материалах применяют электроизоляционные связующие, покрывающие его частицы (уменьшение h).

Антиферромагнетики

К ним относятся вещества доменного строения – Mn, Cr, CuO, NiO, FeO и др.

В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов в доменах ($m_{ai} \neq 0$) направлены в разные стороны (антипараллельны) и компенсируют друг друга – $M_{si} = 0$. Суммарная намагниченность вещества равна нулю – $\sum M_{si} = 0$.

При наложении магнитного поля образуются дополнительные магнитные моменты атомов, направленные в его сторону. *Вещества слабо усиливают внешнее магнитное поле.*

Ферримагнетики (ферриты)

Ферримагнетики – вещества доменного строения. Общая формула – $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – ион двухвалентного металла.

В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов в доменах направлены в разные стороны (антипараллельны), но не компенсируют друг друга – $M_{si} \neq 0$. M_{si} направлены в разные стороны и компенсируют друг друга. Суммарная намагниченность вещества равна нулю – $\sum M_{si} = 0$.

При наложении магнитного поля M_{si} ориентируются в его направлении поля. $\sum M_{si} \neq 0$. *Вещества значительно усиливают внешнее магнитное поле.*

5.4. Группы магнитных материалов

5.4.1. Магнитомягкие (легкоперемагничиваемые) материалы

Магнитомягкие материалы имеют следующие характерные свойства:

- узкую петлю гистерезиса;
- малые значения H_c (менее 4 кА/м);
- высокие значения μ и B_s .

Магнитомягкие материалы разделяют на низко- и высокочастотные.

Низкочастотные магнитомягкие материалы [2, 9]

1. *Технически чистое железо* (содержание примесей S, P, Si, C – 0,08–0,1 %, в том числе $C \leq 0,025$ %) и *электротехническая нелегированная низкоуглеродистая сталь* (содержание примесей $\leq 0,64$ %, в том числе $C \leq 0,04$ %).

Материалы имеют следующие магнитные характеристики: $B_s = 2,0\text{--}2,18$ Тл, $\rho = 0,1$ мкОм · м, $\mu = 10^3\text{--}10^4$, $H_c = 5\text{--}100$ А/м.

Их получают рафинированием чугуна в мартеновских печах.

Марки тонколистовой стали: Э – низкий сорт, ЭА – средний сорт, ЭАА – высший сорт.

Применение: для изготовления магнитопроводов трансформаторов, электромагнитов, электрических машин, работающих в постоянных магнитных полях ($f = 0$).

Недостатки: малое ρ , что вызывает большие потери на вихревые токи.

Увеличение чистоты железа позволяет улучшить его магнитные характеристики: μ повышается на два порядка, H_c уменьшается на два порядка, ρ и B_s не изменяются.

Производят следующие виды железа высокой чистоты:

– электролитическое железо ($C \approx 0,01$ %), получают электролизом Fe_2SO_4 или FeCl_3 ;

– карбонильное железо ($C = 0,005\text{--}0,01$ %), получают разложением $\text{Fe}(\text{CO})_5$;

– железо, отожженное в водороде ($C \leq 0,005$ %).

Железо высокой чистоты имеет повышенную стоимость, применяется для изготовления ответственных изделий небольших размеров.

2. *Легированная кремнистая электротехническая сталь* ($C \leq 0,05$ %, $\text{Si} = 0,4\text{--}4,8$ %).

Введение кремния увеличивает ρ в шесть раз (до 0,6 мкОм · м) и уменьшает H_c в пять раз по сравнению с нелегированной электротехнической сталью.

Применение: для изготовления магнитопроводов трансформаторов, электромагнитов, электрических машин, работающих при частотах до 400 Гц.

Маркировка: 1211, 2312, 3416 и др.

Три первые цифры – тип стали, четвертая – порядковый номер типа стали.

Первая цифра обозначает структурное состояние и вид прокатки стали: 1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – холоднокатаная анизотропная. Технологический процесс производства

холоднокатаной анизотропной стали включает холодную прокатку, вызывающую ориентацию зерен в ее направлении и отжиг в водороде при $t = 900\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ для уменьшения внутренних напряжений и увеличения размера зерна.

Вторая цифра указывает примерное содержание Si в %.

