

ФГБОУ ВПО СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ПРИВАЛОВ Е.Е.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Ставрополь
«ПАРАГРАФ»
2015

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент Боровлев И.И.
и кандидат технических наук, доцент Аникуев С.В.
(кафедра теоретических основ электротехники СтГАУ)

Привалов Е.Е.

Электротехническое материаловедение: Учебное пособие - Ставрополь: ПАРАГРАФ, 2015. – 233с.

В пособии изложены основы теории по электроизоляционным, проводниковым, полупроводниковым и магнитным материалам электроэнергетического оборудования сельскохозяйственных и промышленных объектов. Приведены электрические, тепловые, механические, химические и другие характеристики проводников, диэлектриков, полупроводников и магнитов, даны области применения материалов в электроустановках различного назначения. Выложен тестовый материал для подготовки к экзамену и зачету.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям: 140400.62 и 110800.62, а также лаборантов, мастеров производственного обучения, инженеров, аспирантов и преподавателей.

УДК 621.3

© Привалов Е.Е. 2015
© ПАРАГРАФ, 2015

ВВЕДЕНИЕ

В учебных курсах «Электротехническое материаловедение» и «Электротехнические материалы» общепрофессионального и профессионального циклов рассмотрены свойства материалов в электромагнитном поле электроустановок низкого, среднего и высокого напряжения, являются базовыми при подготовке бакалавров, инженеров и магистров.

Все вещества в природе по поведению в электрическом и магнитном полях условно делят на четыре класса: проводники, полупроводники, диэлектрики и магниты. В первой главе учебного пособия рассматривается класс проводников электрического тока с последующим изучением в других частях свойств полупроводников, диэлектриков и магнитов. Методика пособия позволяет лучше понять систему логических связей с точки зрения последовательности изучения свойств новых конструкционных и электротехнических материалов, введения новых терминов.

Изложение учебного материала дисциплины построено по единой схеме, включающей в себя раскрытие физической сущности явлений и процессов, происходящих в конструкционных и электротехнических материалах при их взаимодействии с электрическими и магнитными полями электроустановок. Изучение электрических свойств электротехнических материалов в типовых условиях эксплуатации электроустановок напряжением до и выше 1кВ, а также обзор наиболее важных областей применения материалов в электротехнических изделиях.

На практике учебные курсы являются базой для многих специальных дисциплин для бакалавров инженеров и магистров, то научно-методическое содержание пособия направлено на формирование у будущих бакалавров и специалистов принципов инженерного подхода к оценке возможностей выбора конструкционных и электротехнических материалов для элементов электроустановок, правильного монтажа и эксплуатации оборудования объектов различного назначения.

В современной России научно-технический прогресс в различных областях народного хозяйства связан с разработкой и использованием новых, более совершенных композитных материалов, особенно проводниковых, полупроводниковых и электроизоляционных. Надежность, экономичность, стойкость к перепадам температур, ударам, вибрациям и другим вредным воздействиям на электротехнические изделия и оборудование определяются не столько конструкцией, сколько использованными в электроустановках материалами. История развития цивилизации показывает, что все важные эпохи были названы по материалам, которые являлись в то время определяющими: каменный, медный, бронзовый и железный века. Возможно, что последующие эпохи будут названы нашими потомками пластиковым и керамическим веками.

Важным условием успешного развития народного хозяйства России является разработка и внедрение высококачественных электротехнических материалов. Системная автоматизация электроэнергетического оборудования объектов сельскохозяйственной отрасли не является исключением. Электроснабжение наряду с другими видами снабжения сельского хозяйства предъявляет высокие требования к качеству и надежности используемых конструкционных, проводниковых, изоляционных, полупроводниковых и магнитных материалов. Для выполнения поставленных требований к электротехническим материалам необходимо сотрудничество многих организаций в сельском хозяйстве. Поэтому наука об электротехнических материалах представляет собой типичную комплексную научную дисциплину, то при подготовке дипломированных бакалавров, инженеров и магистров должно уделяться большое внимание.

Научной задачей электротехнического материаловедения, в части проектирования композитных материалов является обеспечение возможности создания современных электроустановок на основе требуемых материалов для использования в системах электроснабжения.

Техническая задача при разработке материалов состоит в уменьшении размеров и массы электроэнергетического оборудования при одновременном увеличении надежности системы электроснабжения объекта в целом. Для решения задачи повышения эффективности электроэнергетического оборудования есть различные пути, где основным является комплексная модернизация существующих электроустановок за счет применения изделий из современных композитных электротехнических материалов.

Целью дисциплины является приобретение студентами знаний в области электротехнического материаловедения как составной части материаловедения. Задачи дисциплины состоят в изучении природы и физико-химических характеристик основных групп электротехнических и конструкционных материалов, а также физического смысла показателей и параметров электротехнических материалов. Третьей задачей является приобретение навыков работы с техническими регламентами, различными стандартами и справочниками для выбора современных качественных конструкционных и электротехнических материалов.

Дисциплина «Электротехническое материаловедение» является базовой для изучения таких общепрофессиональных и профессиональных дисциплин как – «Диагностика электроэнергетического оборудования», «Электрические машины», «Электрические и электронные аппараты», «Монтаж электроэнергетического оборудования», «Ремонт электроэнергетического оборудования», «Эксплуатация систем электроснабжения» и т.д.

ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОУДОВАНИЯ

1.1. Классификация, области применения и требования к материалам электроэнергетического оборудования

Материалы, применяемые в электроустановках, условно подразделяют на три группы: электротехнические, конструкционные и специального назначения.

Электротехническими называют материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств.

Конструкционными материалами электроэнергетического оборудования являются металлы и металлические сплавы, которые постепенно в электротехнике вытесняются неметаллическими материалами, например, пластмассами и полимерами.

Под металлами в технике понимают вещества, обладающие металлическим блеском, высокой пластичностью, прочностью, тепло- и электропроводностью. Однако такими свойствами обладают не только чистые металлы, но и металлические сплавы, состоящие из нескольких металлов. Поэтому в электротехнике металлические сплавы также можно называть металлами, имея в виду их общие характерные свойства.

Несмотря на достигнутые в создании и использовании неметаллических материалов (пластмассы, полимеры и др.), основными конструкционными материалами еще долгое время будут оставаться металлы и металлические сплавы.

Материалы специального назначения применяются в электроэнергетическом оборудовании, которое эксплуатируется в тяжёлых условиях, например, в космосе. Практически различные материалы подвергаются воздействиям как отдельно электрических или магнитных полей, так и их совокупности.

По поведению в магнитном поле электротехнические материалы подразделяют на две группы - сильномагнитные и слабомагнитные. Первые нашли особенно широкое применение в электроэнергетическом оборудовании благодаря их магнитным свойствам.

Электротехнические материалы. По поведению в электрическом поле материалы подразделяют на три группы: проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические. Большинство электротехнических материалов можно отнести к слабомагнитным или практически немагнитным. Однако и среди сильномагнитных следует различать проводящие, полупроводящие и практически непроводящие.

Проводниковыми называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная электропроводность. Их применение в технике обусловлено в основном этим свойством, определяющим высокую удельную электрическую проводимость при нормальной температуре.

Полупроводниковыми называют материалы, являющиеся по удельной проводимости промежуточными между проводниковыми и диэлектрическими материалами. Их отличительным свойством является сильная зависимость удельной проводимости от концентрации вида примесей или различных дефектов, а также от внешних энергетических воздействий (температуры, освещенности и т.п.).

Диэлектрическими называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Диэлектрик ближе к идеальному материалу, если у него удельная проводимость стремится к минимуму и слабо выражены механизмы поляризации, связанные с рассеиванием электрической энергии и выделением теплоты. При применении диэлектриков - одного из наиболее обширных классов электротехнических материалов - четко определилась необходимость использования как пассивных, так и активных свойств этих материалов.

Пассивные свойства диэлектрических материалов используются, когда их применяют в качестве электроизоляционных материалов и диэлектриков конденсаторов обычных типов. Электроизоляционными материалами называют диэлектрики, которые не допускают утечки электрических зарядов и с их помощью отделяют электрические цепи электроэнергетического оборудования друг от друга. Если материал используется в качестве диэлектрика конденсатора электрической цепи, то желательно, чтобы этот материал имел большую диэлектрическую проницаемость.

Активными (управляемыми) диэлектриками являются особые материалы электроэнергетического оборудования - сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электролюминофоры и др.

На практике к проводникам электроэнергетического оборудования относят группу материалов с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, а к диэлектрикам - материалы, у которых $\rho > 10^4$ Ом·м. Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материалов, а также от условий их эксплуатации может изменяться в пределах 10^{-5} - 10^8 Ом·м.

Известно, что хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Из 105 химических элементов лишь двадцать пять являются неметаллами, причем двенадцать элементов могут проявлять полупроводниковые свойства. Но кроме элементарных веществ существуют тысячи химических соединений, сплавов или композиций со свойствами проводников, полупро-

водников или диэлектриков Четкую границу между значениями удельного сопротивления различных классов материалов провести достаточно сложно.

Области применения металлов и металлических сплавов в электроэнергетическом оборудовании очень разнообразны, остановимся на некоторых из них. Стали и чугуны являются основными конструкционными материалами, применяемыми в электротехнической промышленности (станины электрических машин, опоры линии электропередач, корпуса трансформаторов с масляным и воздушным охлаждением и др.).

Специальные электротехнические стали необходимы для изготовления магнитопроводов трансформаторов, сердечников электрических машин и аппаратов. Промышленность страны выпускает марки листовой электротехнической стали с различными магнитными и электрическими свойствами. Данные стали очень чувствительны к деформации. Резка, штамповка и другие технологические операции ухудшают магнитные свойства стали вблизи мест наклепа.

Цветными сплавами являются все сплавы кроме сплавов сталей и чугунов. Среди них сплавы алюминия и сплавы меди нашли самое широкое применение в качестве электротехнических материалов при изготовлении электрических машин, трансформаторов (обмотки, токосъемные механизмы) и электрической проводки (кабели, провода, шнуры).

Требования к конструкционным материалам электроэнергетического оборудования на основе железа и его сплавов, а также цветных сплавов определяются исходя из назначения данных материалов. В наше время новые конструкционные и электротехнические материалы редко могут появляться в результате удачного опыта. Необходимо предварительное изучение физических, механических и химических характеристик таких веществ, которые могли бы быть использованы в качестве требуемых технических материалов.

Для понимания электрических и магнитных свойств, механической прочности и других их особенностей необходимо исследовать структуру и химический состав электротехнических материалов на основе металлов. Совокупность научно-технических знаний о физико-химической природе, методах исследования и изготовления различных материалов составляет основу материаловедения, ведущая роль которого в настоящее время широко признана во многих областях техники и промышленности Успехи материаловедения позволили перейти от использования уже известных к целенаправленному созданию новых электротехнических материалов электроэнергетического оборудования с заранее заданными свойствами, например, на основе графена.

1.2. Особенности строения твердых тел

Большинство материалов электроэнергетического оборудования представляют собой твердые тела. Поэтому особое внимание уделяется строению вещества в этом состоянии.

Кристаллы. Представлению о порядке в мире атомов отвечает кристаллическая решетка с периодическим электростатическим полем. Периодичность структуры является наиболее характерным свойством кристаллов. В периодической решетке можно выделить элементарную ячейку, транслируя которую в пространстве легко получить представление о структуре всего кристалла. Образование каким-либо элементом или соединением определенной пространственной решетки в основном зависит от размеров атомов и электронной конфигурации их внешних оболочек.

Русский ученый Е. С. Федоров почти за 40 лет до того, как были разработаны методы рентгеноструктурного анализа, теоретически рассчитал расположения частиц в кристаллических решетках различных веществ. Геометрически возможны лишь 14 различных пространственных решеток, являющихся основой шести кристаллических систем, приведенных на рисунке 1.1 и в таблице 1.1.

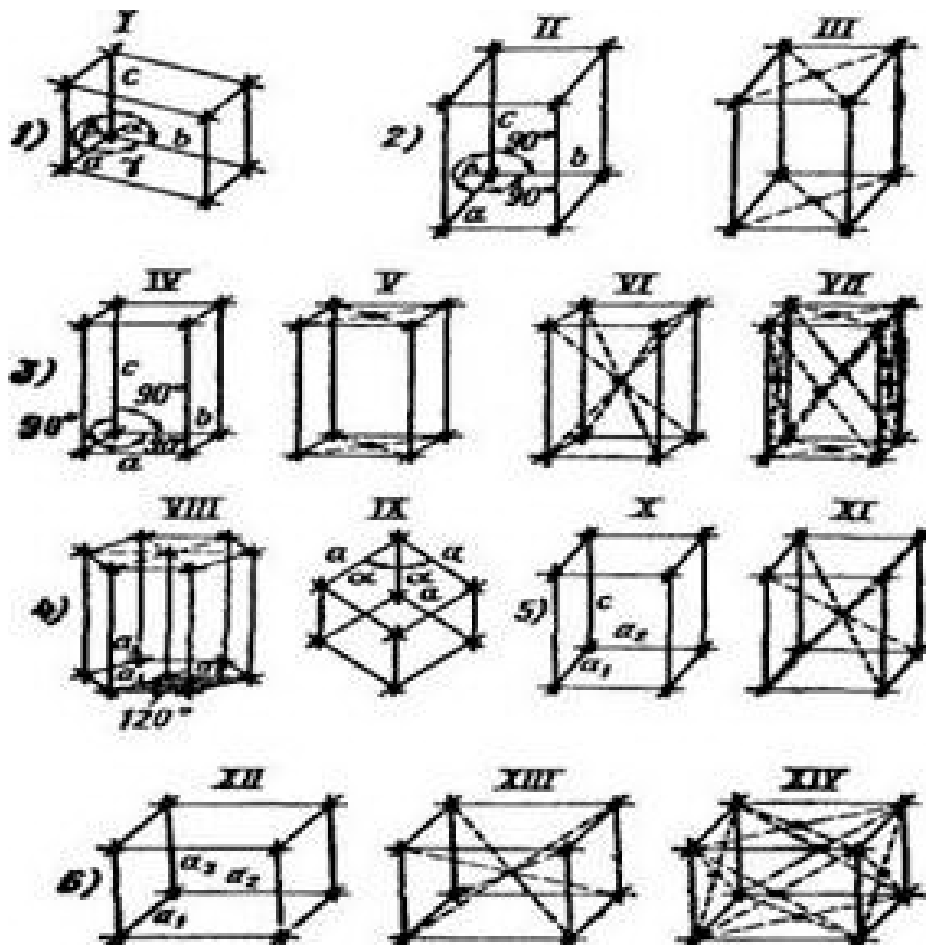


Рисунок 1.1 – Пространственные решетки кристаллических систем

Таблица 1.1 – Пространственные решетки основных кристаллических систем

№	Кристаллическая система	Пространственная решетка	Соотношение между осевыми углами и осевыми единицами
1	Триклинная	I – простая	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$
2	Моноклинная	II – простая III – базоцентрированная	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ;$ $\beta \neq 90^\circ;$
3	Ромбическая	IV – простая V – базоцентрированная VI – объемно-центрированная VII – гранецентрированная	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4	Гексагональная	VIII – простая IX – ромбоэдрическая	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ$
5	Тетрагональная	X – простая XI – объемно-центрированная	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6	Кубическая	XII – простая XIII – объемно-центрированная XIV – гранецентрированная	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Иногда считают ромбоэдрическую, или тригональную, систему самостоятельной седьмой системой. Кристаллические тела могут быть в виде отдельных крупных кристаллов - монокристаллов или состоять из совокупности большого числа мелких кристалликов (зерен). Монокристаллы характеризуются анизотропией свойств. В поликристаллических телах анизотропия в большинстве случаев не наблюдается.

Промежуточным является блочное строение твердого тела. При определении электрических, механических и других свойств монокристаллов надо указывать расположение кристаллографических плоскостей и направления в кристаллах.

Дефекты в строении кристаллических тел. Кристаллов с идеально правильным строением в природе не существует. В реальных условиях всегда наблюдаются те или иные отклонения от регулярного расположения частиц. Такие отклонения принято называть дефектами структуры. Их условно подразделяют на две группы: динамические (временные) и статические (постоянные).

Динамические дефекты в материалах возникают при механических, тепловых и электромагнитных воздействиях на кристалл или при прохождении потока частиц высокой энергии. Видом динамических дефектов являются фононы – временные искажения регулярности решетки, вызванные тепловым движением атомов.

Среди статических дефектов различают атомные (точечные) и протяженные несовершенства структуры. Атомные дефекты могут проявляться в виде незанятых узлов решетки – вакансий, в виде смещений атома из узла в междоузлие, в виде внедрения в решетку чужеродного атома или иона. К протяженным дефектам относятся дислокации, поры, трещины, границы зерен, микровключения другой фазы. Слово «дислокация» в переводе на русский язык означает «смещение».

Простейшими видами дислокаций являются краевая и винтовая дислокации. Некоторые разновидности дефектов показаны на рисунке 1.2.

Относительная концентрация атомных дефектов может быть небольшой, но изменения физических свойств кристалла, вызываемые ими, могут быть огромными. Например, тысячные доли атомного процента некоторых примесей могут изменять электрическое сопротивление чистых полупроводниковых кристаллов в 10^5 – 10^6 раз. Протяженные дефекты структуры оказывают сильное влияние на механические свойства кристаллов.

Полиморфизм. Некоторые твердые вещества обладают способностью образовывать не одну, а две и более кристаллические структуры, устойчивые при различных температурах и давлениях. Такое свойство материалов называют полиморфизмом, а кристаллические структуры называют полиморфными формами. Полиморфизм распространен среди материалов и имеет важное значение при их обработке и эксплуатации.

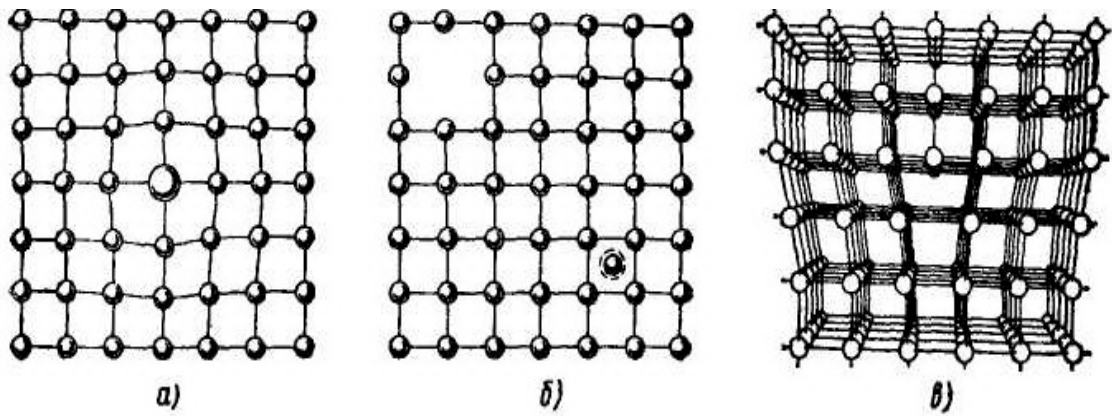


Рисунок 1.2 – Дефекты кристаллической решетки:

a) – посторонний атом в узле решетки; *б)* – пустой узел (вакансия) и собственный атом в междоузлии; *в)* – перспективное изображение расположения атомов около краевой дислокации

Стекла и другие аморфные тела. Не все твердые тела имеют кристаллическую структуру, хотя кристаллическое состояние большинства твердых тел является естественным, потому что энергия при упорядоченном расположении атомов меньше, чем в случае их нерегулярного расположения, а любая система стремится перейти в состояние с минимальной свободной энергией.

Однако атомы не всегда имеют возможность располагаться упорядоченно в процессе затвердевания. Препятствием этому может быть резкое уменьшение скорости диффузии атомов при охлаждении среды. Твердые тела, которые характеризуются случайным хаотичным расположением частиц, называют аморфными.

В отличие от кристаллов аморфные тела изотропны по свойствам, не имеют определенной температуры плавления и характеризуются широким температурным интервалом размягчения.

Примером аморфных веществ могут служить стекла и многие пластики. В стеклах при отсутствии периодичности в строении можно наблюдать определенный ближний порядок, т. е. закономерное расположение ближайших соседей относительно каждого атома.

Стеклообразное состояние можно рассматривать как состояние сильно переохлажденной жидкости, т. е. жидкости с очень высокой вязкостью. Именно высокая вязкость ограничивает диффузионную активность атомов и препятствует образованию кристаллической фазы.

1.3. Механические свойства электротехнических материалов

Механическими свойствами материалов называют свойства, которые выявляются испытаниями при воздействии внешних нагрузок. Определяют следующие свойства материалов: упругость; пластичность; прочность; твердость; вязкость; усталость; трещиностойкость; хладостойкость; жаропрочность и т. д. Величины параметров определяющие механические свойства необходимы для выбора материалов и их технологической обработки, а также расчетов на прочность конструкций, контроля и диагностирования их состояния в процессе эксплуатации электроэнергетического оборудования.

При испытаниях стремятся воспроизвести такие условия воздействия на материал, которые имеют место в процессе эксплуатации. Многообразие условий использования материалов вызывает необходимость механических испытаний. Механические свойства конструкционных и электротехнических материалов чаще всего проверяют испытаниями на растяжение. Для этого используют образцы стали с рабочей частью в виде цилиндра или стержня с прямоугольным сечением, а также образцы сплавов меди и алюминия.

Перед испытанием образец проводникового материала закрепляют в вертикальном положении в захватах специальной испытательной машины. В процессе исследования диаграммный механизм стенда непрерывно регистрирует первичную диаграмму растяжения в координатах «Нагрузка [P]» - абсолютное удлинение образца [ΔL] (рисунок 1.3).

На диаграмме растяжение пластичных материалов выделим участки:

- OA – прямолинейный, соответствующий упругой деформации при возрастании нагрузки;
- AB – криволинейный, соответствующий упруго - пластической деформации при возрастании нагрузки;
- BC - криволинейный, соответствующий упруго - пластической деформации при снижении нагрузки.

При переходе от упругой деформации к упруго - пластической может появиться горизонтальный участок AA' , который называют площадкой текучести (рисунок 1. 3, *a*), например, у алюминия.

Однако многие электротехнические материалы деформируются при растяжении без площадки текучести (рисунок 1. 3, *б*). После достижения максимальной нагрузки в наиболее слабом месте образец утончается. В этом месте, так называемой шейке, происходит окончательное разрушение образца с разделением его на две части (точка C диаграммы).