Третья цифра – группа по основной нормируемой характеристике, например: 1 указывает значение удельных потерь при $B = 1,7\text{ Тл}$ и $f = 50\text{ Гц}$, 2 – значение удельных потерь при $B = 1,5\text{ Тл}$ и $f = 400\text{ Гц}$.

Четвертая цифра – порядковый номер типа стали (чем больше цифра, тем меньше удельные потери и больше B_s).

После технологических операций изготовления магнитопроводов (резка, штамповка и др.) магнитные свойства материала ухудшаются – увеличивается H_c и P_f . Для восстановления этих свойств применяют отжиг при температуре ниже температуры фазового превращения ($880\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$) в среде, предохраняющей от окисления и науглероживания.

3. *Пермаллои* – сплавы – Fe + Ni + легирующие добавки (Mo, Cr, Ca, Mn, Si и др.).

Материалы имеют следующие магнитные характеристики: $B_s = 0,5\text{--}1,5\text{ Тл}$, ρ до $0,9\text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $\mu = 10^5\text{--}10^6$, $H_c = 0,3\text{--}30\text{ А/м}$.

Маркировка: 80НХС – сплав содержит 80 % Ni, < 1 % Cr, < 1 % Si.

Достоинства: высокие значения ρ и μ , малое значение H_c .

Недостатки:

– высокая стоимость;

– зависимость магнитных свойств от механических напряжений – под их действием уменьшается μ и увеличивается H_c . Поэтому при сборке магнитопроводов необходимо избегать ударов, сильной затяжки болтами, обмотками.

Применение: для изготовления магнитопроводов малогабаритных трансформаторов, реле, дросселей, деталей магнитных цепей, работающих при частотах до 25 кГц.

4. *Сплавы Fe + Co (20–50 %).*

Достоинства: сплавы имеют высокую температуру Кюри.

Применение: в роторах и статорах электрических машин, работающих при температурах до $900\text{ }^\circ\text{C}$.

5. *Альсиферы* – сплавы Fe + Al (5 %) + Si (10 %).

По свойствам близки к пермаллоям.

Достоинства: недефицитность компонентов, низкая стоимость.

Недостатки: высокая твердость и хрупкость, плохо обрабатываются давлением и резанием.

Изделия изготавливают методами литья и порошковой металлургии.

Применение: изготавливают детали магнитопроводов, магнитные экраны, корпуса приборов.

6. *Магнитные сплавы с особыми свойствами.*

6.1. *Пермаллой с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ).*

Используют в вычислительной технике и устройствах автоматического регулирования.

Материалы характеризуют коэффициентом прямоугольности α :

$$\alpha = \frac{B_r}{B_s} = 0,85 - 0,95. \quad (5.15)$$

Материалы с ППГ получают различными способами, в том числе:

– созданием кристаллографической текстуры путем холодной пластической деформации с большими степенями обжатия;

– созданием магнитной текстуры путем охлаждения материала после нагрева с закалочной температуры в магнитном поле (терромагнитная обработка).

6.2. *Сплавы с постоянной μ (не зависящей от напряженности магнитного поля).*

К этой группе относятся следующие сплавы:

– *перминвар* – Fe + Co (25 %) + Ni (45 %) + Mn (0,6 %); для этого сплава $\mu \approx 300$ при $H = 0-250$ А/м;

– *изотерм* – (Fe + Ni + Al + Cu); для этого сплава $\mu \approx 30-80$ при $H = 0-500$ А/м;

6.3. *Сплавы с особо высокой B_s .*

К этой группе относится сплав *пермендюр* – Fe + Co (50–70 %). Он имеет значение $B_s = 2,4$ Тл, наибольшее для всех ферромагнетиков.

6.4. *Сплавы с высокой магнитострикцией* (рис. 5.8) (сплавы: Fe – Pt, Fe – Co, Fe – Al и др.).

Сплавы применяются: в генераторах звуковых и ультразвуковых колебаний; для изготовления магнитострикционных вибраторов ультразвуковой обработки материалов; в устройствах для преобразования механических колебаний в электрические.

Высокочастотные магнитомягкие материалы

К этой группе материалов относятся *ферриты*. Ферриты [2, 9] имеют общую формулу: $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – ионы двухвалентных металлов: Mn^{++} , Fe^{++} , Ni^{++} , Zn^{++} и др.

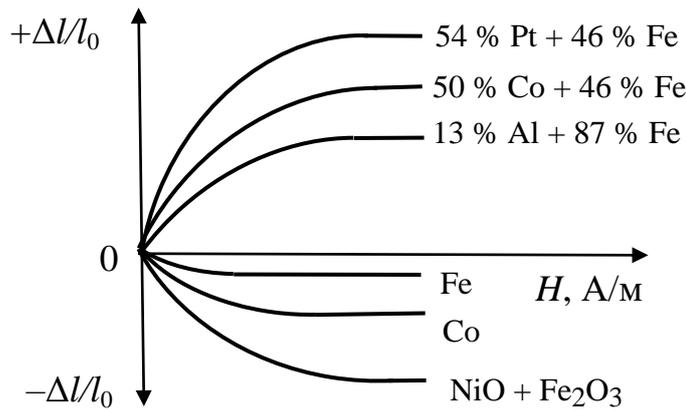


Рис. 5.8. Зависимость линейного коэффициента магнитострикции некоторых материалов от напряженности магнитного поля [2]

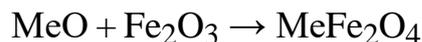
Достоинства: высокое электрическое сопротивление (10^3 – 10^{17} мКОМ · м), что позволяет их использовать при частотах более 800 МГц.

Недостатки:

- относительно низкие магнитные характеристики ($B_s < 0,4$ Тл, H_c до 2000 А/м);
- низкая температура Кюри – $t_k < 300$ °С;
- высокая твердость и хрупкость;
- низкая технологичность – резку, шлифование и полирование элементов магнитопроводов проводят только алмазным инструментом или ультразвуковой обработкой.

Технологический процесс изготовления деталей магнитопроводов включает:

- измельчение и смешение оксидов в шаровых или вибрационных мельницах;
- сушку оксидов;
- смешение оксидов со связующим, например с жидким стеклом;
- формование изделий прессованием или экструзией;
- обжиг при температуре 1100–1400°С, при этом протекает процесс ферритизации:



Производят ферриты различного назначения, в том числе:

- для радиочастот (0,1 – 300 МГц): $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ – марганцево-цинковый феррит и $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ – никель-цинковый феррит;
- для высоких (до 800 МГц) и сверхвысоких (> 800 МГц) частот (изготавливают из четырех и более оксидов: Fe_2O_3 , Li_2O , MgO , MoO , CoO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 и др);

– прямоугольной петлей гистерезиса для элементов вычислительной техники ($\alpha \approx 1$): $\text{MgO} \cdot 3\text{MnO} \cdot 3\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Элементы вычислительной техники изготавливают в виде тонких пленок путем испарения оксидов в вакууме или катодным распылением с осаждением на металлической, стеклянной или тканевой подложках.

5.4.2. Магнитотвердые (трудноперемагничиваемые) материалы

Магнитотвердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов и магнитных носителей информации [2, 6, 9].

Материалы имеют следующие характерные свойства:

- «широкую» петля гистерезиса;
- высокие значения H_c (более 4 кА/м, обычно в 10^3 – 10^4 больше, чем у магнитомягких материалов);
- высокие значения максимальной удельной магнитной энергии, отдаваемой материалом во внешнее пространство W_d^{\max} .

Рассмотрим, как определяется W_d^{\max} , анализируя зависимости напряженности размагничивающего магнитного поля в воздушном зазоре магнитопровода H от магнитной индукции материала B (кривая размагничивания) и удельной магнитной энергии в воздушном зазоре W_d от B и H (рис. 5.9).

Постоянный магнит в виде кольцевого сердечника не отдает магнитную энергию во внешнее пространство. Чтобы использовать эту энергию в магнитопроводе необходимо создать воздушный зазор. Каждой величине зазора на кривой размагничивания соответствует некоторая точка d . В зазоре возникает размагничивающее поле с напряженностью H_d , а индукция поля в материале уменьшается по сравнению с остаточной индукцией B_r до величины B_d (точка d , рис. 5.9).

Удельная энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство, определяется по выражению:

$$W_d = \frac{B_d H_d}{2}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}, \quad (5.16)$$

где B_d и H_d – магнитная индукция материала и напряженность размагничивающего магнитного поля, соответствующие W_d .