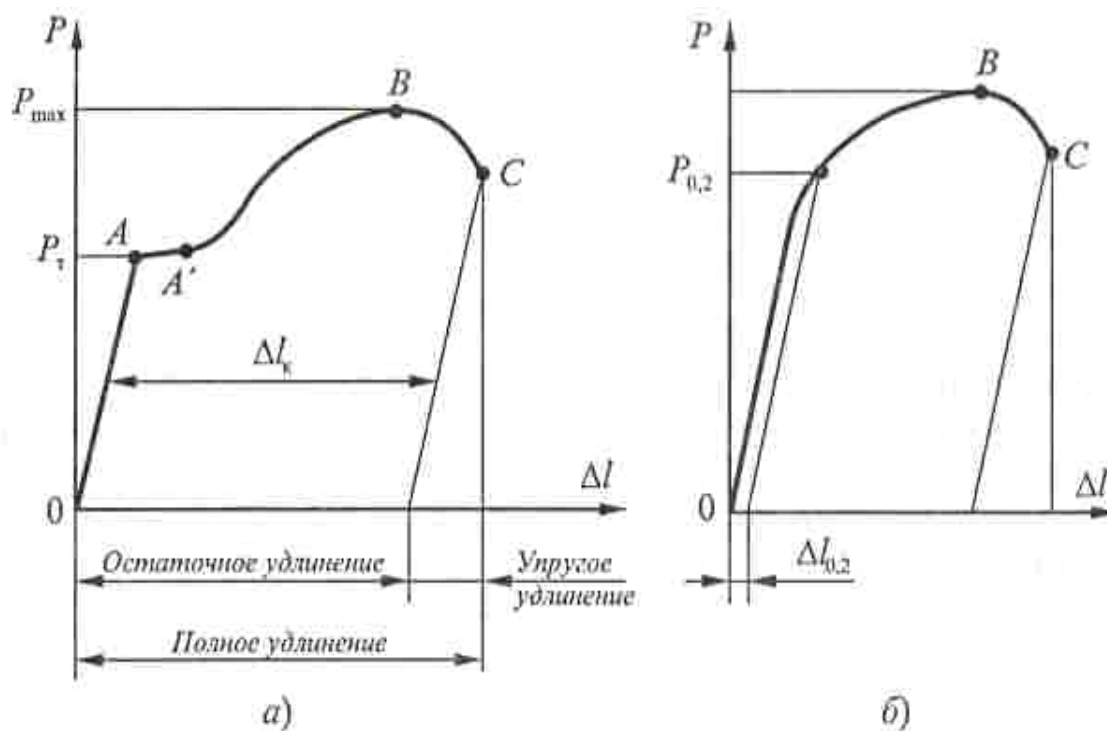


Рисунок 1.3 - Первичные диаграммы растяжения пластичных материалов: *а* – с площадкой (AA') текучести; *б* – без площадки текучести.

Показатели прочности. Прочность – свойство материала сопротивляться деформации или разрушению. Показатели прочности характеризуются не прилагаемой нагрузкой P , а удельными величинами, где учитывается площадь поперечного сечения образца F в некоторый момент его растяжения.

Предел текучести (физический) G_T – это наименьшее напряжение, при котором материал пластически деформируется (течет) без заметного изменения нагрузки (Н / мм²):

$$G_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (1.1)$$

где P_T – нагрузка, соответствующая площадке текучести на диаграмме;
 F_0 – площадь начального поперечного сечения образца.

Если на диаграмме растяжения нет площадки текучести (рисунок 3,б), то задаются допуском на остаточную деформацию образца и определяют условный предел текучести.

Условный предел текучести $G_{0,2}$ – это напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % начальной расчетной длины образца (Н/мм²):

$$G_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (1.2)$$

где $P_{0,2}$ – нагрузка, соответствующая остаточному удлинению $\Delta L_{0,2} = 0,002L_0$.

Временное сопротивление (предел прочности) G_B – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{\max} предшествующей разрыву образца (Н/мм²):

$$G_B = \frac{P_{\max}}{F_0}. \quad (1.3)$$

Показатели пластичности. Пластичностью называется свойство материалов необратимо изменять свою форму и размеры под действием внешней нагрузки, которое в сочетании с высокой прочностью делает металлы основными конструкционными материалами электроустановок.

Относительное удлинение после разрыва δ – отношение приращения расчетной длины ΔL_K образца после разрыва к ее первоначальной длине (%):

$$\delta = \left(\frac{\Delta L_K}{L_0} \right) \cdot 100 = \frac{L_K - L_0}{L_0} 100. \quad (1.4)$$

Удлинение δ зависит от кратности образца. Чем меньше кратность, тем больше величина δ . Это объясняется влиянием шейки образца, где имеет место, сосредоточенное удлинение. Поэтому символ δ имеет индекс, указывающий кратность образца, например δ_5, δ_{10} .

Относительное сужение после разрыва ψ – отношение уменьшения площади поперечного сечения ΔF_K образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения (%):

$$\psi = \frac{\Delta F_K}{F_0} 100 = \frac{F_0 - F_K}{F_0} 100. \quad (1.5)$$

В отличие от относительного удлинения сужение не зависит от кратности образца, т.к. в этом случае деформацию оценивают в наиболее узком сечении.

Твердость – свойство материала оказывать сопротивление деформации при внедрении индентора (наконечника) в его поверхность.

Испытание на твердость – самый простой вид механических испытаний твердых материалов электроэнергетического оборудования. Распространение получили статические методы испытания на твердость при вдавливании индентора в поверхность электротехнического материала на основе металла методами Бринелля, Виккерса и Роквелла. Для измерения твердости тонких слоев материалов применяют метод микротвердости, который отличается от метода Виккерса использованием малых стандартных нагрузок вдавливания: 0,049; 0,098; 0,196; 0,49; 0,98; 1,962; 4,9 Н.

Для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению применяют испытания на ударный изгиб образцов с надрезом, в результате которых определяют ударную вязкость. Ударная вязкость оценивается работой, затраченной на ударный излом образца, отнесенной к площади его поперечного сечения в месте надреза. Испытывая на ударную вязкость серию одинаковых образцов, выявляют их стойкость к холоду, путем снижения температуры от комнатной до заданной отрицательной. Температура, при которой происходит определенное падение ударной вязкости материала, называется критической температурой хрупкости.

1.4. Виды химической связи материалов

Основными элементарными частицами, из которых построены все известные нам вещества, являются протоны, нейтроны и электроны. Из протонов и нейтронов состоят атомные ядра; электроны заполняют оболочки атома, компенсируя положительный заряд ядра. Атом водорода состоит из одного протона и одного электрона (рисунок 1.4).

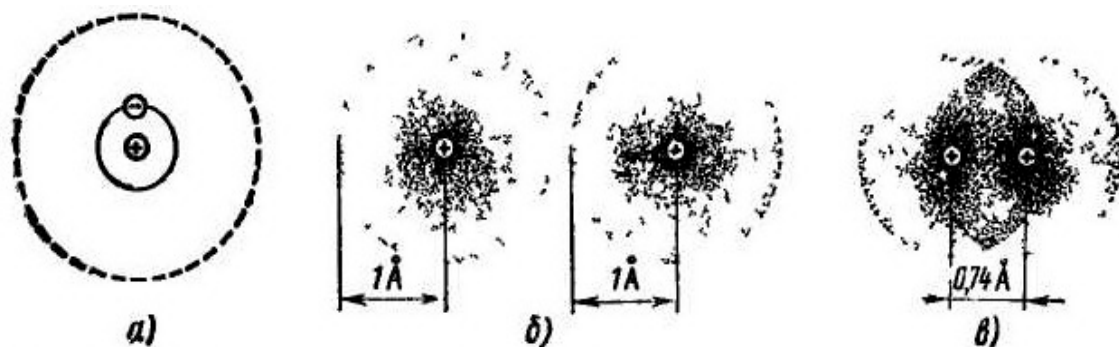


Рисунок 1.4 – Структура атома и молекулы водорода: *a* – простейшая планетарная модель атома водорода; *б* – квантомеханическая модель электронной структуры двух уединенных атома водорода; *в* – квантомеханическая модель электронной структуры молекулы водорода (точками показана плотность заряда электрона)

В простейшей планетарной модели атома этот электрон вращается по орбите вокруг ядра атома (рисунке 1.4, *a*). В квантовой механике движение

электрона описывается волновой функцией, обладающей в изолированном атоме водорода сферической симметрией, так что заряд электрона диффузно распределен, образуя размытое облако (рисунок 1.4, б).

Воспользуемся приближенной моделью атома водорода. Условный график зависимости энергии от радиуса орбиты, на которой находится электрон в такой модели, показан на рисунке 1.5.

Отрицательная потенциальная энергия \mathcal{E}_n при нахождении электрона на определенной орбите графически изображается расстоянием по вертикали вниз до орбиты от верхнего горизонтального пунктира ($\mathcal{E} = 0$). Положительная кинетическая энергия электрона \mathcal{E}_k показана стрелкой, направленной вверх от орбиты.

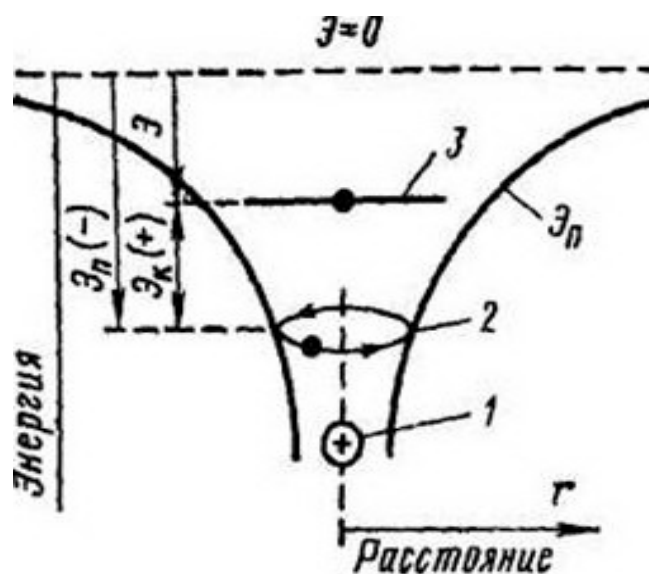


Рисунок 1.5 – Энергетические соотношения для простейшей модели атома водорода: 1 – ядро; 2 – орбита с электроном; 3 – энергетический уровень электрона

Для таких систем значение положительной кинетической энергии частиц на стабильной круговой орбите всегда равно половине отрицательной потенциальной энергии. Полная энергия данной системы \mathcal{E} изображена стрелкой, направленной вниз от уровня $\mathcal{E} = 0$.

Энергия электрона на любой из разрешенных орбит атома водорода показана на рисунке 1.3, где уровни имеют соответственно спектроскопические обозначения, а атом находится в таком энергетическом состоянии, которое определяется нахождением электрона на третьем снизу энергетическом уровне.

В соответствии с законом о минимуме потенциальной энергии системы, электрон переходит в состояние наиболее низкой энергии либо одним скачком, либо последовательными переходами с задержками на промежуточных уровнях.

При переходах излучаются кванты энергии, равные разности энергий соответствующих уровней. Спектры уединенных атомов характеризуются линиями и называются линейчатыми. Дискретная (линейчатая) природа энергетического спектра изолированных атомов подтверждена многочисленными экспериментами по исследованию поглощения и излучения паров различных веществ.

Атомы, ионы, молекулы. Газы, жидкие и твердые тела состоят из атомов, молекул или ионов. Размеры атомов порядка одного или нескольких ангстрем ($1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{ м}$), размеры положительных ионов - атомов, лишенных части электронов (меньше, чем атомов), и размеры отрицательных ионов, присоединивших дополнительные электроны (больше чем размеры соответствующих атомов), нескольких элементов показаны на рисунке 1.6.

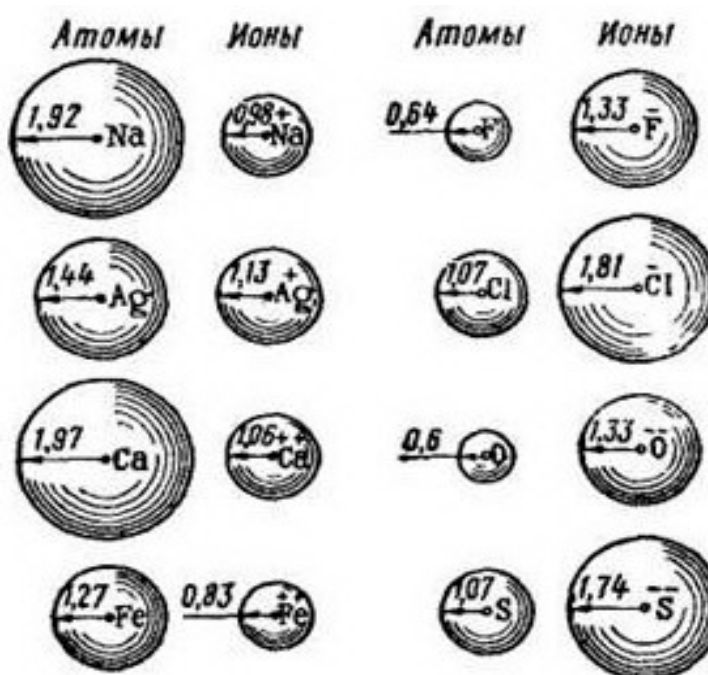


Рисунок 1.6 – Размеры атомов, положительных и отрицательных ионов элементов в ангстремах

При сближении атомов до расстояния порядка нескольких ангстрем между ними проявляются силы взаимодействия. В зависимости от характера движения электронов в соседних атомах эти силы могут быть силами отталкивания или притяжения.

В последнем случае атомы могут соединяться с выделением энергии, образуя устойчивые химические соединения. Электроны внутренних полностью заполненных оболочек прочно связаны с ядром и не участвуют в образовании химических связей.

Химические свойства атомов определяются строением внешней, не полностью заполненной электронами оболочки. Электроны, находящиеся во внешней оболочке, называют валентными.

Различают несколько видов химической связи.

Гомеополярная (ковалентная) связь. При этой связи у веществ объединение атомов в молекулу достигается за счет электронов, которые становятся общими для пар атомов. Плотность отрицательно заряженного электронного облака между положительно заряженными ядрами получается наибольшей.

Пример молекулы H_2 дан на рисунке 1.4, *в*. Такую связь называют гомеополярной или ковалентной. Следует отметить, что перекрытие электронных облаков, приводящее к обобществлению электронов, не сводится к простому наложению друг на друга двух электронных орбит, а сопровождается существенным перераспределением электронной плотности и изменением энергии системы.

При обобществлении электронов происходит втягивание электронных облаков в пространство между ядрами. Появление состояния с повышенной плотностью электронного заряда в межъядерном пространстве и приводит к возникновению сил притяжения.

В основе гомеополярной связи лежит обменное взаимодействие или обменный эффект, обусловленный обменом атомов электронами и имеющий чисто квантовую природу. Силы такого взаимодействия называют обменными силами, а их энергия - обменной энергией.

Особенностью обменных сил является их сильная зависимость от направления спинов электронов, осуществляющих связь между взаимодействующими атомами. Связь будет сильной только в том случае, если спины анти параллельны. Гомеополярные связи определенным образом ориентированы в пространстве и образуются только между ближайшими соседними атомами.

Молекулы с гомеополярной связью бывают неполярными или полярными (дипольными) в соответствии с симметричным или асимметричным строением.

Молекулы, в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, называют неполярными. Если же в молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают, то такие молекулы называют полярными или дипольными.

Примеры неполярной и полярной молекул показаны на рисунке 1.7.

Дипольная молекула характеризуется некоторым дипольным моментом, который определяется произведением заряда на расстояние между центрами положительных и отрицательных зарядов.

Заряд молекулы $q = 2 \cdot 10^{-19}$ Кл, расстояние $l = (1 - 3) \cdot 10^{-10}$ м.

Дипольные моменты молекул $p = 5 \cdot 10^{-29} - 10^{-30}$ единиц СИ.

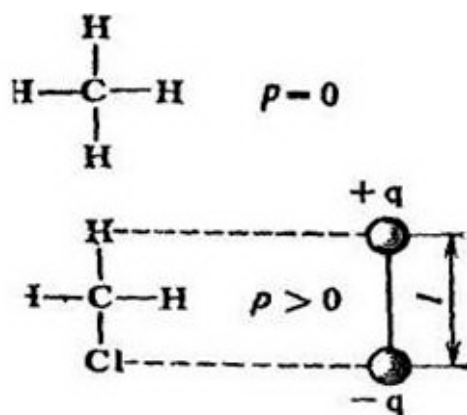


Рисунок 1.7 – Схемы неполярной (симметричной) и полярной (несимметричной) молекул

Гомеоплярная связь типична для органических молекул. Связь может наблюдаться и у твердых веществ неорганического происхождения, если их кристаллические решетки состоят из атомов. Примерами подобных веществ являются алмаз, кремний (*Si*), германий (*Ge*), карбид кремния (*SiC*) и др. Структура алмаза показана на рисунке 1.8, где каждый атом образует четыре связи со своими ближайшими соседями.

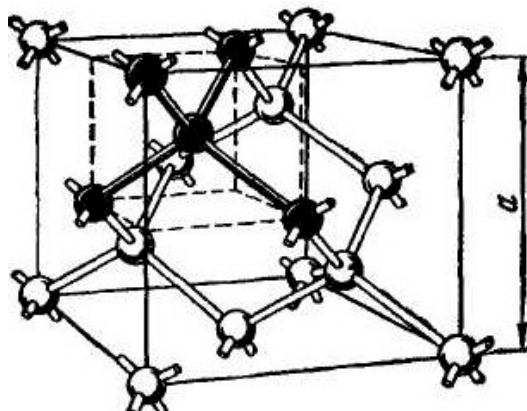


Рисунок 1.8 – Структура алмаза (германия или кремния)

Ковалентная связь характеризуется высокой прочностью. Подтверждением этому является высокая твердость и высокая температура плавления таких веществ как алмаз, карбид кремния.

Гетерополярная (ионная) связь возникает вследствие перехода валентных электронов от металлического атома к металлоидному, а также при электростатическом притяжении разноименно заряженных ионов друг к другу. Этот вид химической связи реализуется в ионных кристаллах. Примером ионных кристаллов являются галоидные соли щелочных металлов.

На рисунке 1.9 показаны структуры кристаллов хлористого натрия и хлористого цезия.

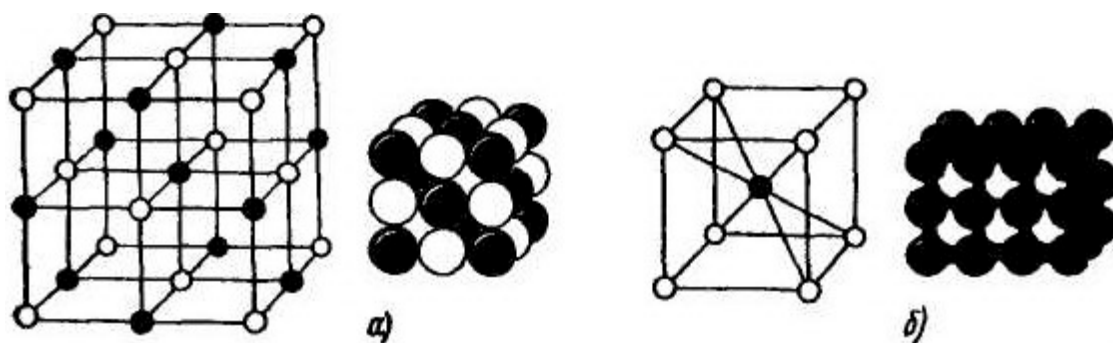


Рисунок 1.9 – Структура и плотная упаковка ионов хлористого натрия (*a*); структура и неплотная упаковка ионов хлористого цезия (*b*)

Ионные решетки характеризуются высоким координационным числом, показывающим количество ближайших ионов противоположного знака. Например, для кристаллов $NaCl$ координационное число равно 6, а для кристаллов $CsCl$ - 8. В ионном кристалле комбинации противоположно заряженных ионов нельзя отождествлять с индивидуальными молекулами вследствие регулярного чередования в узлах решетки ионов различного сорта. Правильнее считать весь монокристалл ионного соединения одной гигантской молекулой, в которой каждый ион испытывает сильное воздействие со стороны всех соседних частиц. Способность атомов захватывать электрон при образовании химической связи характеризуется его электрической отрицательностью. Наименьшей электрической отрицательностью обладают атомы щелочных металлов, которые легко отдают электрон и отличаются малой энергией сродства. Наоборот, максимальную величину электрической отрицательности имеют атомы галогенов, которые принимают электрон для завершения внешней электронной оболочки. Чем больше разность электрических отрицательностей атомов, участвующих в образовании химической связи, тем больше степень ионности соединения.

Металлическая связь. Она существует в системах, построенных из положительных атомных остовов, находящихся в среде свободных коллективизированных электронов (рисунке 1.10, *a*). Притяжение между положительными атомными остовами и электронами обуславливает целостность металла.

Металлическую связь можно рассматривать как ковалентную связь, поскольку в её основе лежит обобществление внешних валентных электронов. Специфика металлической связи состоит в том, что в обобществлении электронов участвуют все атомы кристалла, и обобществленные электроны не локализируются вблизи своих атомов, а свободно перемещаются внутри всей кристаллической решетки, образуя «электронный газ».

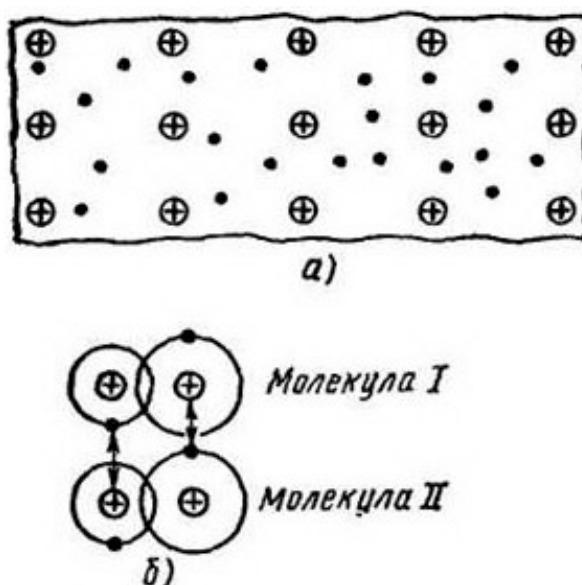


Рисунок 1.10 – Схема строения металлического проводника (*а*);
образования межмолекулярной связи (*б*)

Не имея локализованных связей, металлические кристаллы (в отличие от ионных) не разрушаются при изменении положений атомов, т.е. им свойственна пластичность (ковкость) при деформациях. Благодаря наличию свободных электронов, металлы обладают хорошей электропроводностью и теплопроводностью.

Молекулярная связь или *связь Ван-дер-Ваальса*, наблюдается у ряда веществ между молекулами с ковалентным характером внутримолекулярного взаимодействия. Наличие межмолекулярного притяжения (рисунок 1.10, *б*) возможно при согласованном движении валентных электронов в соседних молекулах.

В любой момент времени электроны должны быть максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительным зарядам (ядрам). Тогда силы притяжения валентных электронов ядром соседней молекулы оказываются сильнее сил взаимного отталкивания электронов оболочек этих молекул. Подобное притяжение между флуктуирующими электрическими диполями получило название дисперсионного взаимодействия.

Связь Ван-дер-Ваальса является наиболее универсальной, она возникает между любыми частицами, но это и наиболее слабая связь, т.к. энергия такой связи примерно на два порядка ниже энергий ионной и ковалентной связей.

Поскольку дисперсионное взаимодействие оказывается очень слабым, молекулярные связи четко проявляются лишь в тех случаях, когда они возникают между атомами или молекулами. Молекулярная связь легко разрушается тепловым движением.