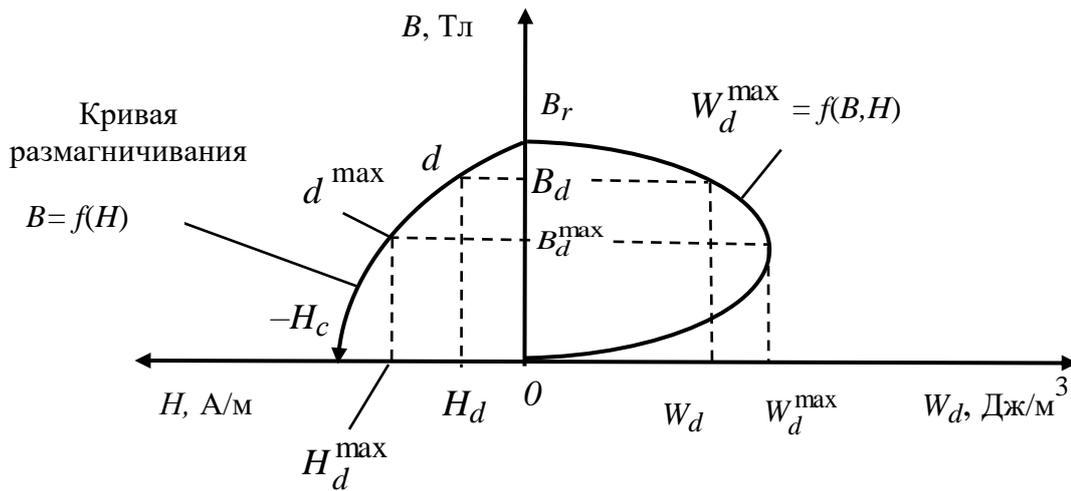


Рис. 5.9. Зависимости напряженности размагничивающего магнитного поля в воздушном зазоре магнитопровода H от магнитной индукции материала B (кривая размагничивания) и удельной магнитной энергии в воздушном зазоре W_d от B и H [2, 6, 9]

При увеличении зазора в магнитопроводе точка d будет смещаться по кривой размагничивания вниз, т.е. в сторону повышения напряженности размагничивающего поля H . При некотором зазоре, которому соответствует точка d^{\max} , W_d достигает максимального значения:

$$W_d^{\max} = \frac{B_d^{\max} H_d^{\max}}{2}, \quad (5.17)$$

где B_d^{\max} и H_d^{\max} – магнитная индукция материала и напряженность размагничивающего магнитного поля, соответствующие W_d^{\max} .

Группы магнитотвердых материалов

1. Легированные стали, закаленные на мартенсит

Состав: С – 0,7–1,1 %, Cr – до 10 %, W – до 6 %, Mo – до 2 %, Co – до 15 %, Fe – остальное.

Магнитные свойства: B_r – до 1 Тл, H_c – до 13,5 кА/м, $W_d^{\max} = 1–4$ кДж/м³.

Маркировка: например, EX9K15M. E – магнитотвердая сталь, X9 – 9% Cr, K15 – 15 % Co, M < 1 % Mo.

Достоинства: стали имеют низкую стоимость, хорошо обрабатываются резанием.

Недостатки: сравнительно низкие магнитные свойства.

2. Литые магнитотвердые сплавы

Состав: Al – 6,5–16 %, Ni – 12–35 %, Fe – остальное. В качестве легирующих компонентов, повышающих магнитные свойства материала, также могут содержать Si, Co, Ni, Cu, Nb, Ti и др.

Магнитные свойства: B_r – до 1,4 Тл, H_c – до 145 кА/м, W_d^{\max} – до 40 кДж/м³ (на порядок выше, чем у мартенситных сплавов).

Маркировка: например, ЮНДК35Т5. Ю – алюминий, количество не указывается; Н – никель, количество не указывается; Д < 1 % Cu; К35 – 35 % Co, Т5 – 5 % Ti, Fe – остальное.

Достоинства: сравнительно высокие магнитные характеристики.

Недостатки: повышенные твердость и хрупкость, обрабатываются только шлифованием и полированием, невозможность изготовления мелких деталей с точными размерами литьем, высокая стоимость.

3. Металлокерамические магниты

Магниты изготавливают из высокодисперсных порошков Al, Ni и Fe по металлокерамической технологии. Технология включает следующие операции: измельчение компонентов, смешение, прессование изделий и спекание при высокой температуре.

Достоинства: возможность изготовления деталей с точными размерами, которые не требуют дополнительной обработки.

4. Металлопластичные магниты

Состав: порошки Al, Ni, Fe + (10–30) % немагнитного связующего.

Магнитные свойства на 10–30 % ниже, чем у литых сплавов аналогичного состава ввиду наличия воздушных пор и включений немагнитных материалов.

Детали изготавливают методами глухого или проходного прессования, экструзией.

Металлопластичные магниты экономически выгодны при массовом автоматизированном производстве деталей сложной формы и малых размеров.

5. Магнитотвердые ферриты

Состав: наиболее широко применяется бариевый феррит $\text{BaO} \cdot 6 \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Маркировка: БИ – бариевый изотропный, БА – бариевый анизотропный.

Магнитные свойства: B_r – до 0,4 Тл, H_c – до 240 кА/м, W_d^{\max} – до 12,5 кДж/м³.

Достоинства: по сравнению с литыми сплавами имеют меньшие стоимость (в 10 раз) и плотность (в 1,5–2,0 раза).

Недостатки: высокая хрупкость, малая механическая прочность, сильная зависимость магнитных свойств от температуры – при температуре более 60 °С наблюдается необратимое ухудшение магнитных свойств.

6. Материалы для магнитной записи информации

К этой группе относятся следующие материалы:

– стали и сплавы для изготовления магнитной ленты (толщиной до 0,01 мм) и магнитной проволоки (диаметром до 0,1 мм), например викалой (Fe – 34 %, Co – 52 %, V – 14 %), этот материал имеет следующие параметры: $B_r = 1$ Тл, $H_c = 35$ кА/м;

– биметаллические ленты, состоящие из двух слоев: несущий слой, изготавливают из меди, в качестве слоя-носителя информации применяют сплавы Fe – Ni – Al;

– магнитные пленки:

- двухслойная пленка состоит из ацетатцеллюлозной или лавсановой основы, на которую нанесен слой ферромагнитного лака, где в качестве наполнителя используются ферромагнитные порошки оксидов железа – Fe_2O_3 или Fe_3O_4 ;

- однослойные пленки изготавливают из поливинилхлорида или другого полимера с магнитным наполнителем.

Недостатками металлических материалов являются высокая стоимость, трудность соединения отдельных частей ленты или проволоки, неоптимальное (для записи информации) соотношение H_c/B_r , которое должно быть порядка 85 кА/м·Тл. *Достоинством* материалов является высокая механическая прочность.

Преимуществом магнитотвердых пленок является легкость монтажа с помощью клея и оптимальное соотношение H_c/B_r .

7. Перспективные магнитотвердые материалы

Перспективными являются материалы на основе редкоземельных металлов: CeCo_5 , SmCo_5 , YCo и др. Они имеют высокие магнитные характеристики (H_c до 2000 кА/м, W_d^{\max} до 115 кДж/м³), сохраняют стабильность параметров в условиях вибраций и ударных нагрузок.