1.5. Энергетические зоны и уровни твердых материалов

Зонная теория является основой современных представлений о механизмах различных физических явлений, происходящих в твердом кристаллическом веществе электроэнергетического оборудования при воздействии на него электромагнитного поля.

Зонная теория твердого тела - теория валентных электронов, движущихся в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки. Рассмотрим схемы энергетических диаграмм атома и твердого тела (рисунок 1.11).

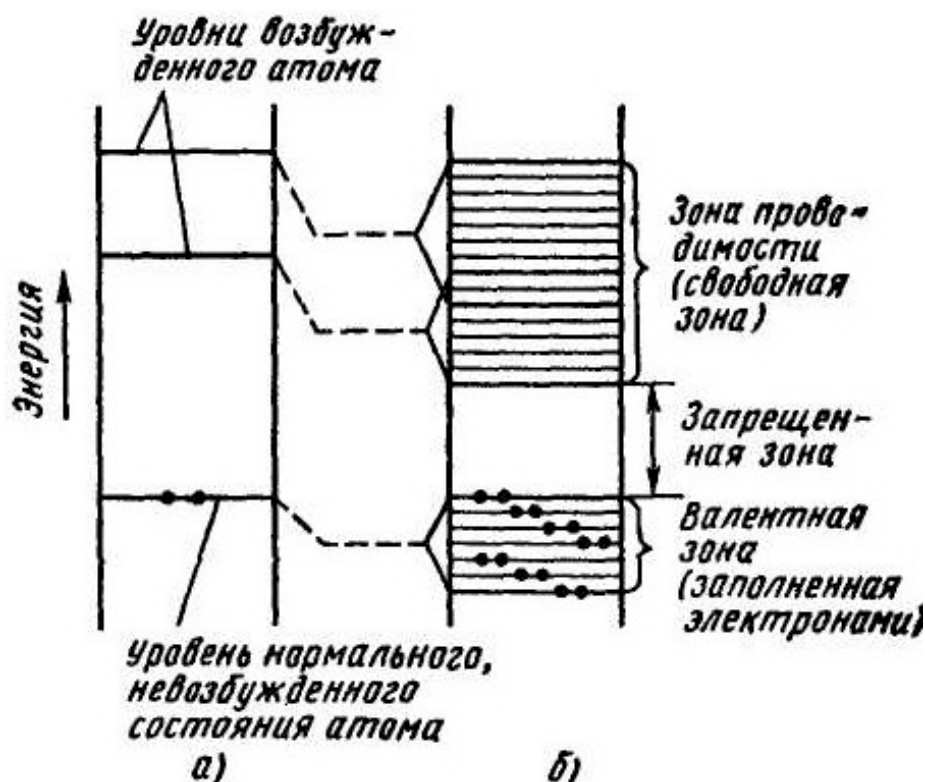


Рисунок 1.11 – Схема расположения энергетических уровней:
а – уединенного атома; б - неметаллического твердого тела

Отдельные атомы имеют дискретный энергетический спектр, т.е. электроны могут занимать лишь вполне определенные энергетические уровни. Часть этих уровней заполнена при нормальном, невозбужденном состоянии атома, на других уровнях электроны могут находиться только тогда, когда атом подвергнется внешнему энергетическому воздействию, т. е. когда он возбужден. Стремясь к устойчивому состоянию, атом излучает избыток энергии в момент перехода электронов с возбужденных уровней на уровни, на которых его энергия минимальна.

Если имеется система из N одинаковых атомов, достаточно удаленных друг от друга (например, газообразное вещество), то взаимодействие между

атомами практически отсутствует и энергетические уровни электронов остаются без изменений.

Обменное взаимодействие. При конденсации газообразного вещества в жидкость, а затем при образовании кристаллической решетки твердого тела все имеющиеся у атомов данного типа электронные уровни смещаются вследствие действия соседних атомов друг на друга. В частности, притяжение электронов одного атома ядром соседнего снижает высоту потенциального барьера, разделяющего электроны в уединенных атомах.

Главное состоит в том, что при сближении атомов происходит перекрытие электронных оболочек, а это в свою очередь существенно изменяет характер движения электронов. Благодаря перекрытию оболочек электроны могут без изменения энергии посредством обмена переходить от одного атома к другому, т. е. перемещаться по кристаллу.

Обменное взаимодействие имеет чисто квантовую природу и является следствием неразличимости электронов. В этом случае уже нельзя говорить о принадлежности того или иного электрона определенному атому - каждый валентный электрон принадлежит всем атомам кристаллической решетки одновременно. Таким образом, при перекрытии электронных оболочек происходит обобществление электронов.

Энергетические зоны. Вследствие обменного взаимодействия дискретные энергетические уровни изолированного атома расщепляются на энергетические зоны, как это показано для неметаллического твердого тела на рисунке 12, б.

Разрешенные энергетические зоны разделены запрещенными интервалами энергии. Ширина разрешенных энергетических зон не зависит от размеров кристалла, а определяется лишь природой атомов, образующих твердое тело, и симметрией кристаллической решетки.

Обозначим через \mathcal{E}_A энергию обменного взаимодействия между двумя соседними атомами. Поскольку энергия \mathcal{E}_A зависит от степени перекрытия электронных оболочек, то уровни энергии внутренних оболочек, которые сильнее локализованы вблизи ядра, расщепляются меньше, чем уровни валентных электронов. Ширина разрешенных зон при перемещении вверх по энергетической шкале возрастает, а величина запрещенных энергетических зазоров соответственно уменьшается.

Каждая зона состоит из множества энергетических уровней. Очевидно, их количество определяется числом атомов, составляющих твердое тело. Экспериментальные данные показывают, что энергетическая протяженность зоны валентных электронов не превышает единиц электрон-вольт, и энергетическая зона характеризуется непрерывным спектром.

Достаточно ничтожно малого энергетического воздействия, чтобы вызвать переход электронов с одного уровня на другой, если там имеются свободные состояния.

Распределение электронов. В соответствии с принципом Паули на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, причем с противоположным направлением спинового магнитного момента. Поэтому число электронных состояний в зоне оказывается конечным и равным числу соответствующих атомных состояний. Конечным будет и число электронов, заполняющих данную энергетическую зону, что играет важную роль в формировании энергетического спектра кристалла.

Подобно энергетическим уровням в изолированных атомах энергетические зоны могут быть полностью заполненными, частично заполненными и свободными. Внутренние оболочки в изолированных атомах заполнены, поэтому соответствующие им зоны также оказываются заполненными. Самую верхнюю из заполненных электронами зон называют валентной. Эта зона соответствует энергетическим уровням электронов внешней оболочки в изолированных атомах. Ближайшую к ней свободную, незаполненную электронами зону называют зоной проводимости. Взаимное положение этих двух зон определяет большинство процессов, происходящих в твердом теле.

Энергетическая диаграмма углерода. На рисунке 1.12 показана схема образования энергетических зон при сближении атомов для алмаза - одной из модификаций чистого углерода (элемента IV группы таблицы Д. И. Менделеева).

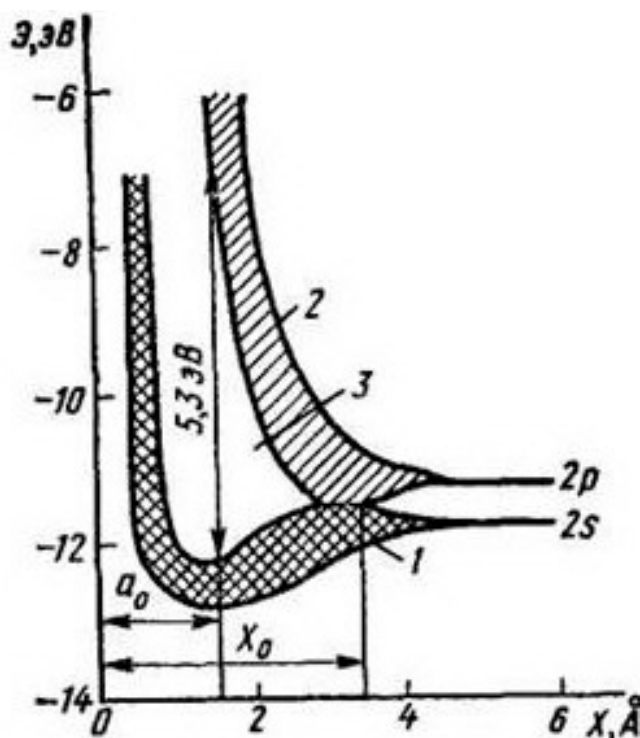


Рисунок 1.12 – Схема образования энергетических зон при сближении атомов углерода: 1 – объединенная валентная зона; 2 – объединенная зона проводимости; 3 – запрещенная зона; a_0 – расстояние между атомами в решетке алмаза; x_0 – расстояние между атомами при котором имеется совпадение зон

В уединенных атомах углерода четыре валентных электрона располагаются по два на уровнях $2s$ и $2p$. При сближении атомов уровни расщепляются в обособленные зоны с вместимостью 2 и 6 электронов.

При сближении до расстояния X_0 образуется одна объединенная не полностью заполненная зона с вместимостью 8 электронов на атом. Такое твердое тело (например, графит) проводит электрический ток. При уменьшении межуатомных расстояний до значений, соответствующих периоду решетки алмаза a_0 , эта объединенная зона расщепляется на две зоны, каждая с вместимостью 4 электрона на атом.

Кристалл алмаза не содержит свободных электронов и является диэлектриком, т.к. эти две зоны разделены большой запрещенной зоной с энергией 5,3эВ. При этом 4 валентных электрона углерода размещаются в нижней зоне, заполняя ее полностью, а верхняя, зона проводимости, свободна.

Аналогично происходит процесс образования зон у полупроводников кремния и германия, которые имеют решетку типа алмаза. Различие лишь в ширине запрещенной зоны: у кремния и германия она существенно меньше, чем у алмаза.

1.6. Энергетические зоны электротехнических материалов

Характер энергетического спектра у твердых электротехнических материалов - металлических проводников, полупроводников и диэлектриков различен. В металлических проводниках валентная зона заполнена не полностью или перекрывается с зоной проводимости.

В полупроводниках и диэлектриках зона проводимости и валентная зона разделены некоторым энергетическим зазором, называемым запрещенной зоной. Формально к полупроводникам относят вещества, у которых запрещенная зона меньше 3эВ. Вещества с более широкой запрещенной зоной относят к диэлектрикам.

На практике, у диэлектриков, применяемых в электроэнергетическом оборудовании ширина запрещенной зоны может достигать 10эВ. Различие схем энергетических зон у диэлектриков, полупроводников и металлических проводников показано на рисунке 1.13.

Согласно зонной теории, электроны валентной зоны имеют одинаковую свободу движения во всех твердых телах независимо от того, являются ли они металлами или диэлектриками.

Движение осуществляется путем туннельного перехода электронов от атома к атому. Электрические свойства данных материалов, определяют по реакции электронов на внешнее электрическое поле.

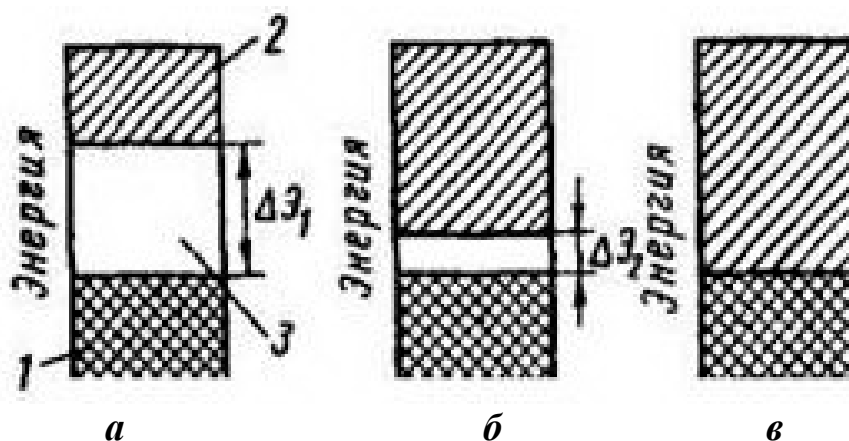


Рисунок 1.13 – Типовые схемы энергетических уровней электротехнических материалов:

а – диэлектрика; *б* – полупроводника; *в* – проводника (1 – заполненная электронами зона, 2 – свободная зона, 3 – запрещенная зона)

Внешнее электрическое поле стремится нарушить симметрию в распределении электронов по скоростям, ускоряя электроны, движущиеся в направлении действующих электрических сил, и замедляя частицы с противоположно направленным импульсом. Подобное ускорение и замедление связано с изменением энергии электронов, что должно сопровождаться переходом их в новые квантовые состояния. Такие переходы осуществляются в том случае, если в энергетической зоне материала имеются свободные уровни. Добавочная энергия, приобретаемая электронами на длине свободного пробега, составляет $(10^{-8} \dots 10^{-4})$ эВ, т. е. намного превосходит расстояние между подуровнями в зоне.

В металлических проводниках, где зона не полностью укомплектована электронами, даже слабое поле способно сообщить электронам импульс, чтобы вызвать их переход на близлежащие свободные уровни. По этой причине металлы хорошие проводники электрического тока.

В идеальном случае, в полупроводниках и диэлектриках при абсолютной температуре 0К все электроны находятся в валентной зоне, а зона проводимости абсолютно свободна. Электроны полностью заполненной зоны не могут принимать участия в создании электрического тока. Для появления электропроводности необходимо часть электронов перевести из валентной зоны в зону проводимости. Энергии электрического поля недостаточно для осуществления такого перехода, требуется более сильное энергетическое воздействие, например, нагревание твердого тела.

Средняя кинетическая энергия тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке приблизительно равна $(3/2) kT$. При комнатной температуре эта величина составляет приблизительно 0,04эВ, что существенно

меньше ширины запрещенной зоны ΔE . В твердом теле тепловая энергия неравномерно распределяется между частицами, и в каждый момент времени имеется небольшое число атомов, у которых амплитуда и энергия тепловых колебаний значительно превышают среднее значение.

В процессе тепловых колебаний атомы взаимодействуют не только друг с другом, но и с электронами, передавая им часть тепловой энергии. За счет тепловых флуктуаций часть электронов может перейти из валентной зоны в зону проводимости. Чем выше температура и меньше запрещенная зона, тем выше интенсивность межзонных переходов в теле.

У диэлектриков запрещенная зона настолько велика, что электронная электропроводность не играет определяющей роли. При каждом акте возбуждения и перехода электронов в зону проводимости появляются энергетические вакансии в распределении электронов по состояниям валентной зоны, называемые «дырками».

При наличии дырок электроны валентной зоны могут совершать эстафетные переходы с уровня на уровень. Во внешнем электрическом поле дырка движется противоположно движению электрона, т. е. ведет себя как положительный заряд с отрицательной эффективной массой.

Таким образом, дырки обеспечивают участие валентных электронов в процессе электропроводности. Процесс перехода электронов в свободное состояние сопровождается и обратным явлением, т. е. возвратом электронов в нормальное состояние. В результате в веществе при любой температуре наступает динамическое равновесие, т. е. количество электронов, переходящих в свободную зону, становится равным количеству электронов, возвращающихся обратно в нормальное состояние.

С повышением температуры число свободных электронов в полупроводнике возрастает, а с понижением температуры до абсолютного нуля - убывает вплоть до нуля. Материал, представляющий собой при одних температурах диэлектрик, при других, более высоких температурах приобретает проводимость, т.е. наступает новое качественное состояние вещества.

Различие между проводимостями двух типов электротехнических материалов - металлов и неметаллов - наиболее значительно при температурах, приближающихся к абсолютному нулю; различие же между двумя классами неметаллов – полупроводниками и диэлектриками - исчезает по мере приближения температуры к абсолютному нулю. Электроны, находящиеся в зоне проводимости, нельзя считать абсолютно свободными. Такие электроны неизбежно будут взаимодействовать с периодическим потенциальным полем кристаллической решетки.

Ширина запрещенной зоны материала меняется с изменением температуры, что можно объяснить двумя основными причинами: изменениями амплитуды тепловых колебаний атомов решетки и межуатомных расстояний, т.е. объема тела. С ростом температуры возрастает амплитуда

тепловых колебаний атомов, увеличивается степень их взаимодействия и степень расщепления энергетических уровней. Поэтому разрешенные зоны становятся шире, а запрещенные - соответственно уже.

Аналогичные изменения ширины зоны происходят под действием давления на кристалл, поскольку при этом изменяются межатомные расстояния. Энергию, необходимую для перевода электрона в свободное состояние или для образования дырки, может дать не только тепловое движение, но и другие источники энергии.

Например, поглощенная материалом энергия света, энергия потока электронов и ядерных частиц, энергия электрических и магнитных полей, механическая энергия и т. д. Увеличение же числа свободных электронов или дырок под воздействием какого-либо вида энергии способствует повышению электропроводности и увеличению тока, появлению в материале электродвижущих сил.

Электрические свойства материала определяются условиями взаимодействия и расстояниями между атомами вещества и не являются непременной особенностью данного атома. Углерод в виде алмаза диэлектрик, а графита он обладает большой проводимостью.

Примеси и точечные дефекты материала, нарушающие строгую периодичность структуры, создают особые энергетические уровни, которые располагаются в запрещенной зоне идеального кристалла. Если примесные атомы или дефекты расположены далеко друг от друга, то взаимодействие между ними отсутствует, а соответствующие им энергетические уровни оказываются дискретными.

Поскольку туннельные переходы электронов между удаленными примесными атомами практически невозможны, то дополнительные электронные состояния локализованы в определенном месте решетки, т.е. на дефекте структуры материала.

При высокой концентрации примесных атомов расстояния между ними сравнимы с размерами атомов, благодаря чему возможно перекрытие электронных оболочек ближайших атомов примеси. Дискретные энергетические уровни примесей расщепляются в энергетическую зону примесных состояний, способную обеспечить проводимость, если не все уровни в этой зоне заполнены электронами.

Таким образом, электрические свойства всех твердых электротехнических материалов определяют теоретически с единой точки зрения - энергия возбуждения носителей заряда или энергия активации электропроводности равна нулю у *металлов* и непрерывно возрастает в ряду *полупроводников*, условно переходящих при увеличении этой энергии в ряд *диэлектриков*. Следует подчеркнуть, что *зонная теория* строго применима к твердым телам с ковалентными и металлическими связями.

На практике, разделение материалов на полупроводники и диэлектрики носит условный характер. По мере того, как в э электроэнергетическом оборудовании в качестве полупроводников начинают использоваться материалы, имеющие более широкую запрещенную зону (свыше 10эВ), деление электротехнических материалов на полупроводниковые и диэлектрические утрачивает свой изначальный смысл.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие материалы называют электротехническими?
2. Классификация электротехнических материалов при воздействии электромагнитного поля.
3. Перечислите основные свойства проводниковых материалов электро-энергетического оборудования.
4. Какие материалы называют диэлектрическими?
5. Отличие пассивных диэлектриков от активных диэлектриков?
6. Как делятся электротехнические материалы по удельному электрическому сопротивлению?
7. Основные пространственные решетки кристаллических веществ.
8. Статические дефекты в строении твердых тел.
9. Когда в материалах возникают динамические дефекты?
10. Протяженные дефекты в строении твердых тел.
11. Явление полиморфизма в кристаллических структурах тела.
12. Нарисуйте точечные дефекты кристаллической решетки конструкционных материалов.
13. Основные свойства стекол электроэнергетического оборудования.
14. Перечислите механические свойства твердых решетки конструкционных материалов.
15. Диаграмма растяжения пластичных конструкционных материалов электроэнергетического оборудования.
16. Показатели прочности и пластичности твердых материалов электро-энергетического оборудования.
17. Какими методами проводят испытания на твердость.
18. Виды химических связей веществ.
19. Ковалентная и металлическая связь веществ.
20. Гомеополлярная и гетерополлярная (ионная) связь веществ.
21. Схема расположения энергетических уровней в твердом теле.
22. Зонная теория твердого тела.
23. Обменное взаимодействие в твердом теле.
24. Энергетическая диаграмма углерода.
25. Нарисуйте схемы энергетических уровней диэлектрика, полупроводника и проводника.

ГЛАВА 2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Классификация проводниковых материалов

Проводниками электрического тока могут быть твердые тела, жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Твердыми проводниками являются металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода. К металлам относят пластичные вещества с характерным для них блеском, которые хорошо проводят электрический ток и теплоту. Среди материалов в электроустановках металлы занимают одно из важнейших мест.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Как правило, температура плавления металлов высока, за исключением ртути, у которой она составляет -39°C . Поэтому при нормальной температуре в качестве жидкого металлического проводника может быть применена ртуть. Другие металлы являются жидкими проводниками лишь при повышенных температурах.

Механизм прохождения тока по металлам в твердом и жидком состояниях обусловлен движением свободных электронов, вследствие чего их называют проводниками с электронной электропроводностью или проводниками первого рода.

Электролитами, или проводниками второго рода, являются растворы кислот, щелочей и солей, а также расплавы ионных соединений. Прохождение тока через такие проводники связано с переносом вместе с электрическими зарядами частей молекул (ионов). При этом состав электролита изменяется, а на электродах устройства выделяются продукты электролиза.

Все газы и пары при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля выше некоторого критического значения, обеспечивающего начало процесса ударной ионизации, то газ может стать проводником, обладающим электронной и ионной проводимостями.

Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов и положительных ионов в единице объема представляет собой особую равновесную проводящую среду, называемую плазмой.

2.2. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников

Элементарные частицы (в том числе и электроны) обладают свойством корпускулярно-волнового дуализма. Движение свободных электронов в металлическом проводнике можно рассматривать как распространение плоских электронных волн, длина которых определяется соотношением Де Бройля.

Такая плоская электронная волна в периодическом потенциальном поле распространяется без рассеяния энергии (без затухания). В идеальном кристалле проводника длина свободного пробега электронов равна бесконечности, а сопротивление электрическому току равно нулю. Подтверждением является тот факт, что сопротивление чистых отожженных металлов стремится к нулю, когда температура приближается к абсолютному нулю.

Свойство электрона свободно перемещаться в идеальной кристаллической решетке не имеет аналога в классической механике. Рассеяние, приводящее к появлению сопротивления, возникает в тех случаях, когда в решетке кристалла имеются различного вида нарушения ее правильного строения.

Дефекты структуры кристаллической решетки могут быть динамическими и статическими, точечными и протяженными. Эффективное рассеяние волн происходит в том случае, когда размер дефектов решетки превышает четверть длины волны. Микроскопические неоднородности структуры металла препятствуют распространению электронных волн и вызывают рост удельного сопротивления.

В чистых металлах совершенной структуры единственной причиной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, является тепловое колебание атомов в узлах кристаллической решетки. Удельное электрическое сопротивление металла, обусловленное тепловым фактором ρ_T . Чтобы качественно определить характер зависимости температуры от удельного сопротивления проводника, используем упрощенную модель.

В кристалле интенсивность рассеяния прямо пропорциональна поперечному сечению сферического объема, который занимает колеблющийся атом, а площадь поперечного сечения пропорциональна квадрату амплитуды тепловых колебаний Δa . Длина свободного пробега электронов в металле:

$$\bar{l}_T = \left[\pi (\Delta a)^2 N \right]^{-1}, \quad (2.1)$$

где N - число атомов в единице объема материала.