Контрольные вопросы к главе 5

1. Чем обусловлены магнитные свойства веществ?
2. Как называются материалы, атомы которых в отсутствие внешнего магнитного поля не имеют результирующего магнитного момента?
3. Какие вещества значительно усиливают внешнее магнитное поле?
4. Что называют доменами в ферромагнитных материалах?
5. Что показывает численное значение относительной магнитной проницаемости?
6. Что называется потерями энергии магнитного поля в магнитном материале?
7. В чем заключается явление гистерезиса в магнитных материалах?
8. Что называется точкой Кюри?
9. Какое явление называется магнитной анизотропией?
10. Чем различаются магнитомягкие и магнитотвердые материалы?
11. Назовите области применения магнитомягких и магнитотвердых материалов.
12. Какие материалы используют для изготовления магнитопроводов трансформаторов, работающих при частоте 50 Гц?
13. Какие материалы называются пермаллоями?
14. Где применяются магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса?
15. Какие материалы используют для изготовления магнитных носителей информации?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухарников, А.Е. Конструкционные материалы в электроэнергетике: конспект лекций / А.Е. Сухарников. – Казань: КГЭУ, 2007. – 208 с.
2. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2008. – 535 с.
3. Сироткин, О.С. Основы материаловедения: учеб. пособие / О.С. Сироткин. – М.: КНОРУС, 2015. – 264 с.
4. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие / Под ред. В.С. Чередниченко. – 5-е изд., стер. – М.: Омега – Л, 2009. – 752 с.
5. Материалы и элементы электронной техники: учебник в 2 т. Т. 1. Проводники, полупроводники, диэлектрики / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – М.: Академия, 2006. – 448 с.
6. Материалы и элементы электронной техники: учебник в 2 т. Т. 2. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – М.: Академия, 2006. – 384 с.
7. Антипов, Б.Л. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы / Б.Л. Антипов, В.С. Сорокин, В.А. Терехов; под ред. В.А. Терехова. – 3-е изд., стер. – СПб.: Изд-во «Лань», 2003. – 208 с.
8. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы: учебник для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
9. Мишин, Д.Д. Магнитные материалы: учеб. пособие для вузов / Д.Д. Мишин. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
10. Сироткин, О.С. Проводниковые и полупроводниковые материалы: учеб. пособие / О.С. Сироткин, Т.Б. Татаринцева, В.И. Уваров. – Казань: КГЭУ, 2008. – 154 с.
11. Сироткин, О.С. Электротехнические материалы. Диэлектрики: учеб. пособие / О.С. Сироткин, И.А. Женжурист. – Казань: КГЭУ, 2008. – 116 с.
12. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы: учеб. пособие / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин и др.; под ред. В.А. Филикова. – 3-е изд., испр. – М.: Академия, 2007. – 280 с.
13. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 1 т. – 386 с; 2 т. – 464 с; 3 т. – 728 с.

14. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 440 с.

15. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 518 с.

16. Сироткин, О.С. Материаловедение. Электротехнические материалы: лабор. практикум / О.С. Сироткин, А.Е. Сухарников, П.Б. Шibaев и др. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 156 с.

17. Дудкин, А.Н. Электротехническое материаловедение / А.Н. Дудкин, В.С. Ким. – СПб.: Лань, 2016. – 200 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/75509/>(дата обращения: 02.04.2019).

18. Сорокин, В.С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – СПб.: Лань, 2016. – 384с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71735/>(дата обращения: 02.04.2019).

19. Сироткин, О.С. Основы материаловедения: учеб. пособие / О.С. Сироткин. – Москва: КноРус, 2015. – 261 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.book.ru/book/918995/>(дата обращения: 02.04.2019).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ВЧ – высокочастотный (индуктор)
 Д – домен
 ВМС – высокомолекулярное соединение
 ЭТМ – электротехнические материалы
 ВЭС – высокоэластическое состояние
 ВТС – вязкотекучее состояние
 ВЗ – валентная зона
 ВУ – вязкость условная
 Г – гигроскопичность
 ГС – горячий спай
 ЗЗ – запрещенная зона
 ЗП – зона проводимости
 ЗТТТ – зонная теория твердого тела
 МД – междоменная область
 МММ – магнитомягкий материал
 МТМ – магнитотвердый материал
 НК – натуральный каучук
 ОЦК – объемно центрированная кубическая (кристаллическая решетка)
 П – влагопроницаемость
 ПМ – пластические массы
 СВЧ – сверхвысокочастотное (излучение)
 СОЭ – степень обобществления электронов
 СС – стеклообразное состояние вещества
 СХСС система химических связей и соединений
 СИП – самонесущий изолированный провод
 ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения
 ТМ – трансформаторное масло
 ХС – холодный спай
 ЭО – электроотрицательность

Обозначения основных величин

- $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона
 a_n, a_p – подвижности электронов и дырок
 B – магнитная индукция
 B_0 – внешняя магнитная индукция или индукция магнитного поля

в вакууме

B_c – собственная магнитная индукция вещества

B_s – индукция насыщения

B_r – остаточная индукция

C – емкость конденсатора

C_k, C_m, C_i – степени ковалентности, металличности и ионности химической связи

D – вектор электрического смещения

E – напряженность электрического поля.