Потенциальная энергия атома, отклоненного на величину Δa от узла кристаллической решетки, определяется выражением:

$$\mathcal{E}_{УПР} = \frac{1}{2} k_{УПР} (\Delta a)^2, \quad (2.2)$$

где $k_{УПР}$ - коэффициент упругой связи, которая стремится вернуть атом в положение равновесия.

Согласно классической статистике средняя энергия колеблющегося

атома равна kT .

Запишем равенство:

$$\frac{1}{2}k_{\text{УПР}}(\Delta a)^2 = kT. \quad (2.3)$$

В результате длина свободного пробега электронов в чистом металле обратно пропорциональна температуре:

$$\bar{l}_T = \frac{k_{\text{УПР}}}{2\pi NkT}. \quad (2.4)$$

Полученное отношение не выполняется при низких температурах, так как с понижением температуры могут уменьшаться не только амплитуды тепловых колебаний атомов, но и частоты их колебаний. В теории колебаний атомов решетки температуру оценивают температурой Дебая, которая определяет максимальную частоту тепловых колебаний, которые могут возбуждаться в кристалле проводника

$$\theta_D = \frac{h\nu_{\text{max}}}{k}. \quad (2.5)$$

Температура Дебая зависит от сил связи между узлами кристаллической решетки и является важным параметром твердого тела. При температуре $T > \theta_D$ удельное сопротивление металлов изменяется линейно с температурой.

Линейная аппроксимация температурной зависимости удельного сопротивления $\rho_T(T)$ справедлива и до температур порядка $(2/3)\theta_D$ где ошибка не превышает 10%.

Для большинства металлов характеристическая температура Дебая не превышает 400 - 450К и линейное приближение справедливо в области нормальной температуры.

В низкотемпературной области где $T \ll \theta_D$, а спад удельного сопротивления обусловлен постепенным исключением все новых и новых частот тепловых колебаний фононов, возникает степенная зависимость сопротивления $\rho_T \sim T^5$. Температурный интервал, в котором наблюдается степенная зависимость $\rho_T(T)$, бывает небольшим и значения показателя степени лежат в пределах от 4 до 6.

Кривая изменения удельного сопротивления металлического проводника в зависимости от температуры представлена на рисунке 2.1.

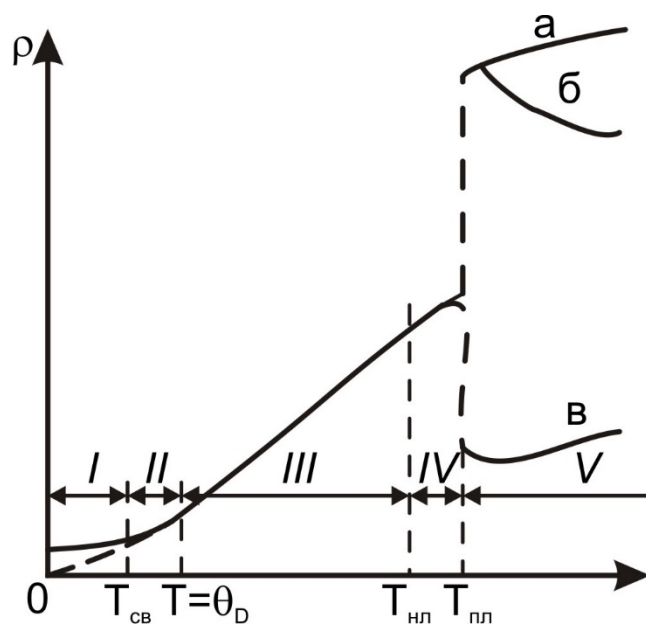


Рисунок 2.1 - Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры в широком диапазоне температур:
а, б, в – варианты удельного сопротивления у расплавленных металлов

В области **I**, составляющей несколько градусов Кельвина, у ряда металлов может наступить состояние сверхпроводимости. На рисунке виден скачок удельного сопротивления при температуре T_{CB} .

У чистых металлов совершенной структуры при стремлении температуры к температуре $0K$ удельное сопротивление также стремится к нулю (пунктирная кривая), а длина свободного пробега устремляется в бесконечность. При обычных температурах длина свободного пробега электронов в металлах в сотни раз превышает расстояние между атомами.

В пределах *переходной области II* наблюдается быстрый рост удельного сопротивления $\rho \sim T^n$ где степень n возрастает до 5 и постепенно убывает с ростом температуры до 1 ($T = \theta_D$). Линейный участок (область **III**) в температурной зависимости $\rho_T(T)$ у большинства металлов простирается до температур, близких к точке плавления.

Вблизи точки плавления, т. е. в *области IV*, начало которой отмечено на рисунке 1 температурой $T_{нп}$, в обычных металлах наблюдается отступление от линейной зависимости. При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов происходит увеличение удельного сопротивления в 1,5 - 2 раза.

Эксперименты выявили следующую закономерность: если плавление металла сопровождается увеличением объема, то сопротивление ρ скачкообразно возрастает; а если объем уменьшается, то происходит снижение удельного сопротивления.

На рисунке 2.2 показана температурная зависимость удельного сопротивления медного и алюминиевого проводников.

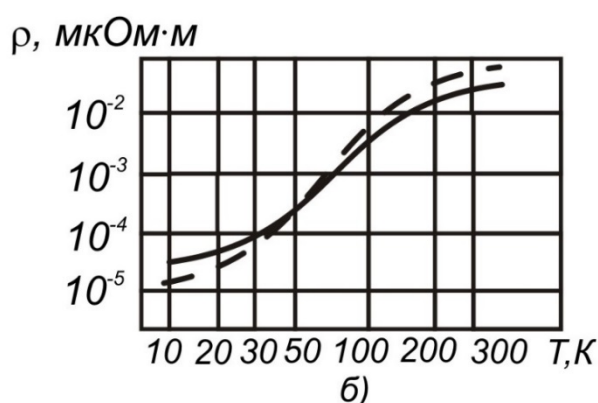
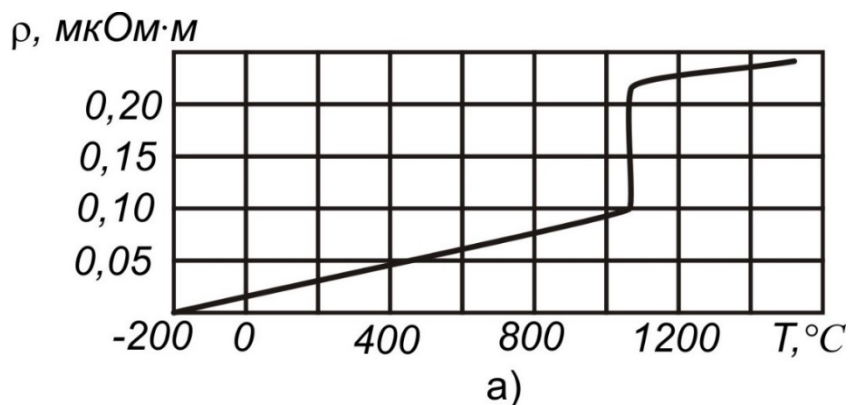


Рисунок 2.2 – Зависимости удельного сопротивления от температуры для меди (а) и при низких температурах для меди и алюминия (б)

Сверхпроводимости у проводниковой меди не обнаружено, однако при температурах порядка 10 - 20К удельное сопротивление меди минимально и отличается от удельного сопротивления при 300К почти на три порядка.

2.3. Влияние примесей и структурных дефектов на удельное сопротивление металлов

только тепловые колебания узлов решетки, но и статические дефекты структуры, которые также нарушают периодичность потенциального поля кристалла.

Рассеяние на статических дефектах кристаллической структуры не зависит от температуры. Поэтому по мере приближения температуры к абсолютному нулю сопротивление обычных (неидеальных) металлов стремится к постоянному значению, называемому остаточным сопротивлением.

Правило Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления:

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}, \quad (2.6)$$

т.е., полное удельное сопротивление твердого проводника ρ есть сумма сопротивлений, обусловленного рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки ρ_T , и остаточного $\rho_{ост}$, из-за рассеяния электронов на статических дефектах структуры.

Исключение из этого правила составляют сверхпроводящие металлы, в которых сопротивление исчезает ниже некоторой критической температуры.

Основной вклад в остаточное сопротивление вносит рассеяние на примесях, которые всегда присутствуют в проводнике в виде загрязнения или легирующего элемента. Любая примесная добавка приводит к повышению сопротивления ρ , даже если она обладает большей проводимостью по сравнению с основным металлом.

Одна из причин отклонений от правила Маттиссена связана с влиянием примесей на упругие свойства металла, что сопровождается изменением колебательного спектра кристаллической решетки. Различные примеси по-разному влияют на остаточное сопротивление металлических проводников.

Помимо примесей вклад в остаточное сопротивление, вносят собственные дефекты структуры - вакансии, атомы внедрения, дислокации, границы зерен. Концентрация точечных дефектов экспоненциально возрастает с температурой и может достигать высоких значений вблизи точки плавления. Остаточное сопротивление представляет собой чувствительную характеристику химической чистоты и структурного совершенства металлов.

Большое влияние на удельное сопротивление металлов и сплавов оказывают искажения, вызываемые напряженным состоянием. Пластическая деформация и наклеп повышают удельное сопротивление металлов и сплавов. Даже при значительном наклепе чистых металлов рост сопротивления составляет единицы процентов.

Термическая закалка приводит к повышению сопротивления проводника, что связано с искажениями решетки и появлением внутренних напряжений. При рекристаллизации металла путем отжига удельное сопротивление снижается до первоначального значения, поскольку происходит явление залечивания дефектов и снятия внутренних напряжений в материалах электроэнергетического оборудования.

2.4. Контактные явления в проводниках

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов. Это явление открыл итальянский физик А. Вольта в 1797г. Согласно квантовой теории, причиной появления разности потенциалов в области контакта является различная энергия Ферми у сопрягаемых металлов. Предположим, что в изолированном состоянии электронный газ в двух не контактируемых металлах A и B характеризуется энергиями Ферми \mathcal{E}_F^A и \mathcal{E}_F^B отсчитываемыми от дна зоны проводимости (рисунок 2.3, *а*).

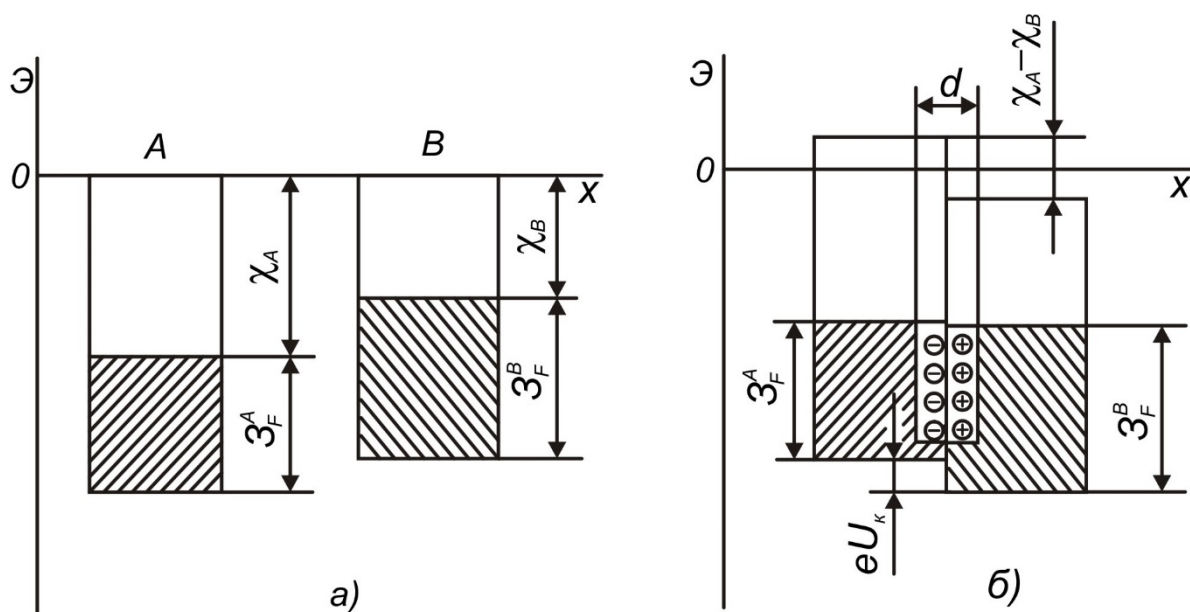


Рисунок 2.3 – Энергетические диаграммы двух не контактируемых (*а*) и контактируемых (*б*) металлов A и B

Термодинамические работы выхода электронов из металлов равны соответственно χ_A и χ_B . Кинетическая энергия электронов, находящихся на уровне Ферми, в двух металлах различна. При плотном контакте материалов возникает более интенсивный переход электронов из области с большим значением энергии \mathcal{E}_F в область, где эта энергия меньше, т. е. из металла $A \rightarrow B$, т.к. электроны стремятся занять состояние с минимальной энергией.

Теоретически невозможно, чтобы в одном из металлов оставались свободными состояния с низкой энергией, в то время как в другом металле заполнены состояния с более высокой энергией. Фактически переход электронов из металла B в металл A есть переход электронов на более низкие энергетические уровни в данной системе.

В результате металл B заряжается положительно, а металл A – отрицательно (рисунок 2.3, *б*). Между металлами возникает разность потенциалов,

препятствующая дальнейшему переходу носителей заряда. Равновесие наступит тогда, когда работа электрона по преодолению сил возникшего поля станет равной разности энергий электронов, переходящих через контакт:

$$eU_K = \mathcal{E}_F^B - \mathcal{E}_F^A \quad (2.7)$$

Таким образом, внутренняя контактная разность потенциалов определяется как разность энергий Ферми, отсчитываемых от дна зоны проводимости, для изолированных металлов A и B . Наличие контактного поля обеспечивает равенство потоков электронов из одного металла в другой в состоянии равновесия.

Так как скорости хаотического движения электронов весьма велики, равновесие устанавливается очень быстро - за время около 10^{-16} с. В условиях установившегося равновесия, уровень Ферми в обоих металлах должен быть одинаков. В результате энергетические уровни в металле, зарядившемся отрицательно, поднимутся, а в металле, зарядившемся положительно, опустятся. Благодаря заряду областей выравнивание уровней может произойти при переходе небольшого количества электронов.

Двойной электрический слой d , существующий в области контакта, очень тонок (порядка периода решетки) и не влияет на прохождение электрического тока через контакт. Так как энергия Ферми в металлах имеет значение порядка нескольких электрон-вольт, то контактная разность потенциалов между двумя металлами может составлять от десятых долей до нескольких вольт.

Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь, называют термопарой (рисунок 2.4).

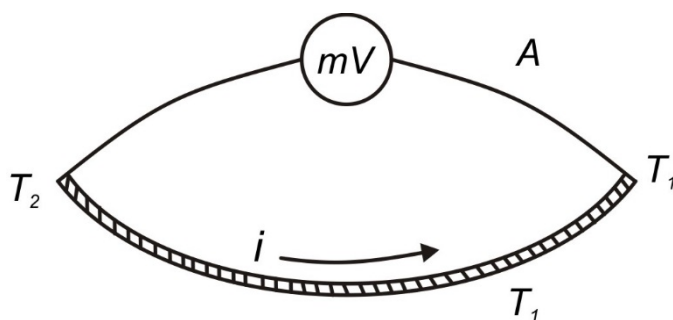


Рисунок 2.4 – Структурная схема термопары металлов A и B

При различной температуре контактов в замкнутой цепи возникает термоэлектрический ток. Если цепь разорвать в произвольном месте, то на концах разомкнутой цепи появится разность потенциалов, называемая термоэлектродвижущей силой. Явление получило название *эффекта Зеебека*.

В небольшом температурном интервале термо-э.д.с. пропорциональна разности температур контактов (спаев):

$$U \approx \alpha_T(T_2 - T_1), \quad (2.8)$$

где коэффициент α_T , - относительная удельная термо-э.д.с.

Значение коэффициента α_T зависит от природы проводников и температуры.

Термоэлектродвижущая сила в контуре термопары складывается из трех составляющих.

Первая составляющая обусловлена температурной зависимостью контактной разности потенциалов. В металлах с увеличением температуры уровень Ферми смещается вниз по энергетической шкале и на холодном конце проводника уровень располагается выше, чем на горячем. Следствием смещения уровня Ферми является возникновение контактной составляющей термо-э.д.с.

Вторая составляющая термо-э.д.с. обусловлена диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным. Средняя энергия электронов в металле изменяется с температурой, и они диффундируют в направлении температурного градиента. В результате, диффузионный электронов поток создает между металлами разность потенциалов.

Третья составляющая термо-э.д.с. возникает в контуре схемы вследствие увлечения электронов квантами тепловой энергии (фононами) и их поток распространяется к холодному концу спаев. Все составляющие термо-э.д.с. определяются небольшой концентрацией электронов, расположенных на энергетических уровнях, близких к уровню Ферми. В результате удельная термо-э.д.с. для контактирующих металлов оказывается очень небольшой.

2.5. Свойства проводниковых материалов

Проводниковая медь. Материал имеет ряд ценных достоинств, обеспечивающих широкое применение меди в качестве основного проводникового материала в электроэнергетическом оборудовании.

К достоинствам относятся:

- малое удельное сопротивление (из всех металлов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь);
- достаточно высокая механическая прочность;
- стойкость к коррозии. Даже в условиях высокой влажности медь окисляется на воздухе значительно медленнее, чем, например, железо. Интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах (рисунки 2.5);

- хорошая обрабатываемость - медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщиной до тысячных долей миллиметра;
- относительная легкость пайки и сварки.

Недостатками проводниковой меди являются:

- высокая стоимость материала;
- подверженность атмосферной коррозии с образованием окисных и сульфидных пленок;
- отрицательное влияние водорода на механические свойства меди.

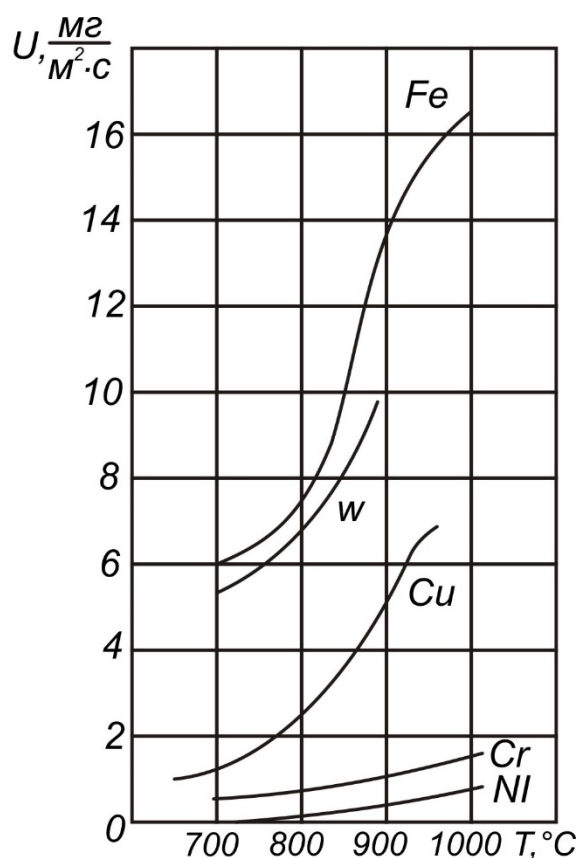


Рисунок 2.5 – Зависимость скорости окисления от температуры для железа, вольфрама, меди, хрома и никеля (на воздухе)

Материал получают путем переработки сульфидных руд, чаще других встречающихся в природе. После ряда плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем медь, предназначенную для электротехнических целей, обязательно подвергают электролитической очистке. Полученные после электролиза катодные пластины меди переплавляют в болванки, которые прокатывают и протягивают в изделия требуемого поперечного сечения.

Методом холодной протяжки получают твердую медь (маркируется МТ), которая благодаря влиянию наклепа имеет высокий предел прочности

при растяжении и малое относительное удлинение, а также твердость и упругость при изгибе. Если же медь подвергнуть отжигу, т.е. нагреву до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получится мягкая медь (маркируется ММ), которая сравнительно пластична, обладает малой твердостью и небольшой прочностью, но весьма большим относительным удлинением при разрыве и более высокой удельной проводимостью.

Отжиг меди производят в специальных печах без доступа воздуха, чтобы избежать окисления. Влияние отжига на свойства меди показано на рисунке 2.6.

Изменение механических свойств материала при отжиге оказывается значительно более резким, чем изменение удельного сопротивления. Стандартная медь в отожженном состоянии ($T = 20^\circ\text{C}$) имеет удельную проводимость $\gamma = 58\text{МОм/м}$ и сопротивление $\rho = 0,017241\text{мкОм}\cdot\text{м}$.

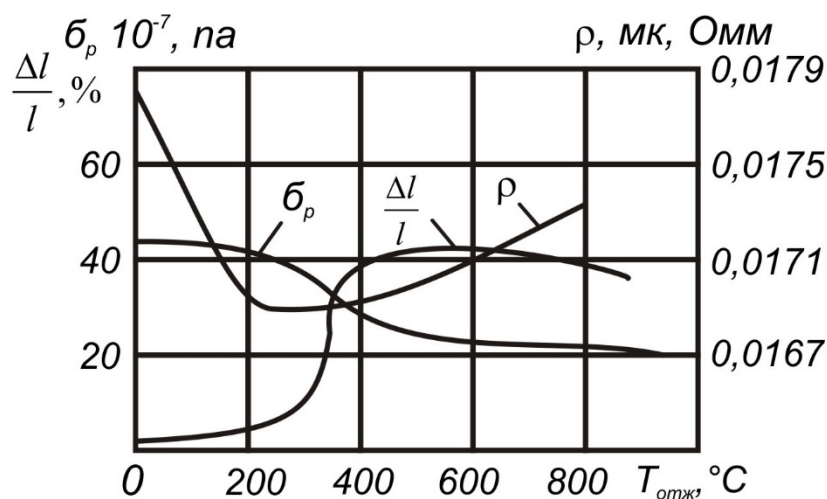


Рисунок 6 – Зависимости предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и удельного сопротивления меди от температуры отжига (продолжительность отжига 1 час)

Из выпускаемых в нашей стране марок стандартной меди в качестве проводникового материала используют медь М1 и М0. Маркировка выполнена по содержанию примесей в основном металле. Так, медь М1 содержит 99,90% Cu , а в общем количестве примесей (0,10%) кислорода должно быть не более 0,08%. Кислород является одной из наиболее вредных примесей в меди.

При повышенном содержании кислорода заметно ухудшаются механические и технологические свойства меди, а также сильно затруднена пайка и лужение. Медь, содержащая более 0,1% кислорода, легко разрушается при горячей обработке давлением, т. е. обладает красноломкостью.

Лучшими механическими свойствами обладает медь М0 (99,95% Cu), в составе которой содержится не более 0,05% примесей, в том числе не свыше

0,02% кислорода. Такую медь получают путем специального режима плавки. Из меди МО делают самую тонкую проволоку для электроустановок. Бескислородная медь содержит 99,97% *Cu*. Еще более чистым металлом является вакуумная медь содержащая 99,99% *Cu*. Свободная от кислорода медь по механической прочности и электрической проводимости мало отличается от электролитической меди, переплавленной обычным способом. Преимуществом вакуумная медь является очень высокая пластичность.

Удельная проводимость меди чувствительна к наличию примесей. При содержании в меди 0,5% примеси *Zn*, *Cd* или *Ag* удельная проводимость *Cu* снижается на 5%. При том же содержании *Ni*, *Sn* или *Al* удельная проводимость *Cu* падает на 25 - 40%. Еще более сильное влияние оказывают примеси *Be*, *As*, *Fe*, *Si* или *P*, которые снижают удельную проводимость меди на 55% и более.

В то же время присадки многих металлов повышают механическую прочность и твердость меди, как в холоднотянутом, так и отожженном состояниях (рисунок 2.7).

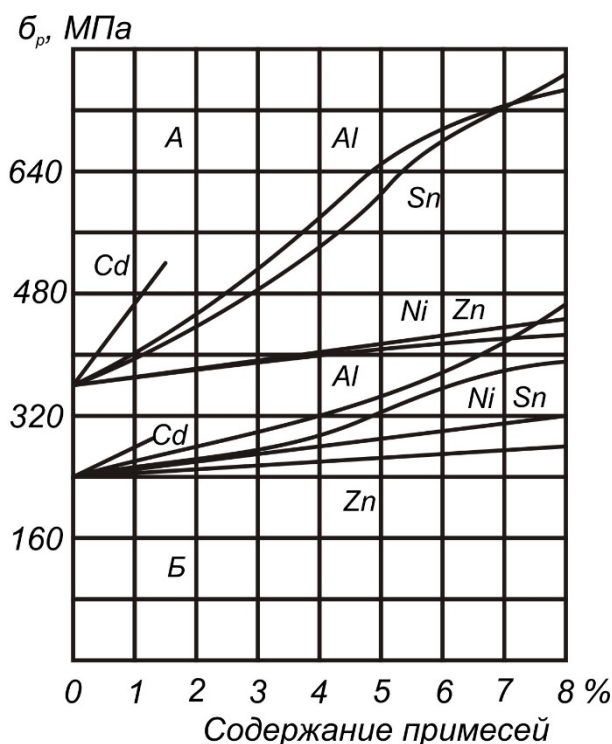


Рисунок 2.7 – Зависимость предела прочности меди от содержания примесей при растяжении в холоднотянутом (А) и в отожженном (Б) состояниях

Недостатком меди является ее подверженность атмосферной коррозии с образованием окисных и сульфидных пленок. Скорость окисления быстро возрастает при нагревании, однако прочность сцепления окисной пленки с металлом невелика. Вследствие окисления медь непригодна для слаботочных

контактов. При высокой температуре в электрической дуге окись меди диссоциирует, обнажая металлическую поверхность. Металлическое отслаивание и термическое разложение окисной пленки вызывает повышенный износ медных контактов при сильных токах.

Отрицательное влияние на механические свойства меди оказывает водород. После водородного отжига твердость меди уменьшается в несколько раз. Разрушительное действие водорода сказывается при наличии кислорода, который находится в технической меди в виде закиси Cu_2O . В меди, содержащей менее 0,001% кислорода, «водородной болезни» нет.

Материалы из меди применяют для изготовления проводов, кабелей, шин распределительных устройств, обмоток трансформаторов, электрических машин, токоведущих деталей приборов и аппаратов. Медные ленты используют в качестве экранов кабелей.

Твердую медь употребляют в тех случаях, когда необходимо обеспечить особенно высокую механическую прочность, твердость и сопротивляемость истиранию, например, для изготовления контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин.

Если же требуется хорошая гибкость и пластичность, а предел прочности на растяжение не имеет существенного значения, то предпочтительнее мягкая медь (например, для монтажных проводов и шнуров). Медь используют для изготовления, фольгированного гетинакса. Материалы из меди применяют в электронике в виде осажденных на подложки пленок, играющих роль проводящих соединений между функциональными элементами схемы.

Медь применяют для спаев со стеклами, поскольку она обладает рядом замечательных свойств: низким пределом текучести, мягкостью и высокой теплопроводностью. Поскольку медь является дорогим и дефицитным материалом, расходование её ведется весьма экономно. При возможности проводниковую медь заменяют другими менее дефицитными материалами.

Проводниковый алюминий. Вторым по значению проводниковым материалом является алюминий - металл серебристо-белого цвета, важнейший из «легких» металлов. Удельное сопротивление Al в 1,6 раза больше удельного сопротивления меди, но Al в 3,5 раза легче Cu .

Благодаря малой плотности Al обеспечивается большая проводимость на единицу массы (при одинаковом сопротивлении и длине провода Al в два раза легче Cu , несмотря на большее поперечное сечение). Al очень распространен в природе и имеет меньшую стоимость по сравнению с Cu .

Недостаток алюминия - низкая механическая прочность. Отожженный Al в три раза менее прочен на разрыв, чем отожженная Cu . Алюминий получают электролизом глинозема Al_2O_3 в расплаве криолита Na_3AlF_6 при $t = 950^\circ C$.

В электроэнергетическом оборудовании используют алюминий технической чистоты АЕ, содержит не более 0,5% примесей. Изготовленная из АЕ проволока (отожженная при $T = 350 \pm 20^\circ C$) имеет удельным сопротивлением ($T = 20^\circ C$) не более 0,0280 мкОм·м. Al высокой чистоты А97 (0,03% примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, электродов и корпусов электролитических конденсаторов.

У металла особой чистоты А999 примеси не превышают 0,001%. Разные примеси в различной степени снижают удельную проводимость алюминия (рисунок 2.8).

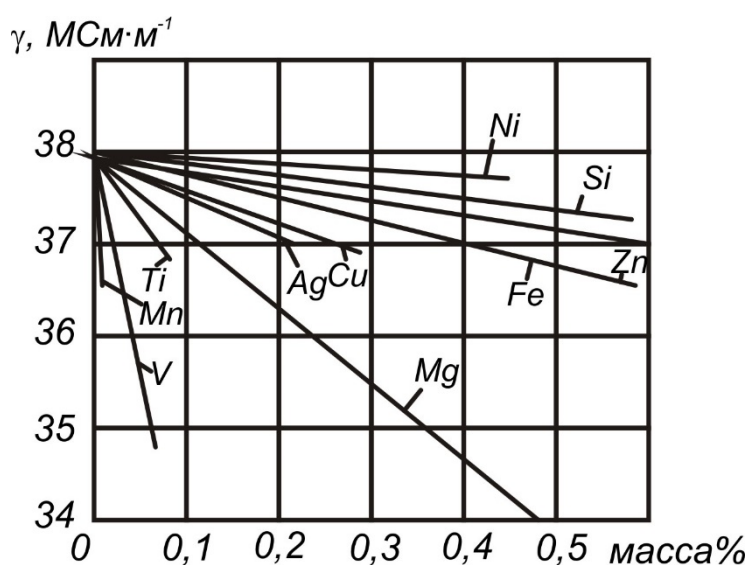


Рисунок 2.8 – Зависимости удельной проводимости отожженного алюминия от содержания примесей

Добавки таких примесей, как никель, кремний, цинк, железо, мышьяк, сурьма, свинец и висмут, в количестве 0,5% снижают удельную проводимость Al в отожженном состоянии не более чем на 2 - 3%. Более заметное действие оказывают примеси меди, серебра и магния, снижающие ее на 5 - 10% при том же содержании по массе. Очень сильно снижают удельную проводимость Al добавки ванадия, титана и марганца.

Примеси, не образующие твердых растворов с Al , мало влияют на электрическую проводимость Al , а примеси, образующие твердый раствор, заметно снижают проводимость (исключением является цинк). Закалка увеличивает сопротивление алюминия в присутствии тех примесей, которые увеличивают свою растворимость при нагревании. В техническом алюминии главными примесями являются кремний и железо.

Из алюминия путем прокатки получают тонкую фольгу, применяемую в обкладках бумажных конденсаторов. При температуре жидкого азота по значению удельного сопротивления алюминия почти сравнивается с медью, а при более низких температурах становится даже лучше *Cu* (рисунок 2.9).

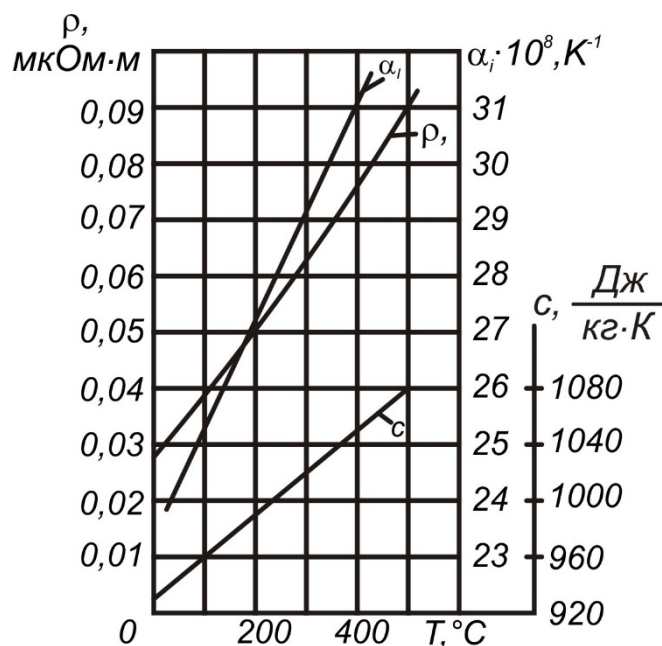


Рисунок 2.9 – Температурные зависимости удельного сопротивления алюминия, теплоемкости и температурного коэффициента линейного расширения

Алюминий активно окисляется и покрывается тонкой пленкой окиси с большим электрическим сопротивлением. Пленка предохраняет *Al* от коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов, что делает невозможным пайку *Al* обычными методами. Для пайки алюминия применяют специальные пасты-припои или используют ультразвуковые паяльники.

Более толстый слой окисла, который создает надежную электрическую изоляцию на сравнительно высокие напряжения, получают с помощью электрохимической обработки алюминия. Оксидная изоляция обладает механической прочностью и нагревостойкостью.

Из оксидированного *Al* изготавливают различные катушки без дополнительной междувитковой и междуслойной изоляции. Недостатками оксидной изоляции проводов являются ее ограниченная гибкость и заметная гигроскопичность. Широкое применение оксидная изоляция получила в электролитических конденсаторах.

При эксплуатации электроэнергетического оборудования, необходима защита от гальванической коррозии в местах прямого контакта проводов из алюминия и меди. Если на контакт *Al* и *Cu* воздействует влага, то возникает

местная гальваническая пара с высоким значением э. д. с.

Полярность пары Al и Cu такова, что на внешней поверхности контакта электрический ток направлен от алюминия к меди, вследствие чего алюминиевый проводник сильно разрушается коррозией. Для защиты от коррозии, места соединения в электроэнергетическом оборудовании тщательно защищают от увлажнения и покрыты специальными лаками.

2.6. Сверхпроводящие металлы и сплавы

У ряда металлов и сплавов при температурах, близких к абсолютному нулю, наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления. Явление получило название сверхпроводимости, а температуру T_{CB} , при которой происходит переход в сверхпроводящее состояние - критической температурой перехода.

Если в кольце из сверхпроводника индуцировать электрический ток, то он не будет затухать в течение длительного времени. По скорости уменьшения магнитного поля наведенного тока в кольце была произведена оценка удельного сопротивления материалов в сверхпроводящем состоянии. Его значение составило около 10^{-25} Ом·м, что в 10^{17} раз меньше сопротивления меди при комнатной температуре.

Явление сверхпроводимости можно обосновать с помощью квантовых представлений. Почти полвека с момента открытия сущность явления оставалась неразгаданной из-за того, что методы квантовой механики еще не в полной мере использовались в физике твердого тела.

Микроскопическая теория сверхпроводимости, объясняющая все опытные данные, была предложена в 1957г. американскими учеными Бардиным, Купером и Шиффером (теория БКШ).

Явление сверхпроводимости возникает в том случае, когда электроны в металле притягиваются друг к другу. Притяжение электронов возможно только в среде, содержащей положительно заряженные ионы, поле которых ослабляет силы кулоновского отталкивания между электронами.

Притягиваться могут лишь те электроны, которые принимают участие в электропроводности. Если такое притяжение имеет место, то электроны с противоположным направлением импульса и спина связываются в пары, называемые куперовскими. В образовании куперовских пар решающую роль играют взаимодействие электронов с тепловыми колебаниями решетки - фононами.

В твердом теле электроны могут, как поглощать, так и порождать фононы. Обменное фононное взаимодействие и вызывает силы притяжения между электронами, которые превосходят силы кулоновского отталкивания. Обмен фононами при участии решетки происходит непрерывно. Электрон,

движущийся среди положительно заряженных ионов, поляризует кристаллическую решетку и электростатическими силами притягивает к себе ближайшие ионы.

Благодаря смещению ионов в окрестности траектории первого электрона локально возрастает плотность положительного заряда. Второй электрон притягивается областью с избыточным положительным зарядом. В результате за счет взаимодействия с решеткой между электронами возникают силы притяжения. Второй электрон становится партнером первого и образует куперовскую пару.

Поскольку силы притяжения невелики, спаренные электроны слабо локализованы в пространстве. Куперовские парные образования перекрывают друг друга, постоянно распадаются и вновь создаются, но в целом все пары образуют электронный конденсат.

Особенностью куперовских пар является их импульсная упорядоченность. При температуре близкой к абсолютному нулю, все электроны связаны в пары. С повышением температуры за счет тепловой энергии происходит разрыв некоторой части электронных пар.

Движение неспаренных электронов, переходящих с основных уровней на возбужденные, затрудняется рассеянием на дефектах решетки. Переход вещества в сверхпроводящее состояние при его охлаждении происходит в очень узком интервале температур (сотые доли градуса).

Электроны, ответственные за создание сверхпроводимости и не обмениваются энергией с кристаллической решеткой. Поэтому при температуре ниже критической наблюдается существенное уменьшение теплопроводности металлов.

Особенность сверхпроводников состоит в том, что внешнее магнитное поле совершенно не проникает в толщу материала, затухая в тончайшем слое, и силовые линии магнитного поля огибают сверхпроводник. В поверхностном слое сверхпроводника при его внесении в магнитное поле возникает круговой незатухающий ток, который полностью компенсирует внешнее поле в толще образца.

Таким образом, сверхпроводники по магнитным свойствам являются идеальными диамагнетиками с магнитной проницаемостью равной нулю. Как диамагнетики, сверхпроводники выталкиваются из магнитного поля. Эффект выталкивания выражен так сильно, что груз удерживается в пространстве с помощью магнитного поля. На практике постоянный магнит может висеть над кольцом из сверхпроводящего материала, в котором циркулируют индуцированные магнитом незатухающие токи.

Сверхпроводимостью обладают 26 металлов. Большинство с очень низкими температурами перехода (ниже 4,2К). В этом заключается одна из

причин того, что большинство сверхпроводящих металлов для электротехнических целей применить не удастся.

Еще 13 элементов проявляют сверхпроводящие свойства при высоких давлениях. Среди них такие полупроводники, как кремний, германий, селен, теллур, сурьма и др. Сверхпроводимостью не обладают металлы, являющиеся наилучшими проводниками в нормальных условиях. К ним относятся золото, медь, серебро.

Малое сопротивление этих материалов указывает на слабое взаимодействие электронов с кристаллической решеткой. Слабое взаимодействие не создает достаточного притяжения между электронами, способного преодолеть кулоновское отталкивание и не происходит переход, например, меди в сверхпроводящее состояние.

Кроме чистых металлов сверхпроводимостью обладают интерметаллические соединения и сплавы. Общее количество наименований таких сверхпроводников составляет около 2000. Среди них самыми высокими критическими параметрами обладают сплавы и соединения ниобия.

Сверхпроводимость не наблюдается в системах, в которых существует ферро- или антиферромагнетизм. Образованию сверхпроводящего состояния в полупроводниках и диэлектриках препятствует малая концентрация свободных электронов.

В электроэнергетике сверхпроводящие материалы используют в магнитогидродинамических преобразователях, а также в качестве индуктивных накопителей энергии для покрытия пиковых мощностей в масштабах крупных энергосистем. Применяют электрические машины со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Использование сверхпроводников позволяет исключить из синхронных генераторов сердечники из электротехнической стали, благодаря чему уменьшаются до 7 раз их масса и габаритные размеры при сохранении мощности. Экономически обосновано применение сверхпроводящих трансформаторов, рассчитанных на высокий уровень мощности (десятки-сотни мегаватт).

Принцип механического выталкивания проводников из магнитного поля положен в основу сверхскоростного железнодорожного транспорта на «магнитной подушке».

Широкие перспективы применения сверхпроводников открывает измерительная техника. Дополняя возможности имеющихся измерительных средств, сверхпроводящие элементы позволяют регистрировать очень тонкие физические эффекты, измерять с высокой точностью и обрабатывать большое количество информации.

Созданы высокочувствительные болометры для регистрации инфракрасного излучения, магнитометры для измерения слабых магнитных потоков, индикаторы сверхмалых напряжений и токов.

2.7. Сплавы высокого сопротивления

Сплавы высокого сопротивления - материалы, у которых значения удельное сопротивление в нормальных условиях составляют более 0,3мкОм м. Сплавы применяют при изготовлении электроизмерительных приборов, образцовых резисторов, реостатов и электронагревательных устройств. Проводниковые материалы в электронагревательных приборах должны длительно работать на воздухе при температурах порядка 1000°C.

На практике применяют сплавы на медной основе – манганин, константан и хромоникелевые сплавы. Основные свойства сплавов высокого сопротивления даны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные свойства сплавов высокого сопротивления

Сплавы металлов	Удельное сопротивление, мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, $\alpha_0 \cdot 10^4, K^{-1}$	Термо-э.д.с. относительно меди, мкВ/К	Предельная рабочая температура, °С
Манганин (86% <i>Cu</i> , 12% <i>Mn</i> , 2% <i>Ni</i>)	0.42-0.48	5-30	1-2	100-200
Константан (60% <i>Cu</i> , 40% <i>Ni</i>)	0.48-0.52	-(5-25)	40-50	450-500
Хромоникелевый сплав Х15Н60 (55-61% <i>Ni</i> , 15-18% <i>Cr</i> , 1.5% <i>Mn</i> , остальное - <i>Fe</i>)	1.0-1.2	100-200	-	1000
Хромоникелевый сплав Х20Н80 (75-78% <i>Ni</i> , 20-23% <i>Cr</i> , 1.5% <i>Mn</i> , остальное - <i>Fe</i>)	1,0-1,1	100-200	-	1100

Манганин - основной сплав на медной основе для электроизмерительных приборов и образцовых резисторов. Сплав отличается желтоватым оттенком, хорошо вытягивается в тонкую проволоку до диаметра 0,02мм. Из манганина изготавливают ленту толщиной 0,01 - 1мм и шириной 10 - 300мм. Для получения высокой стабильности сопротивления сплав подвергают отжигу.

Константан - сплав меди и никеля. Сплав хорошо поддается обработке, протягивается в проволоку и прокатывается в ленту. Константан применяют для изготовления реостатов и электронагревательных элементов в тех случаях, когда рабочая температура не превышает 400 - 450°C.

При нагреве до достаточно высокой температуры на поверхности константана образуется пленка окисла, которая обладает электроизоляционными свойствами (оксидная изоляция). Константан применяют для изготовления термопар, которые служат для измерения температуры, если она не превышает нескольких сотен градусов.

Хромоникелевые сплавы (нихромы) используют для изготовления нагревательных элементов электрических печей, плиток, паяльников и т. д. Из сплава изготавливают проволоку диаметром 0,02мм и более. Высокая жаростойкость нихрома объясняется его стойкостью к прогрессирующему окислению на воздухе при высоких температурах.

При многократном кратковременном включении электронагревательный элемент из хромоникелевого сплава перегорает скорее, чем в случае непрерывного режима нагрева (срок службы может отличаться в 20 - 30 раз).

Срок службы нагревательных элементов можно увеличить, если заделать спирали в твердую инертную среду, предохраняющую их от механических воздействий и затрудняющую доступ кислорода. Окисные пленки на поверхности нихрома имеют небольшие контактные сопротивления даже при малых контактных усилиях.

Благодаря этому тонкая пластичная нихромовая проволока используется для изготовления миниатюрных высокоомных переменных резисторов с хорошими техническими характеристиками.

2.8. Сплавы для термопар

В электроэнергетическом оборудовании применяют сплавы: копель (56% *Cu*, 44% *Ni*); алюмель (95% *Ni* и остальное *Al*, *Si*, *Mn*); хромель (90% *Ni*, 10% *Cr*); платинородий (90% *Pt*, 10% *Rh*).

Термопары применяют для измерения следующих температур: платинородий - платина до 1600°C; медь - константан и медь - копель до 350°C; железо - константан, железо - копель и хромель - копель до 600°C; хромель - алюмель до 900 - 1000°C.

Термопары устойчиво работает лишь в окислительной среде. При эксплуатации происходит изменение удельной термо-э. д. с.

Причины нестабильности - загрязнения примесями, летучесть компонентов, резкие перегибы и деформации, которые вносят внутренние напряжения и создают физическую неоднородность.

2.9. Металлы со средним значением температуры плавления

При применении железа, никеля и кобальта в электроустановках необходимо учитывать, что данные металлы ферромагнитны и обладают повышенным температурным коэффициентом удельного сопротивления.

Железо (сталь). Железо является наиболее дешевым и доступным металлом, обладающим к тому же высокой механической прочностью. Сталь представляет особый интерес и в качестве проводникового материала. Чистое железо имеет более высокое сопротивление по сравнению с медью и алюминием (удельное сопротивление около 0,1 мкОм м).

Согласно правилу Маттиссена, различные механизмы рассеяния дают аддитивный вклад в полное сопротивление:

$$\rho_{\text{СПЛ}} = \rho_T + \rho_{\text{ОСТ}} + \rho_M \quad (2.9)$$

где ρ_T и $\rho_{\text{ОСТ}}$ – удельные сопротивления, обусловленные рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки и на примесях;

ρ_M - магнитный вклад в электрическое сопротивление, из-за беспорядка в системе спинов.

Отдельные составляющие удельного сопротивления ферромагнитного металла схематично показаны на рисунке 2.10.

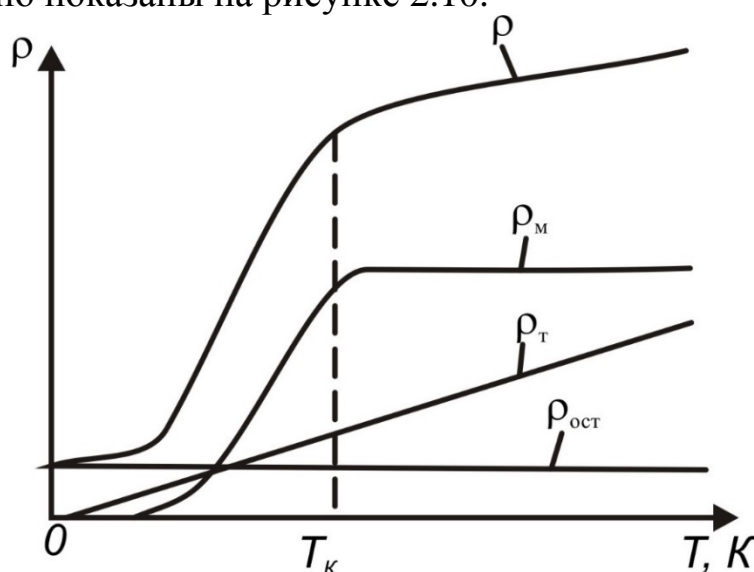


Рисунок 2.10 – Температурная зависимость удельного сопротивления ферромагнитного металла

Выше температуры T_K магнитная составляющая сопротивления ρ_M остается постоянной, благодаря чему зависимость сопротивления от температуры принимает линейный характер. Удельное сопротивление железа зависит от содержания примесей. Как следует из рисунка 2.10, наиболее сильное влияние на электрические свойства железа оказывает примесь кремния.