$E_o, E_{и}, E_{д}$ – энергии ориентационного, индукционного и дисперсионного взаимодействий, соответственно

f – частота напряжения

e – заряд электрона

H – напряженность магнитного поля

H_c – коэрцитивная сила

h – постоянная Планка

I – ток

I_v – объемный ток

I_s – поверхностный ток

$I_{см}$ – ток смещения

I_c – емкостной ток

$I_{абс}$ – ток абсорбции

I_a – активный ток

I_p – реактивный ток

$I_{аа}$ – активный ток абсорбции,

$I_{ар}$ – реактивный ток абсорбции,

R – активное сопротивление

R_v – объемное сопротивление элемента диэлектрика

R_s – поверхностное сопротивление элемента диэлектрика

j – плотность тока

j_n – плотность тока, обусловленная электронной проводимостью

j_p – плотность тока, обусловленная дырочной проводимостью

k – постоянная Больцмана

k_m – магнитная восприимчивость вещества

l – длина

M – намагниченность вещества:

M_s – магнитный момент домена

- m_e – масса электрона
 m_a – магнитный момент атома
 m_o – орбитальный магнитный момент электрона
 m_c – спиновый магнитный момент электрона
 m_d – дополнительный магнитный момент электрона
 n – степень полимеризации, концентрация носителей заряда
 n_n – концентрация электронов в полупроводнике
 n_p – концентрация дырок в полупроводнике
 P – поляризованность диэлектрика
 p_H – магнитные потери на гистерезис
 pf – магнитные потери на вихревые токи
 Q – количество тепла, заряд
 q – электрический заряд
 q_n – заряд электрона в полупроводнике
 q_p – заряд «дырки» в полупроводнике
 R – электрическое сопротивление
 r – плечо диполя
 S – площадь
 T – температура абсолютная
 TK_l – температурный коэффициент линейного расширения
 TK_ρ – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления
 T_H – температура горячего спая термопары
 T_X – температура холодного спая термопары
 T_θ – температура Дебая
 $T_{всп}$ – температура вспышки
 t – температура
 $t_{пл}$ – температура плавления
 $t_{кип}$ – температура кипения
 t_k – температура Кюри
 U – напряжение электрическое
 U_H – контактная разность потенциалов горячего спая термопары
 U_X – контактная разность потенциалов холодного спая термопары
 V – объем
 v_n и v_p – средние скорости упорядоченного движения электронов и дырок в полупроводнике под действием электрического поля

v_T – средняя скорость теплового движения электрона

$W_э$ – энергия электрона

W_d – удельная магнитная энергия в воздушном зазоре магнитопровода

$W_{и}$ – энергия ионизации

W_c – сродство к электрону

X_c – реактивное сопротивление

α – поляризуемость диэлектрика

δ – угол диэлектрических потерь

ε – относительная диэлектрическая проницаемость

ε_0 – электрическая постоянная

η – коэффициент динамический вязкости или коэффициент внутреннего трения

χ – диэлектрическая восприимчивость вещества

θ – краевой угол смачивания

λ – средняя длина свободного пробега электрона, коэффициент теплопроводности

λ_l – коэффициент линейной магнитострикции

λ_v – коэффициент объемной магнитострикции

μ – дипольный момент, относительная магнитная проницаемость вещества

μ_0 – магнитная постоянная или постоянная Генри

ν – частота колебаний, коэффициент кинематической вязкости

ρ – удельное электрическое сопротивление, плотность вещества

τ – время

τ_p – время релаксации

σ – плотность электрического заряда

σ_v – удельная объемная проводимость

σ_s – удельная поверхностная проводимость

σ_n и σ_p – удельные проводимости полупроводника, обусловленные электронами и дырками