Электротехническая сталь благодаря повышенному удельному сопротивлению, имеет меньшие потери на вихревые токи по сравнению с чистым железом.

Из-за высокой магнитной проницаемости в сталях сказывается поверхностный эффект. Железо используют для изготовления корпусов приборов, работающих при температуре до 500°C и в системах заземления электроэнергетического оборудования.

Никель. Серебристо - белый металл, имеющий плотность равную плотности меди. Никель извлекают из его сернистых или кислородных соединений металлургическим путем и подвергают электролитическому рафинированию. Положительное свойство Ni - хорошая механическая прочность после отжига при большом относительном удлинении.

Никель в холодном состоянии легко поддается всем видам механической обработки: ковке, прессовке, прокатке, штамповке, волочению и т. п. Из Ni изготавливают различные по размерам и сложные по конфигурации изделия с жестко выдержанными допусками. Из всех примесей наиболее вредна для никеля сера, снижающая механическую прочность материала. Ценное свойство Ni - химическая устойчивость к растворам щелочей, которые не действуют на него даже в нагретом состоянии.

Никель используют в качестве компонента ряда магнитных и проводниковых сплавов, а также для защитных и декоративных покрытий изделий из железа. Очень близкими механическими и электрическими свойствами к никелю обладает кобальт. Его используют в качестве составной части многих магнитных и жаростойких сплавов, а также сплавов с маленькими температурными коэффициентами линейного расширения.

Таким образом, твердыми проводниками ЭУ являются металлы, металлические сплавы и модификации углерода. Среди материалов металлы занимают одно из важнейших мест. К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Электролитами, или проводниками второго рода, являются растворы кислот, щелочей и солей, а также расплавы ионных соединений. Все газы при низких напряженностях поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля выше критического значения и идет процесс ударной ионизации, то газ может стать проводником.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие основные виды проводников электрического тока вам известны?
2. Какими свойствами обладает «электронный газ» в состоянии вырождения?
3. Почему удельное сопротивление металлов растет с повышением температуры?
4. Что называют температурным коэффициентом удельного сопротивления?
5. Является температурный коэффициент удельного сопротивления константой для данного металла?
6. Как влияют примеси на удельное сопротивление металлов?
7. Почему металлические сплавы типа твердых растворов обладают более высоким удельным сопротивлением, нежели чистые компоненты, образующие сплав?
8. Объясните поведение проводниковых материалов электроэнергетического оборудования на высоких частотах.
9. Как зависит удельное сопротивление тонких металлических пленок от их толщины?
10. В каких условиях возможно появление термо-э.д.с. в замкнутой цепи?
11. Основные механизмы, ответственные за возникновение термо-э.д.с.
12. Как можно классифицировать проводниковые материалы?
13. Какие свойства меди обуславливают ее применение в электроэнергетическом оборудовании?
14. Что такое «водородная болезнь» меди?
15. Какими преимуществами по сравнению с медью обладает алюминий как проводниковый материал?
16. Какими недостатками по сравнению с медью обладает алюминий как проводниковый материал?
17. При каких условиях металлы могут переходить в состояние сверхпроводимости?
18. Что является причиной образования куперовских пар электронов?
19. Как влияет магнитное поле на критическую температуру перехода в состояние сверхпроводимости?
20. Чем различаются сверхпроводники первого и второго рода?
21. Какие металлические сплавы высокого сопротивления нашли применение в электроэнергетическом оборудовании?
22. Каким образом обеспечивается прочность вольфрамовых нитей и спиралей при высоких температурах?
23. Чем обусловлено широкое применение тантала в конденсаторах схем автоматики электроэнергетического оборудования?
24. Почему ферромагнитные металлы обладают нелинейной зависимостью удельного сопротивления от температуры?
25. Что понимают под мягкими припоями?
26. Что понимают под твердыми припоями?

ГЛАВА 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Классификация полупроводниковых материалов

Полупроводники представляют собой весьма многочисленный класс материалов. В него входят сотни самых разнообразных веществ - как элементов, так и химических соединений. Полупроводниковыми свойствами могут обладать как неорганические, так и органические вещества, кристаллические и аморфные, твердые и жидкие, немагнитные и магнитные.

Одна из возможных схем классификации полупроводниковых материалов приведена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Базовая структурная схема классификации полупроводниковых материалов

Полупроводниковые материалы этого класса обладают одним уникальным качеством - способностью сильно изменять свои электрические свойства под влиянием небольших внешних энергетических воздействий. Основу современной электроники составляют неорганические кристаллические полупроводники. Полупроводниковые свойства проявляют 12 химических элементов, находящихся в средней части Периодической системы Д. И. Менделеева.

По совокупности электрофизических свойств, обработанности технологических процессов, количеству и номенклатуре выпускаемых приборов кремний и германий занимают ведущее место среди полупро-

водниковых материалов. Значения ширины запрещенной зоны элементарных полупроводников при 300 K указаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Ширина в электрон-вольтах запрещенной зоны элементарных полупроводников

Номер п/п	Элемент	ΔE_z	Номер п/п	Элемент	ΔE_z
1	Бор	1,1	7	Мышьяк	1,2
2	Углерод (алмаз)	5,6	8	Сурьма	0,12
3	Кремний	1,12	9	Сера	2,5
4	Германий	0,665	10	Селен	1,8
5	Олово	0,08	11	Теллур	0,36
6	Фосфор	1,5	12	Йод	1,25

К полупроводникам относится большое количество веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре находится между значениями удельного сопротивления проводников и диэлектриков. Основной особенностью полупроводников является их способность изменять свои свойства под влиянием различных внешних воздействий (изменение температуры и освещения, приложение электрического и магнитного полей, внешнего давления и т. д.).

В отличие от металлов полупроводники имеют в широком интервале температур отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления. Факт уменьшения удельного сопротивления при нагревании твердых тел был установлен Фарадеем в 1833г. при исследовании свойств сернистого серебра. Поэтому Фарадея можно считать первооткрывателем класса полупроводниковых материалов.

Свойства полупроводников очень сильно зависят от содержания примесей, даже в малых количествах присутствующих в кристалле. При введении примеси изменяется не только значение проводимости, но и характер ее температурной зависимости. В этом состоит качественное отличие полупроводников от металлов, в которых примеси, независимо от их природы, всегда снижают проводимость, не оказывая существенного влияния на характер температурной зависимости.

Высокая «чувствительность» полупроводников к примесям, требование высокой степени чистоты и структурного совершенства кристаллов явились одной из главных причин того, что длительное время (более 100 лет) потенциальные возможности полупроводников не использовались.

Лишь прогресс в технологии получения сверхчистых веществ и выращивания монокристаллов позволил устранить принципиальные барьеры на пути изучения специфических свойств полупроводников и их широкого практического применения. Изобретение транзистора в 1948г. ознаменовало новую эру в электронике.

Массовое применение полупроводников вызвало революционные преобразования в электротехнике и автоматике. Совершенствование полупроводниковой технологии позволило решить задачу микроминиатюризации схем автоматики электроустановок.

В настоящее время теория полупроводников достигла такого уровня, при котором можно управлять свойствами электротехнических материалов и предсказывать их поведение в конкретных условиях эксплуатации электроустановок.

3.2. Физические процессы в полупроводниках

Как и в металлах, электрический ток в полупроводниках связан с дрейфом носителей заряда. Но, если в металлах наличие свободных электронов обусловлено самой природой металлической связи, то появление носителей заряда в полупроводниках определяется рядом факторов, главными из которых являются химическая чистота материала и температура. В зависимости от степени чистоты полупроводники подразделяют на собственные и примесные.

Собственный - это такой полупроводник, в котором можно пренебречь влиянием примесей при данной температуре. Согласно зонной теории твердого тела для полупроводников характерно наличие не очень широкой запрещенной зоны на энергетической диаграмме.

В собственном полупроводнике при температуре близкой к абсолютному нулю валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости абсолютно свободна. В таком полупроводнике каждый переход электрона в зону проводимости сопровождается образованием дырки в валентной зоне.

Благодаря дыркам электроны валентной зоны также принимают участие в процессе электропроводности за счет эстафетных переходов под действием электрического поля на более высокие освободившиеся энергетические уровни. Чем выше температура и меньше ширина запрещенной зоны, тем выше скорость тепловой генерации носителей заряда (электронов и ды-

рок). Одновременно с генерацией в полупроводнике непрерывно идет и обратный процесс - рекомбинация носителей заряда.

В результате протекания двух конкурирующих процессов в полупроводнике при любой температуре устанавливается некоторая равновесная концентрация электронов n_0 и дырок p_0 .

Специфика собственного полупроводника в том, что в нем равновесная концентрация электронов n_i равна равновесной концентрации дырок p_i :

$$n_i = p_i \text{ или } n_i + p_i = 2n_i. \quad (3.1)$$

Индекс i происходит от английского слова *intrinsic* – собственный. В отличие от металлов электронный газ у большинства полупроводников является невырожденным. С учетом выражения (10) в соответствии с классической статистикой Максвелла-Больцмана для собственного полупроводника имеем:

$$N_C \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_C - \mathcal{E}_F}{kT}\right) = N_B \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_C - \mathcal{E}_F}{kT}\right), \quad (3.2)$$

где N_C - эффективная плотность состояний в зоне проводимости, энергия которых приведена ко дну зоны проводимости (\mathcal{E}_C);

N_B - эффективная плотность состояний в валентной зоне, энергия которых приведена к потолку валентной зоны (\mathcal{E}_B);

\mathcal{E}_F - уровень Ферми.

Учитывая близость значений плотностей N_C и N_B , допустим, что в собственном полупроводнике уровень Ферми расположен посередине запрещенной зоны:

$$\mathcal{E}_F = \mathcal{E}_i = \frac{\mathcal{E}_C + \mathcal{E}_B}{2}. \quad (3.3)$$

Выражение для собственной концентрации носителей заряда:

$$n_i = p_i = \sqrt{N_C N_B} \exp\left(-\frac{\Delta\mathcal{E}}{2kT}\right), \quad (3.4)$$

где $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_C - \mathcal{E}_B$ - ширина запрещенной зоны полупроводника.

Для удобного графического изображения температурной зависимости выражение (3.4) представим:

$$\ln n_i = \ln \sqrt{N_C N_B} - \frac{\Delta \mathcal{E}}{2k} \frac{1}{T}. \quad (3.5)$$

Произведение плотностей $N_C N_B$ является слабой функцией от температуры и зависимость логарифма концентрации носителей заряда от величины обратной температуры близка к линейной (рисунок 12).

Наклон температурных зависимостей характеризует ширину запрещенной зоны полупроводников.

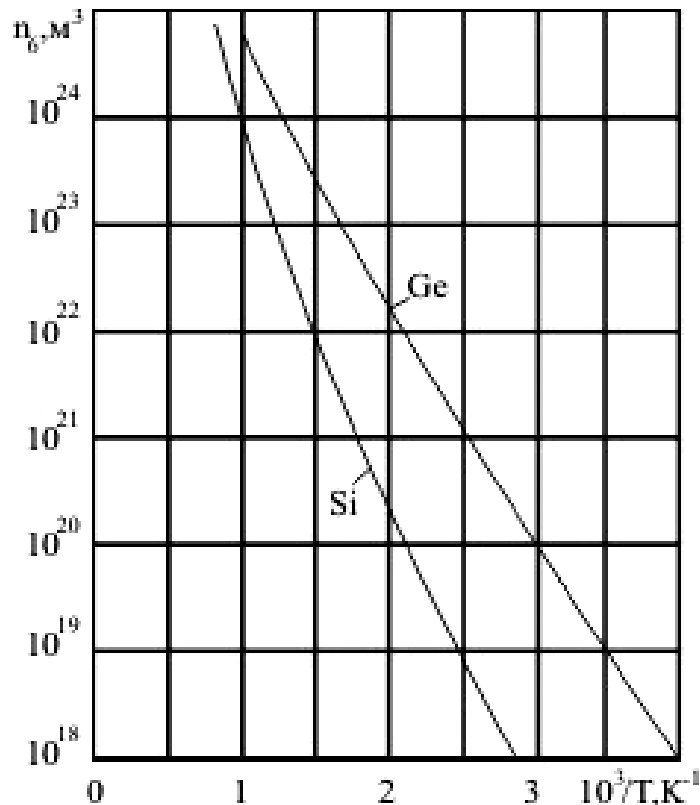


Рисунок 3.2 – Температурная зависимость собственной концентрации носителей заряда в кремнии и германии

Механизм собственной электропроводности ковалентных полупроводников поясняет рисунок 3.3, на котором в виде плоской модели изображена кристаллическая решетка кремния в электрическом поле.

Кремний и германий, являясь элементами IV группы системы Менделеева, кристаллизуются в структуре алмаза. В этой структуре каждый атом находится в тетраэдрическом окружении четырех ближайших соседей, с которыми взаимодействует силами ковалентных связей. Четыре валентных электрона любого атома идут на образование четырех ковалентных связей. Под действием внешнего электрического поля движение носителей заряда приобретает направленный характер.

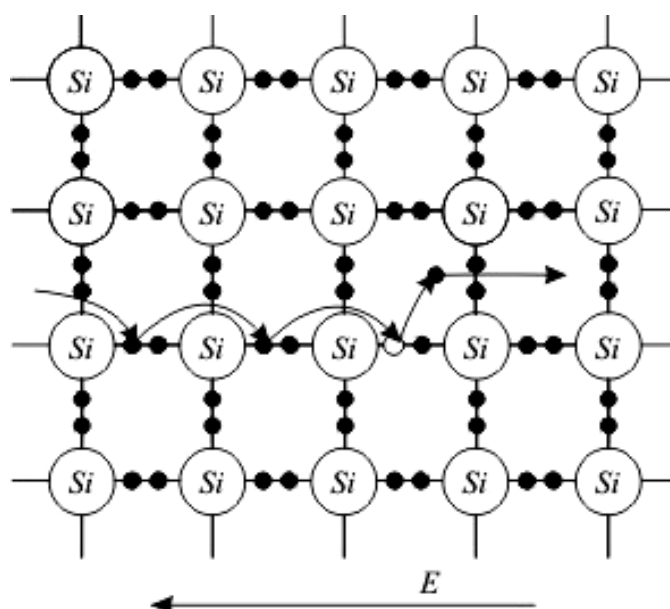


Рисунок 3.3 – Схематическое представление механизма собственной электропроводимости кремния на плоской модели решетки

При этом перемещение дырки к отрицательному полюсу источника можно представить, как эстафетный переход валентных электронов от одного атома к другому в направлении против поля. Рассмотренный случай собственной электропроводности позволяет оценить потенциальные возможности материала, т.к. работа полупроводниковых приборов при этом нарушается.

Примесный - это такой полупроводник, электрофизические свойства которого в основном определяются примесями, которые создают дополнительные уровни в запрещенной зоне полупроводника. При малой концентрации примесей расстояние между примесными атомами велико, их электронные оболочки не взаимодействуют друг с другом.

Вследствие этого примесные энергетические уровни являются дискретными, т. е. не расщепляются в зону, как это имеет место для уровней основных атомов кристаллической решетки. Если примесные атомы находятся в узлах кристаллической решетки, то их называют примесями замещения, если в междоузлиях - примесями внедрения. Роль примесей могут играть и дефекты структуры. К числу таких дефектов относятся, в первую очередь, вакансии и междоузельные атомы.

При малой концентрации примесей вероятность непосредственного перехода электронов от одного примесного атома к другому ничтожно мала. Однако примеси могут либо поставлять электроны в зону проводимости полупроводника, либо принимать их с уровней его валентной зоны (рисунок 3.4).

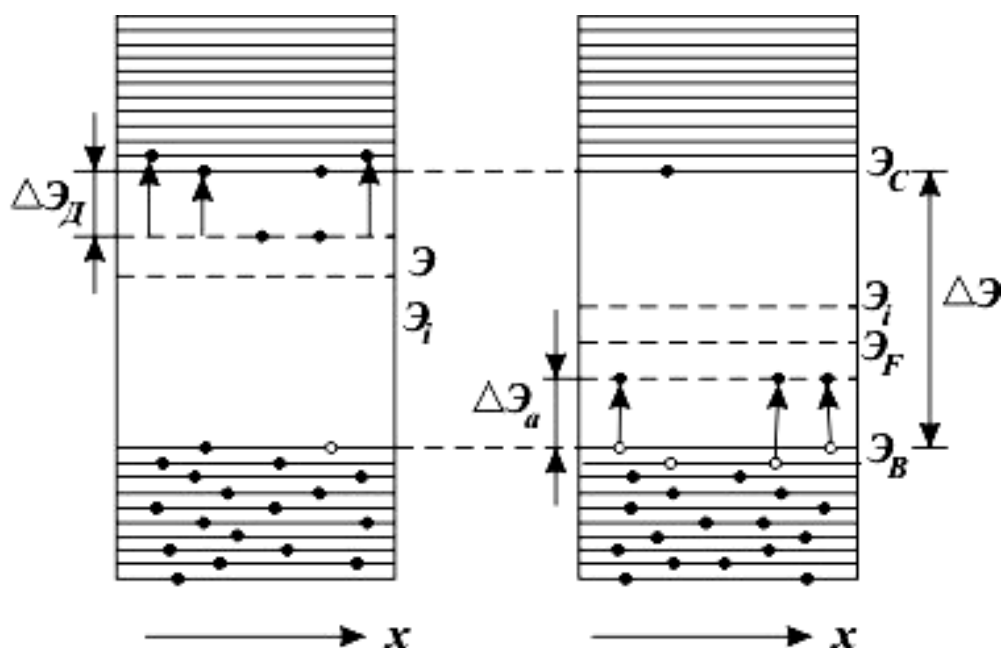


Рисунок 3.4 – Энергетические диаграммы полупроводников электронного (*а*) и дырочного типов (*б*) при заданной абсолютной температуре (T) и пространственной координате (x)

Первый случай (рисунок 14, *а*) - примесные уровни, заполненные электронами при отсутствии внешних энергетических воздействий, расположены в запрещенной зоне вблизи нижнего края зоны проводимости. При внешнем возбуждении электроны с примесных уровней могут легко переходить в свободную зону и участвовать в процессе электропроводности.

Энергия $\Delta\mathcal{E}_д$, необходимая для таких переходов, значительно меньше ширины запрещенной зоны $\Delta\mathcal{E}$. Примеси, поставляющие электроны в зону проводимости полупроводника, называют донорами, а т.к., концентрация электронов превышает концентрацию дырок, то это полупроводники n - типа.

Во втором случае (рисунок 14, *б*) примесь может внести незаполненные уровни, располагающиеся в запрещенной зоне вблизи от верхнего края («потолка») валентной зоны.

Благодаря тепловому возбуждению электроны из валентной зоны полупроводника забрасываются на эти свободные примесные уровни. Ввиду разобщенности атомов примеси, электроны, заброшенные на примесные уровни, не участвуют в создании электрического тока.

Полупроводник с такой примесью имеет концентрацию дырок большую, чем концентрация электронов, перешедших из валентной зоны в зону проводимости, и его называют полупроводником p - типа, а примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, - акцепторами.

Минимальную энергию ΔE_A , которую необходимо сообщить электрону валентной зоны, чтобы перевести его на акцепторный уровень, называют энергией ионизации акцептора. Таким образом, примеси замещения, валентность которых превышает валентность основных атомов решетки, проявляют свойства доноров. Кроме мышьяка донорами в кремнии и германии являются фосфор и сурьма.

Носители заряда, концентрация которых в полупроводнике больше, называют основными, а носители, концентрация которых меньше, - неосновными. Так, в полупроводнике n - типа электроны являются основными носителями, а дырки – неосновными.

В полупроводнике p - типа дырки - основными носителями, а электроны - неосновными.

Если в полупроводнике n - типа увеличить концентрацию доноров, то возрастет число электронов, переходящих в единицу времени с примесных уровней в зону проводимости. Соответственно возрастет скорость рекомбинации носителей заряда и уменьшится равновесная концентрация дырок.

Произведение концентраций:

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (3.6)$$

часто называют соотношением «действующих масс» для носителей заряда. С его помощью всегда можно найти концентрацию неосновных носителей заряда полупроводника, если известна концентрация основных.

3.3. Свойства полупроводников различного типа

На практике, в широком диапазоне температур для различного содержания примесей наблюдают логарифмические температурные зависимости концентрации носителей заряда в полупроводнике n - типа (рисунок 3.5).

Рассмотрим характер кривой N_{D1} , соответствующей относительно малой концентрации доноров. В области низких температур увеличение концентрации электронов при нагревании полупроводника обусловлено возрастанием степени ионизации доноров (участок кривой между точками 1 и 4).

Каждый ионизованный донор можно рассматривать как центр, захвативший дырку. Учитывая, что общее число энергетических состояний на донорных уровнях в расчете на единицу объема равно N_{D1} , для концентрации ионизованных доноров:

$$p_D = N_{D1} \exp\left(\frac{\mathcal{E}_{D1} - \mathcal{E}_F}{kT}\right), \quad (3.7)$$

где \mathcal{E}_{D1} - положение донорного уровня на энергетической шкале.

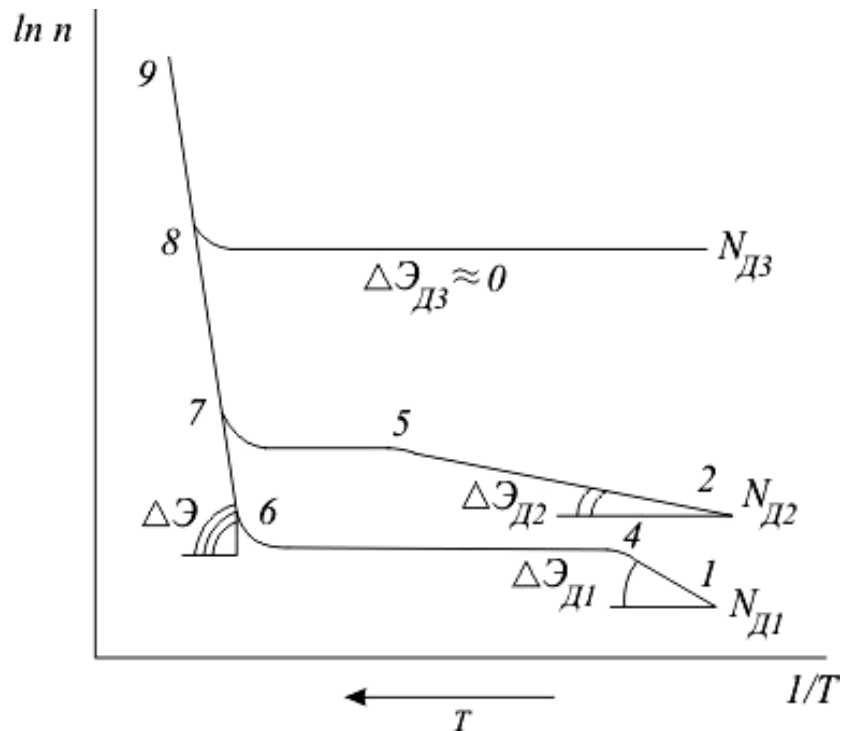


Рисунок 3.5 – Зависимости концентрации носителей заряда в полупроводнике от величины обратно пропорциональной абсолютной температуре

При низкой температуре концентрация ионизованных доноров в полупроводнике равна концентрации электронов:

$$p_D = n_0 = N_C \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_C - \mathcal{E}_F}{kT}\right). \quad (3.8)$$

В соответствии с соотношением (3.6) получим:

$$p_D n_0 = n_0^2 = N_C N_{D1} \exp\left(\frac{\mathcal{E}_{D1} - \mathcal{E}_F}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_C - \mathcal{E}_F}{kT}\right), \quad (3.9)$$

откуда из выражения (3.9) концентрация электронов:

$$n_0 = \sqrt{N_C N_{D1}} \exp\left(-\frac{\Delta\mathcal{E}_{D1}}{2kT}\right), \quad (3.10)$$

где $\Delta\mathcal{E}_{д1} = \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_{д1}$ - угол наклона кривой $\Delta\mathcal{E}_{д1}$ на рисунке 3.5.

Наклон температурной зависимости $\Delta\mathcal{E}_{д1}$ (участок 1 – 4) на рисунке 3.5 характеризует энергию ионизации примесей полупроводника. В процессе нагревания при температуре, соответствующей точке 4, все электроны с примесных уровней оказываются переброшенными в зону проводимости. При этом вероятность ионизации собственных атомов полупроводника ничтожно мала.

В широком температурном диапазоне (участок 4 - 6) концентрация носителей заряда остается постоянной и равной концентрации доноров. Этот участок температурной зависимости называют областью истощения примесей.

При высоких температурах (участок кривой за точкой 6) доминирующую роль начинают играть перебросы электронов через запрещенную зону. С увеличением концентрации примеси участки кривых, соответствующие примесной электропроводности, смещаются вверх.

Кроме того, с увеличением концентрации примесных атомов уменьшается расстояние между ними, что приводит к более сильному взаимодействию электронных оболочек примесных атомов и расщеплению дискретных энергетических уровней в примесные зоны.

Происходит падение энергии ионизации примесей. Чем больше концентрация примесей, тем выше температура их истощения. При достаточно большой концентрации доноров их энергия ионизации равна нулю, т.к. образовавшаяся примесная зона перекрывается зоной проводимости.

Такой полупроводник является вырожденным. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в этом случае характеризуется ломаной линией с двумя прямолинейными участками (3 – 8) и (8 – 9).

Концентрация электронов в вырожденном полупроводнике n - типа постоянна во всем диапазоне примесной электропроводности и вырожденный полупроводник способен проводить электрический ток даже при очень низких температурах. Перечисленные свойства роднят вырожденные полупроводники с металлами. Поэтому их часто называют полуметаллами.

Под действием внешнего электрического поля носители заряда приобретают некоторую скорость направленного движения (скорость дрейфа) и создают электрический ток. Отношение средней установившейся скорости направленного движения к напряженности электрического поля называют подвижностью носителей заряда:

$$\mu = \frac{\bar{v}}{E}. \quad (3.11)$$

Следует различать подвижность электронов μ_n и подвижность дырок μ_p . С учетом двух типов носителей заряда в полупроводнике плотность тока:

$$J = en_0\mu_n E + ep_0\mu_p E, \quad (3.12)$$

где n_0 и p_0 - равновесные концентрации электронов и дырок.

В соответствии с законом Ома плотность тока в полупроводнике равен $J = \gamma E$.

С учетом выражения (3.12) удельная проводимость:

$$\gamma = en_0\mu_n + ep_0\mu_p. \quad (3.13)$$

У части полупроводников и диэлектриков - веществ со значительно меньшей удельной проводимостью, чем у металлов, подвижность носителей заряда на несколько порядков больше по сравнению с обычными материалами. Электроны в таких проводящих кристаллах могут двигаться более свободно, чем в металлах.

Время релаксации, характеризующее уменьшение тока после снятия поля, определяется процессами рассеяния движущихся в полупроводниках электронов. Чем больше частота столкновений и чем они интенсивнее, тем меньше время релаксации, а, следовательно, и подвижность носителей заряда.

Таким образом, вследствие большей длины волны электрона в полупроводнике и диэлектрике по сравнению с металлом неоднородности порядка атомных размеров мало влияют на рассеяние электронов. Причинами рассеяния носителей заряда в полупроводниках, по-разному влияющими на температурную зависимость подвижности, являются: тепловые колебания атомов или ионов кристаллической решетки; примеси в ионизированном или в нейтральном состоянии; дефекты решетки (пустые узлы, искажения, вызванные атомами внедрения, дислокации, трещины, границы кристаллов и т. д.).

Подвижность носителей заряда может сильно отличаться от образца к образцу в зависимости от его состава и совершенства кристаллической структуры. Приводимые в справочниках значения подвижности носителей заряда для конкретных полупроводников относятся к наиболее чистым и совершенным монокристаллам.

Взаимодействие носителей заряда с колеблющимися ионами в ионных кристаллах гораздо сильнее, чем их взаимодействие с нейтральными атомами в материалах с атомной решеткой. Поэтому рассеяние носителей заряда в результате тепловых колебаний ионов гораздо интенсивнее, и подвижность у этой группы полупроводников в большинстве случаев более низкая.

Оценив влияние температуры на концентрацию и подвижность носителей заряда, представим общий ход изменения удельной проводимости при изменении температуры.

В полупроводниках с атомной решеткой подвижность меняется при изменении температуры слабо (по степенному закону), а концентрация очень сильно (по экспоненциальному закону). Поэтому температурная зависимость удельной проводимости похожа на температурную зависимость концентрации (рисунок 3.5).

Снижение удельной проводимости в области низких температур связано, с одной стороны, с уменьшением концентрации носителей заряда, поставляемых примесными атомами (донорами или акцепторами), а с другой - уменьшением подвижности за счет усиливающегося рассеяния на ионизированных примесях.

Резкое возрастание удельной проводимости при повышенных температурах соответствует области собственной электропроводности, которая характеризуется равенством концентраций электронов и дырок. По наклону прямой на участке собственной электропроводности определяют ширину запрещенной зоны полупроводника (рисунок 3.6).

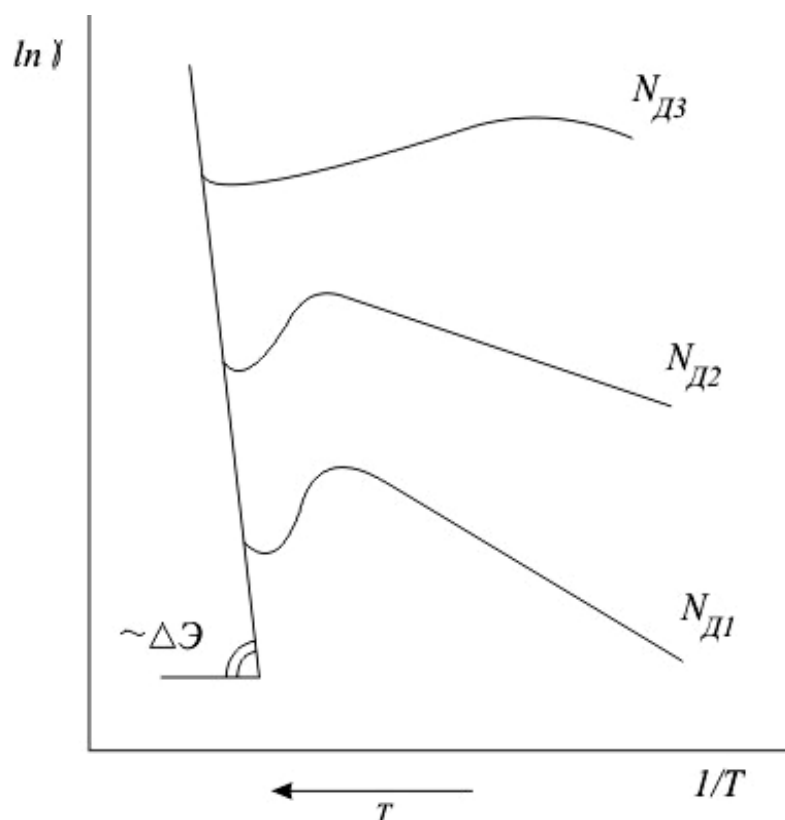


Рисунок 3.6 – Температурные зависимости удельной проводимости полупроводника при различной концентрации примесей

Чем больше концентрация доноров, тем больше электронов поставляется в зону проводимости при данной температуре, тем выше значение удельной проводимости. У реальных полупроводников температурное изменение проводимости может значительно отклоняться от рассмотренных зависимостей вследствие ряда причин.

Одна из них связана с тем, что на практике в полупроводниковых материалах имеется не один, а несколько видов примесных дефектов, у которых энергии ионизации могут быть различными. Другая причина появления некоторых аномалий в температурной зависимости проводимости обусловлена различием подвижностей электронов и дырок полупроводника.

3.4. Оптические и фотоэлектрические явления

В полупроводниковых материалах происходят оптические и фотоэлектрические явления. Например, свет, проникая в полупроводниковый материал, вступает с кристаллической решеткой во взаимодействие, связанное с обменом энергией. Интенсивность света, проходящего через полупроводник, ослабляется вследствие процесса поглощения.

Выделим на глубине x от поверхности полупроводника бесконечно тонкий слой dx . Количество световой энергии dI , поглощенное слоем dx , пропорционально интенсивности света, падающего на этот слой, и его толщине:

$$dI = -\alpha I dx, \quad (3.14)$$

где α - показатель поглощения света.

Знак минус указывает на убыль энергии в полупроводнике. Показатель α характеризует относительное изменение интенсивности излучения на единице длины. Интегрируя выражение (3.14), получим:

$$I(x) = I_1 \exp(-\alpha x). \quad (3.15)$$

Интенсивность света, входящего через поверхность образца равна:

$$I_1 = I_0(1 - R), \quad (3.16)$$

где R - коэффициент отражения.

Из выражения (3.15) следует, что величина, обратная показателю поглощения α^{-1} , численно равна толщине слоя полупроводника, на которой интенсивность проходящего света уменьшается в e раз. Таким образом, показатель α имеет размерность, обратную длине, т. е. m^{-1} .

При нормальном падении световых лучей на полупроводник коэффициент отражения:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad (3.17)$$

где n - показатель преломления полупроводника.

Для большинства полупроводников $n = 3 \dots 4$. Этим значениям соответствует коэффициент отражения $R = (25 \dots 36)\%$. Зависимость показателя α от длины волны или энергии фотонов называют спектром поглощения вещества. Поглощение излучения в полупроводниках связано с изменением состояния, как свободных, так и связанных электронов, а также с изменением колебательной энергии атомов решетки. Различают несколько механизмов оптического поглощения. Каждому из них соответствует определенная область спектра.

Собственное поглощение света обусловлено переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости, т. е. энергия квантов света идет на ионизацию атомов полупроводника. Собственное поглощение возможно в том случае, если энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны. В зависимости от ширины запрещенной зоны оно проявляется в видимой или ближней инфракрасной области спектра.

Экситонное поглощение. В некоторых полупроводниках при поглощении фотонов образуются особые возбужденные состояния электронов валентной зоны, называемые экситонами. Экситон - это система из взаимосвязанного собственными электростатическими полями электрона и оставленной им дырки. Экситон напоминает атом водорода, в котором роль ядра играет положительная дырка.

Поглощение света носителями заряда обусловлено переходами электронов и дырок с одного уровня на другой под влиянием квантов света внутри энергетических зон. Под действием электрического поля световой волны носители заряда совершают колебательное движение синхронно с полем. Ускоряясь, полем на длине свободного пробега, электроны при столкновении с узлами решетки отдают накопленную кинетическую энергию.

В результате энергия световой волны превращается в тепловую энергию решетки. Поглощение происходит, когда время свободного пробега электронов намного меньше периода электромагнитных колебаний.

Примесное поглощение света обусловлено ионизацией или возбуждением примесных атомов в кристаллической решетке. При этом механизме энергия поглощаемых квантов света расходуется либо на переход электронов с донорных уровней в зону проводимости, либо на переход электронов из валентной зоны на акцепторные уровни.

Поглощение света решеткой происходит в результате взаимодействия электромагнитного поля с колеблющимися зарядами узлов кристаллической решетки. Решеточное поглощение связано с изменением колебательной энергии атомов. Оно проявляется в инфракрасной области спектра и накладывается на примесное поглощение и поглощение носителями заряда.

Из рассмотренных механизмов оптического поглощения свет лишь собственное и примесное поглощения сопровождаются генерацией добавочных носителей заряда. За счет оптической генерации неравновесных носителей заряда должны изменяться электрические свойства полупроводника при его освещении. Поэтому два выделенных механизма поглощения называют фотоактивными.

Фотопроводимость (фоторезистивный эффект) - изменение электрической проводимости (удельного сопротивления) вещества под воздействием электромагнитного излучения. При фоторезистивном эффекте первичным является процесс поглощения фотонов. Если нет поглощения, то нет и фотопроводимости.

Однако обратное утверждение несправедливо, т.к. не любое, а только фотоактивное поглощение света вызывает изменение удельного сопротивления. Фотопроводимость равна разности проводимостей полупроводника на свету и в темноте:

$$\Delta\gamma = \gamma_C - \gamma_T = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p, \quad (3.18)$$

где Δn и Δp - концентрации неравновесных носителей зарядов в полупроводнике, возникших вследствие оптической генерации.

При воздействии на полупроводник светового пучка неизменной интенсивности в нем по истечении некоторого времени устанавливается стационарное значение избыточной концентрации носителей заряда и фотопроводимости.

Для области собственного поглощения полупроводника:

$$\Delta n = \Delta p = \tau\eta_0\alpha I, \quad (3.19)$$

где τ - время жизни неравновесных носителей заряда.

Фотопроводимость полупроводника:

$$\Delta\gamma = e\eta_0\alpha I(\mu_n + \mu_p)\tau. \quad (3.20)$$

Чем больше время τ , тем меньше скорость рекомбинации и больше фотопроводность. Фоточувствительность и быстродействие полупровод-

никовых приемников излучения связаны между собой, чем больше фоточувствительность, тем ниже быстродействие и наоборот.

Люминесценция - электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. Поскольку люминесценция относится к разряду неравновесных явлений, то для ее наблюдения полупроводник необходимо вывести из состояния термодинамического равновесия, т. е. возбудить.

При люминесценции акты возбуждения и излучения света разделены во времени промежуточными процессами, что обуславливает относительно длительное время существования свечения вещества после прекращения возбуждения. Вещества, способные люминесцировать, называются люминофорами. Среди них наиболее многочисленную группу образуют полупроводники с широкой запрещенной зоной.

Различают фотолюминесценцию (возбуждение светом), катодолюминесценцию (возбуждение электронным лучом) и электролюминесценцию (свечение под действием электрического поля).

Фотолюминесценция подчиняется закону Стокса–Ломмеля, т.е. максимум спектра излучения всегда смещен по отношению к максимуму спектра поглощения люминофора в сторону более длинных волн. Отсюда следует, что часть энергии при возбуждении фотолюминесценции необратимо рассеивается в веществе, превращаясь в теплоту.

Люминесцентные свойства твердых тел во многом определяются концентрацией примесей и дефектов структуры. Примесные атомы, образующие локальные уровни в запрещенной зоне полупроводника и ответственные за свечение материала, называют активаторами люминесценции. Часто тип вводимого активатора определяет спектр излучения люминофора. Различные виды люминесценции находят разнообразные практические применения. С помощью люминофоров можно преобразовать невидимое излучение в видимый свет.

Например, в так называемых лампах дневного света невидимое глазом ультрафиолетовое излучение электрического разряда в парах ртути преобразуется в видимый свет, спектральный состав которого можно изменять подбором люминофора, покрывающего стенки лампы (фотолюминесценция). Однако наибольший практический интерес вызывает явление электролюминесценции, что в немалой степени обусловлено быстрым развитием оптоэлектроники.

Гальваномагнитные эффекты - явления, возникающие в полупроводнике при одновременном воздействии на него электрического и магнитного полей, например, эффект Холла. Если пластину полупроводника, по которой проходит электрический ток, поместить в магнитное поле, перпендикулярное току, то на боковых гранях пластины в направлении, перпендикулярном току и магнитному полю, возникнет разность потенциалов, названная Э. д. с.

Холла.

Появление э. д. с. Холла обусловлено тем, что на носители заряда, движущиеся со скоростью v , в магнитном поле с индукцией B действует сила Лоренца:

$$F_L = e[vB] = e\mu[EB], \quad (3.21)$$

отклоняющая заряды к одной из боковых граней пластины. Направление действия силы F_L можно определить по «правилу левой руки», относя его к техническому направлению тока. Направление силы Лоренца не зависит от знака носителей заряда, а определяется направлениями электрического и магнитного полей.

При заданных направлениях напряженности E и индукции B электроны и дырки в полупроводниках отклоняются в одну и ту же сторону. Поэтому полярность э. д. с. Холла в полупроводнике n - типа оказывается противоположной полярности, получаемой в материале p - типа, что и используется для определения типа электропроводности полупроводников.

По результатам измерения э. д. с. Холла определяют не только знак носителей заряда, но и рассчитывают их концентрацию, а при известном значении удельной проводимости находят и подвижность носителей заряда.

3.5. Свойства германия

Теоретически существование и основные свойства неизвестного элемента по разработанной им таблице предсказал в 1870г. Д. И. Менделеев. Только в 1886г. немецкий химик К. Винклер обнаружил в минеральном сырье новый элемент, который назвал германием (Ge). Открытие германия на практике явилось торжеством Периодического закона Д. И. Менделеева.

Германий относится к числу сильно рассеянных элементов, т. е. часто встречается в природе, но присутствует в различных минералах в очень небольших количествах. Содержание Ge в земной коре составляет около $(7...10)^{-4}\%$, что примерно равно природным запасам таких распространенных металлов, как олово и свинец, и существенно превышает количество серебра, кадмия и ртути.

Тем не менее, получение Ge в элементарном виде вызывает затруднения. Источники промышленного получения Ge - побочные продукты цинкового производства и коксования углей.

Чистый германий обладает металлическим блеском, имеет высокую твердость и хрупкость. Подобно кремнию Ge кристаллизуется в структуре алмаза, элементарная ячейка которого содержит восемь атомов. Кристаллическую решетку типа решетки алмаза можно рассматривать как наложение

двух кубических гранцентрированных решеток, сдвинутых друг относительно друга в направлении объемной диагонали на четверть ее длины. Каждый атом решетки находится в окружении четырех ближайших соседей, расположенных в вершинах правильного тетраэдра.

Кристаллы *Ge* химически устойчивы на воздухе при комнатной температуре. Из-за нестабильности свойств собственный окисел на поверхности *Ge*, в отличие от собственного окисла *Si*, не является надежной защитой материала от разрушения. Рассмотрим свойства простых полупроводников (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Свойства простых полупроводников

№	Свойства полупроводников	Германий (<i>Ge</i>)	Кремний (<i>Si</i>)	Селен (<i>Se</i>)
1	2	3	4	5
1	Период решетки · 10 ⁻⁹ м	5,66	5,42	4,36
2	Плотность при 20 ⁰ С, Мг/м ³	5,3	2,3	4,8
3	Температурный коэффициент линейного расширения (0...100 ⁰ С), К ⁻¹	6 · 10 ⁻³	4,2 · 10 ⁻⁶	25 · 10 ⁻⁶
4	Удельная теплопроводность, Вт/(м·К)	55	80	3
5	Удельная теплоемкость (0...100 ⁰ С), Дж/кг	333	710	330
6	Температура плавления, ⁰ С	936	1414	220
7	Теплота плавления, Дж/кг	4,1 · 10 ⁵	1,6 · 10 ⁶	6,4 · 10 ⁴
8	Собственное удельное сопротивление при 20 ⁰ С	0,47	2 · 10 ³	-
9	Собственная концентрация носителей заряда, м ⁻³	2,5 · 10 ¹⁹	10 ¹⁶	-
10	Ширина запрещенной зоны, эВ при 0 К / 300 К	0,75/0,67	1,17/1,12	2,5/2,0
11	Подвижность электронов, м ² /(В·с)	0,39	0,14	-
12	Подвижность дырок, м ² /(В·с)	0,19	0,05	0,2 · 10 ⁻⁶
13	Работа выхода электронов, эВ	4,8	4,3	2,85
14	Диэлектрическая проницаемость	16	12,5	6,3

При комнатной температуре *Ge* не растворяется в воде, соляной и разбавленной серной кислотах. Активными растворителями германия в нормальных условиях является смесь азотной и плавиковой кислот, а также раствор перекиси водорода. При нагревании *Ge* интенсивно взаимодействует с галогенами, серой и сернистыми соединениями.

Германий обладает относительно невысокой температурой плавления (936°C) и ничтожно малым давлением насыщенного пара при этой температуре. Отмеченное обстоятельство существенно упрощает технику кристаллизационной очистки и выращивания монокристаллов.

Даже в расплавленном состоянии *Ge* практически не взаимодействует с графитом и кварцевым стеклом. Физические свойства *Ge* приведены в таблице 3.2.

Ширина запрещенной зоны *Ge* при температуре выше 200 K изменяется по линейному закону. При комнатной температуре подвижность электронов *Ge* примерно в два раза превышает подвижность дырок. Однако при изменении температуры это соотношение не остается неизменным.

Для изготовления приборов применяют *Ge* с добавками электрически активных примесей. Практический интерес представляет зависимость удельного сопротивления *Ge* от концентрации примесных атомов (рисунок 3.7).