φ – угол сдвига фаз между векторами тока и напряжения

ψ – волновая функция, относительная влажность

ω – угловая частота

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	4
1.1. Классификация электротехнических материалов по электромагнитным свойствам и назначению	4
1.2. Типы связей между структурными частицами вещества	5
1.3. Типы зарядов в веществах	8
1.4. Строение полимеров	9
1.4.1. Классификация высокомолекулярных веществ и полимеров	9
1.4.2. Реакции полимеризации и поликонденсации	10
1.4.3. Кристаллические и аморфные полимеры	11
1.4.4. Полярные и неполярные полимеры	12
1.4.5. Физические состояния аморфных полимеров	13
1.4.6. Термопластичные и термореактивные полимеры	14
1.5. Зонная теория твердого тела	15
1.6. Классификация электротехнических материалов по характеру химических связей	17
Глава 2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	20
2.1. Классификация диэлектриков	20
2.2. Поляризация диэлектриков	20
2.2.1. Характеристики процесса поляризации диэлектриков	20
2.2.2. Виды поляризации диэлектриков	23
2.3. Электропроводность диэлектриков	37
2.3.1. Основное уравнение электропроводности	37
2.3.2. Слабое и сильное электрические поля	38
2.3.3. Сопротивление и проводимость диэлектриков	39
2.3.4. Электропроводность газообразных диэлектриков	40
2.3.5. Электропроводность жидких диэлектриков	42
2.3.6. Электропроводность твердых диэлектриков	45
2.4. Диэлектрические потери	49
2.4.1. Токи в диэлектрике	49
2.4.2. Диэлектрические потери при постоянном напряжении	50
2.4.3. Угол диэлектрических потерь	51
2.4.4. Диэлектрические потери при переменном напряжении	53

2.4.5. Виды диэлектрических потерь	53
2.4.6. Диэлектрические потери в газообразных диэлектриках	54
2.4.7. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках	55
2.4.8. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках	59
2.5. Электрическая прочность диэлектриков	63
2.5.1. Характеристики пробоя диэлектриков	63
2.5.2. Виды пробоя диэлектриков	64
2.5.3. Электрическая прочность газообразных диэлектриков	67
2.5.4. Электрическая прочность жидких диэлектриков	73
2.5.5. Электрическая прочность твердых диэлектриков	74
2.6. Физико-химические и механические свойства диэлектриков ...	79
2.6.1. Тепловые свойства диэлектриков	79
2.6.2. Механические свойства диэлектриков	82
2.6.3. Влажностные свойства диэлектриков	83
2.6.4. Химические свойства диэлектриков	84
2.7. Газообразные диэлектрики	85
2.7.1. Функции и свойства газообразных диэлектриков	85
2.7.2. Виды газообразных диэлектриков	86
2.8. Жидкие диэлектрики	88
2.8.1. Функции и свойства жидких диэлектриков	88
2.8.2. Нефтяные электроизоляционные масла	88
2.8.3. Синтетические трудногорючие и негорючие жидкости	91
2.8.4. Диэлектрические жидкости растительного происхождения	93
2.9. Твердые диэлектрики	93
2.9.1. Полимеры	93
2.9.2. Пластические массы	99
2.9.3. Слоистые пластики	100
2.9.4. Электротехнические резины	101
2.9.5. Керамические диэлектрики	105
2.9.6. Электротехническое неорганическое стекло	107
2.9.7. Электроизоляционные лаки, эмали и компаунды	111
2.9.8. Электротехнические бумаги и картоны	112
2.9.9. Слюдяные материалы	113
2.9.10. Активные диэлектрики	115
Глава 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	117
3.1. Классификация полупроводников	117
3.2. Собственные и примесные полупроводники	118
3.3. Электропроводность полупроводников	121

3.4. Технологии очистки и получения монокристаллических полупроводников	124
3.5. Свойства полупроводниковых материалов	129
3.5.1. Простые полупроводники	129
3.5.2. Карбид кремния	132
Глава 4. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	134
4.1. Классификация проводниковых материалов	134
4.2. Характеристики проводниковых материалов	134
4.3. Зависимость удельного сопротивления проводников от различных факторов	135
4.4. Виды проводниковых материалов	138
4.4.1. Металлы и сплавы высокой проводимости	139
4.4.2. Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением ..	142
4.4.3. Контактные материалы	144
4.4.4. Сверхпроводники и криопроводники	145
4.4.5. Сплавы для термопар	148
4.4.6. Припой	149
4.4.7. Неметаллические проводниковые материалы	150
Глава 5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	153
5.1. Магнитные характеристики материалов	153
5.2. Классификация веществ по магнитным свойствам	154
5.3. Свойства ферромагнетиков	158
5.4. Группы магнитных материалов	162
5.4.1. Магнитомягкие (легкоперемагничиваемые) материалы	162
5.4.2. Магнитотвердые (трудноперемагничиваемые) материалы .	167
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	172
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	174
ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН	174

Учебное издание

Сухарников Александр Евгеньевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

Кафедра материаловедения и технологии материалов КГЭУ

Редактор *М.С. Беркутова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 03.04.2019.
Формат 60 ×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 6,56. Заказ № 236/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51