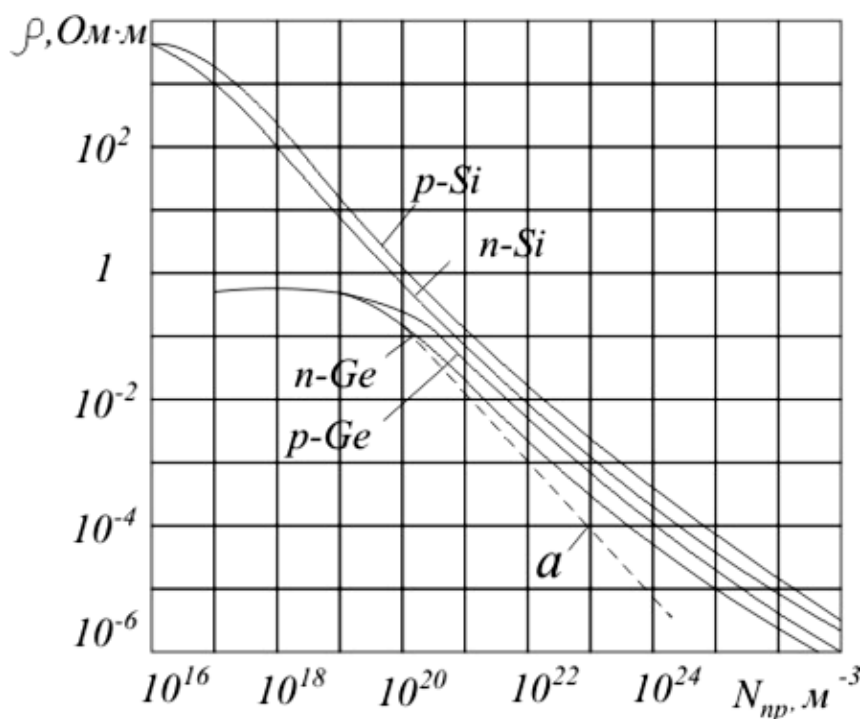


Рисунок 3.7 – Зависимость удельного сопротивления кремния и германия от концентрации примесей при температуре 20°C

Температурная зависимость используется при расчетах количества легирующей примеси, необходимой для выращивания монокристаллов *Ge* с требуемым удельным сопротивлением.

При невысокой концентрации примеси, когда ее влияние еще не сказывается на изменении подвижности носителей заряда, зависимость носит линейный характер (прямая линия *a* на рисунке 3.7). Линейность нарушается в области сильного легирования, что является следствием уменьшения подвижности носителей заряда *Ge* при увеличении содержания примесей в полупроводнике.

Концентрационная зависимость подвижности электронов и дырок в *Ge* приведена на рисунке 3.8.

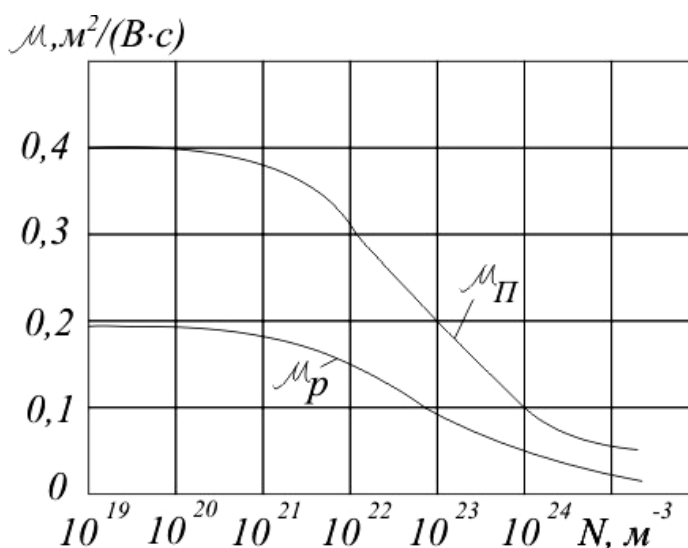


Рисунок 3.8 – Зависимость подвижности основных носителей заряда в германии от концентрации легирующей примеси

Если концентрация примесных атомов *Ge* превышает 10^{22}м^{-3} , то рассеяние на ионизированных примесях играет существенную роль даже при 20°C . При одинаковой степени легирования *Ge* подвижность дырок *p*- типа всегда меньше подвижности электронов *n*- типа.

Поэтому зависимость удельного сопротивления от концентрации легирующих примесей для германия *p*- типа идет выше, чем аналогичная зависимость для германия *n*- типа. При концентрациях примесей менее 10^{19}м^{-3} удельное сопротивление *Ge* определяется собственной электропроводностью.

Термообработка *Ge* приводит к существенному изменению его электрических свойств. Так, если полупроводник *n*- типа нагреть до температуры выше 550°C , выдержать некоторое время, а затем быстро охладить (закалить), то можно наблюдать изменение типа электропроводности *Ge*.

Аналогичная термообработка германия *p*- типа приводит к снижению

удельного сопротивления без обращения типа электропроводности. Отжиг закаленных образцов *Ge* при температуре 500°C восстанавливает тип электропроводности и значение удельного сопротивления.

На основе *Ge* выпускается широкая номенклатура диодов и транзисторов. Широкое распространение получили выпрямительные плоскостные диоды и сплавные биполярные транзисторы. Выпрямительные плоскостные диоды рассчитывают на прямые токи (0,3...1000) А при падении напряжения не более 0,5В. Основным недостатком диодов - невысокие допустимые обратные напряжения. Транзисторы бывают низкочастотными и высокочастотными, мощными и маломощными. Нанесение пленочной изоляции из SiO_2 позволяет изготавливать транзисторы по планарной технологии.

Германий используют для создания туннельных диодов, варикапов, точечных высокочастотных и импульсных диодов. В импульсных диодах для достижения высокой скорости переключения требуется материал с малым временем жизни неравновесных носителей заряда. Этому требованию удовлетворяет *Ge* легированный золотом, создающий в германии эффективные центры рекомбинации.

Благодаря высокой подвижности носителей заряда *Ge* применяют для изготовления датчиков Холла и других магниточувствительных приборов. Оптические свойства позволяют использовать *Ge* для изготовления фототранзисторов и фотодиодов, оптических фильтров, модуляторов света и коротких радиоволн. Рабочий диапазон температур *Ge* приборов от - 60 до + 70°C. Невысокий верхний предел рабочей температуры является существенным недостатком германия.

3.6. Свойства кремния

В противоположность *Ge*, кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре, где его содержится 29,5% (по массе). По распространенности в природе *Si* занимает среди элементов второе место после кислорода. Многочисленные соединения *Si* входят в большинство горных пород и минералов. Песок и глина, образующие минеральную часть почвы, также представляют собой соединения *Si*. Наиболее распространенным соединением этого элемента является двуокись кремния SiO_2 . Свободная SiO_2 встречается в основном в виде минерала кварца.

В ряде месторождений чистота кварцевого песка SiO_2 достигает 99,9%. В свободном состоянии *Si* в природе не встречается. В элементарном виде *Si* впервые был получен в 1811г., т. е. намного раньше германия. Однако как материал полупроводниковой электроники *Si* нашел широкое применение лишь во второй половине текущего столетия после разработки эффективных методов его очистки.

Технология получения Si необходимой полупроводниковой чистоты включает операции:

- превращение Si в легколетучее соединение, которое после очистки легко восстанавливается;
- очистку соединения физическими и химическими методами;
- восстановление соединения с выделением чистого Si ;
- окончательную кристаллизационную очистку;
- выращивание монокристаллов.

Кремний кристаллизуется в структуре алмаза с несколько меньшим, чем у Ge , периодом идентичности кристаллической решетки. Меньшие, чем у Ge , расстояния между атомами в решетке обуславливают более сильную ковалентную химическую связь и, как следствие этого, более широкую запрещенную зону.

В химическом отношении, кристаллический Si при $20^{\circ}C$ является относительно инертным веществом, нерастворим в воде, не реагирует со многими кислотами в любой концентрации. Хорошо растворяется Si лишь в смеси азотной и плавиковой кислот и в кипящих щелочах. Si устойчив на воздухе при нагревании до $900^{\circ}C$, а выше этой температуры Si начинает интенсивно окисляться с образованием SiO_2 . При нагревании Si легко взаимодействует с галогенами и хорошо растворим во многих расплавленных металлах (Al, Ga, Sn, Au, Ag и др.).

С рядом металлов (Cr, Mo, Fe, Cu, Mg и др.) кремний образует устойчивые химические соединения - силициды. Кремний обладает высокой температурой плавления и в расплавленном состоянии отличается высокой химической активностью, поэтому возникают большие трудности с подбором тигельного материала при выращивании монокристаллов Si .

Наиболее чистые материалы (кварц и графит) при высоких температурах взаимодействуют с Si . В результате реакции Si с углеродом образуется карбид кремния SiC - очень устойчивое химическое соединение с полупроводниковыми свойствами.

Основные физические свойства Si даны в таблице 2.

Рассмотрим температурную зависимость ширины запрещенной зоны кремния (рисунок 3.9).

Благодаря более широкой запрещенной зоне собственное удельное сопротивление Si на три с лишним порядка превосходит собственное сопротивление Ge . Поведение примесей в Si подчиняется тем же закономерностям, что и в германии.

Поверхность Si , не защищенная должным образом от внешних воздействий, обычно имеет нестабильные свойства. Адсорбция различных примесей на поверхности Si сопровождается образованием дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника.

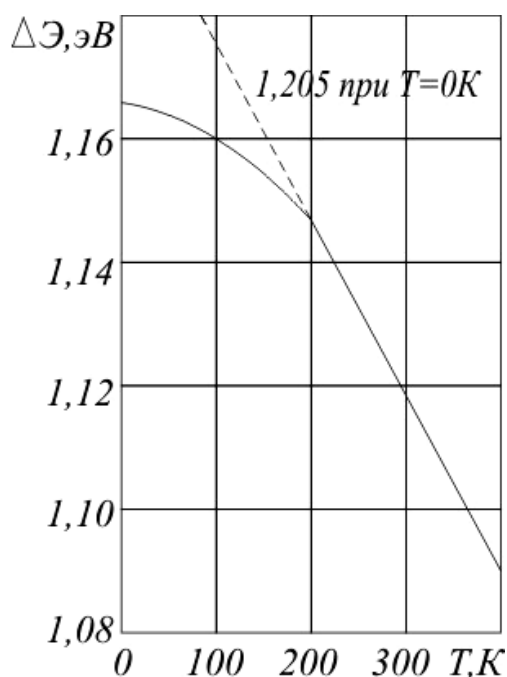


Рисунок 3.9 – Зависимость ширины запрещенной зоны Si от температуры.

Перераспределение носителей заряда между объемными и поверхностными состояниями Si существенно повлияет на электрические свойства приповерхностной области (вплоть до образования слоя с электропроводностью противоположного типа).

При изготовлении больших интегральных микросхем все большее распространение получает метод, основанный на использовании поликристаллического Si . Особенность метода заключается в том, что на поверхность пластин Si , покрытых диэлектрической пленкой SiO_2 , осаждается слой поликристаллического Si , который может выполнять функции резистора, а также контактных областей к эмиттеру и коллектору транзистора.

Кремний является базовым материалом при изготовлении планарных транзисторов и интегральных микросхем. Освоение планарной технологии кремниевых приборов вызвало качественный скачок в полупроводниковом производстве.

Полупроводниковые интегральные микросхемы, нашли широко применение в схемах автоматики и электроэнергетического оборудования и преобразовательной технике (выпрямители, стабилизаторы, инверторы, конверторы и др.).

Несмотря на интенсивное развитие интегральной микроэлектроники, в общем объеме выпуска полупроводниковых изделий значительную долю составляют кремниевые дискретные приборы.

Из чистого Si изготавливают выпрямительные и импульсные диоды,

низкочастотные и высокочастотные, мощные и маломощные биполярные транзисторы, полевые транзисторы и приборы с зарядовой связью.

Кремниевые выпрямительные плоскостные диоды могут выдерживать обратные напряжения до 1500В и пропускать ток в прямом направлении до 1500А, существенно превосходя по этим параметрам германиевые диоды. Из материала изготавливают стабилитроны и тиристоры. Кремниевые стабилитроны в зависимости от степени легирования *Si* имеют напряжение стабилизации от 3 до 400В.

Широкое применение в электротехнике нашли *Si* фоточувствительные приборы, особенно фотодиоды, отличающиеся высоким быстродействием. Кремниевые фотоэлементы, служащие для преобразования лучистой солнечной энергии в электрическую энергию, называют солнечными батареями.

Кремниевые фотоэлементы используются в системах энергоснабжения электронных часов и калькуляторов, кораблей и автомобилей, зданий и сооружений и т.д. Их коэффициент полезного действия составляет (8...10)%.

Кремний используется для изготовления датчиков Холла и тензодатчиков, обладающих сильной зависимостью удельного сопротивления от механических деформаций полупроводника.

Благодаря тому, что *Si* имеет более широкую запрещенную зону, чем *Ge*, кремниевые приборы работают при более высоких температурах, чем *Ge*. Верхний температурный предел работы *Si* приборов достигает (180...200)°С.

3.7. Свойства карбида кремния

Карбид кремния является единственным бинарным соединением, образованным полупроводниковыми элементами IV группы Периодической таблицы Д.И. Менделеева. В природе карбид *SiC* встречается редко и в ограниченных количествах.

По типу химической связи *SiC* относится к ковалентным кристаллам. Доля ионной связи, обусловленная некоторым различием в электрических отрицательностях атомов *Si* и *C*, не превышает (10...12)%.

Следствием сильных химических связей между атомами *Si* и *C* является очень высокая химическая и температурная стабильность, и твердость карбида кремния.

Рассмотрим основные свойства распространенных политипов карбида *SiC* (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Электрофизические свойства политипов карбида кремния

№	Модификация	$\beta - SiC$	$\alpha - SiC$	$\alpha - SiC$	$\alpha - SiC$	$\alpha - SiC$
	Символ политипа	3C	15R	6H	4H	2H
1	Период решетки $\cdot 10^{-9} \text{ м}$	4,36	3,07(a) 37,3(c)	3,08(a) 15,1(c)	3,07(a) 10,1(c)	- -
2	Ширина запрещенной зоны, эВ	2,391	2,986	3,023	3,265	3,333
4	Подвижность электронов, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,11	0,05	0,03	0,07	-
5	Подвижность дырок, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

У различных политипов существенно различаются значения ширины запрещенной зоны и подвижности электронов. Вариация основных электрофизических свойств в различных политипах SiC позволяет рассматривать карбид кремния как группу полупроводниковых материалов, имеющих одинаковый химический состав.

В противоположность электрофизическим свойствам, физико-механические и химические свойства кристаллов SiC слабо зависят от структуры политипа. SiC является одним из наиболее твердых веществ (твердость по минералогической шкале 9,5). SiC устойчив против окисления до температур свыше 1400°C .

При температуре 20°C карбид кремния не взаимодействует ни с какими кислотами. При нагревании SiC растворяется в расплавах щелочей и реагирует с ортофосфорной кислотой.

Электропроводность кристаллов SiC при температуре 20°C примесная. Тип электропроводности и окраска кристаллов SiC зависят от инородных примесей. Чистый SiC бесцветен.

Примеси элементов V группы таблицы Д.И. Менделеева (N, P, As, Sb, Bi) и железа в карбид SiC дают зеленую окраску и электропроводность n - типа, элементы II (Ca, Mg) и III групп (B, Al, Ga, In) - голубую и фиолетовую окраску (в толстых слоях - черную), а электропроводность p - типа. Избыток Si приводит к электронной электропроводности SiC , а избыток C - к дырочной.

Собственная электропроводность карбида SiC наблюдается, начиная с температуры $1400^{\circ}C$. Удельная проводимость порошкообразного материала SiC зависит от удельной проводимости зерен исходного материала, их размера, степени сжатия порошка, напряженности электрического поля и температуры.

Замечательной особенностью карбида кремния является способность к люминесценции SiC в видимой области спектра. Используя различные поли-типы, а также изменяя примесный состав монокристаллов, в SiC можно в принципе получить люминесценцию с любым цветом излучения - от красного до фиолетового.

Это свойство карбида кремния используется для создания светодиодов - источников излучения, работающих на принципе инжекционной электролюминесценции. Основой светодиода является $p - n$ - переход, который формируют в процессе диффузии примесей. Диффузию SiC проводят при температуре $2000^{\circ}C$ в замкнутых рабочих объемах при равновесном давлении пара.

Широкое распространение получили светодиоды желтого излучения, получаемые диффузией бора в SiC p - типа, который легирован азотом. К недостаткам SiC - светодиодов относится невысокая эффективность преобразования электрической энергии в световую. Существенным преимуществом SiC является стабильность характеристик, практически полное отсутствие деградации, т.е. необратимого ухудшения свойств. Светодиоды из SiC используют в качестве световых эталонов и опорных источников света в измерительных устройствах электроустановок.

Рассмотрим влияние оптически активных примесей на смещение спектра электролюминесценции SiC - светодиодов, изготовленных на основе наиболее распространенного политипа $6H$ (рисунок 3.10).

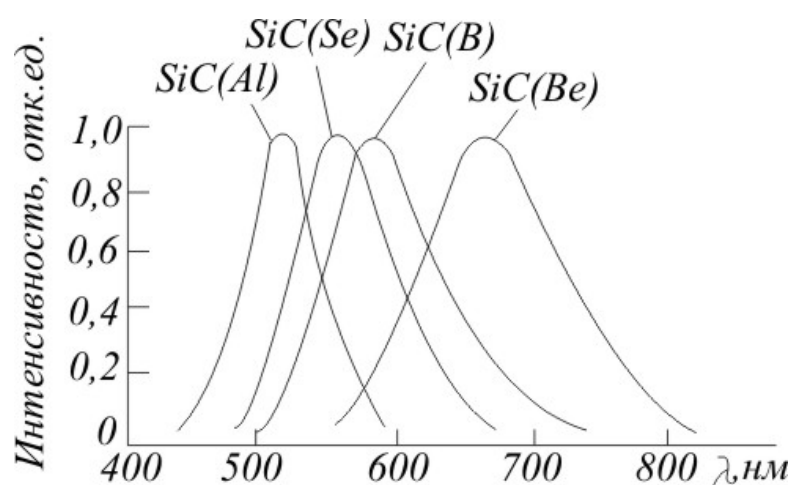


Рисунок 3.10 - Зависимости интенсивности электролюминесценции SiC - светодиодов от состава примесей для политипа $6H$

Практический интерес представляет применение SiC для изготовления мощных выпрямительных диодов и высокотемпературных тензорезисторов. В перспективе возможно использование SiC для создания полевых транзисторов, термисторов и других приборов для схем автоматики электроустановок. На основе порошкообразного карбида SiC , скрепленного связующим материалом, изготавливают варисторы (нелинейные полупроводниковые резисторы), высокотемпературные нагреватели электроэнергетического оборудования.

Варисторы применяют в системах автоматики электроэнергетического оборудования и вычислительной технике, в преобразователях для стабилизации токов и напряжения, в электроустановках для защиты схем от перенапряжения, а также регулирования и преобразования сигналов. Благодаря высокой твердости SiC используют для механической обработки электротехнических материалов, не поддающихся обработке другими металлами.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое собственный полупроводник?
2. Может ли примесный полупроводник обладать собственной электропроводностью?
3. Какие примеси в ковалентных полупроводниках являются донорами?
4. Какие примеси в ковалентных полупроводниках являются акцепторами?
5. Объясните температурную зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике.
6. Какие основные механизмы рассеяния ограничивают подвижность носителей заряда в ковалентных полупроводниках?
7. Может ли проводимость полупроводников уменьшаться при повышении температуры?
8. Каким образом в полупроводнике можно создавать неравновесные носители заряда?
9. Назовите основные механизмы поглощения света в полупроводниках. Какие из полупроводников являются фотоактивными?
10. Что понимают под фоторезистивным эффектом?
11. Назовите основные виды электролюминесценции полупроводника.
12. Как с помощью эффекта Холла определить тип электропроводности полупроводника?

13. Какие физические факторы обуславливают нарушения закона Ома в полупроводниках при воздействии на них сильного электрического поля?
14. Назовите основные химические элементы, обладающие свойствами полупроводников.
15. Какие из полупроводников имеют наибольшее значение для электроники?
16. Что служит сырьем при получении кремния и германия?
17. Каким образом производится кристаллизационная очистка кремния и германия?
18. Как изменяется ширина запрещенной зоны кремния при понижении температуры?
19. Как изменяется ширина запрещенной зоны германия при понижении температуры?
20. При каком допустимом содержании примесей германий будет обладать собственным сопротивлением при комнатной температуре?
21. Как изменяется подвижность носителей заряда в кремнии при увеличении концентрации легирующих примесей?
22. Как изменяется подвижность носителей заряда германия при увеличении концентрации легирующих примесей?
23. Какие преимущества кремния обуславливают его широкое применение при изготовлении пленарных транзисторов и интегральных микросхем?
24. Чем различаются свойства политипов карбида кремния?
25. Назовите закономерности в изменении электрофизических свойств кремния?
26. Какие закономерности в изменении электрофизических свойств германия Вам известны?
27. Как изменяется ширина запрещенной зоны полупроводниковых твердых растворов в зависимости от состава?
28. Какие полупроводниковые материалы наиболее перспективны для создания гетеропереходов со свойствами идеального контакта?

4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1. Классификация диэлектриков

Характер энергетического спектра у электротехнических материалов - металлических проводников, полупроводников и диэлектриков различен. В металлических проводниках валентная зона заполнена не полностью или перекрывается с зоной проводимости. В полупроводниках и диэлектриках зона проводимости и валентная зона разделены некоторым энергетическим зазором, называемым запрещенной зоной. Формально к полупроводникам относят вещества, у которых запрещенная зона меньше 3эВ .

Вещества с более широкой запрещенной зоной относят к диэлектрикам. У реальных диэлектриков ширина запрещенной зоны может достигать $(10\dots 12)\text{эВ}$. Различие в положении энергетических зон у диэлектриков, полупроводников и металлических проводников показано на рисунке 4.1.

Согласно зонной теории, электроны валентной зоны имеют практически одинаковую свободу движения во всех твердых телах независимо от того, являются ли они металлами или диэлектриками. Движение осуществляется путем туннельного перехода электронов от атома к атому. Для объяснения различий в электрических свойствах материалов, необходимо учитывать их различную реакцию на внешнее электрическое поле электронов в заполненной и незаполненной зонах.

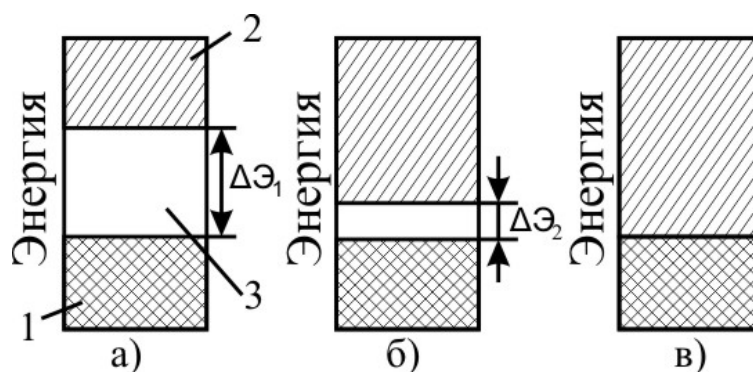


Рисунок 4.1 – Структурные схемы энергетических уровней электротехнических материалов: *а* – диэлектрика; *б* – полупроводника; *в* – проводника (1 – заполненная электронами зона; 2 – свободная зона; 3 – запрещенная зона)

Внешнее электрическое поле стремится нарушить симметрию в распределении электронов по скоростям, ускоряя электроны, движущиеся в направлении действующих электрических сил, и замедляя частицы с противоположно направленным импульсом. Однако подобное ускорение и

замедление связано с изменением энергии электронов, что должно сопровождаться переходом их в новые квантовые состояния. Очевидно, такие переходы могут осуществляться лишь в том случае, если в энергетической зоне имеются свободные уровни.

Добавочная энергия, приобретаемая электронами на длине свободного пробега под действием электрического поля, составляет ($10^{-8} \dots 10^{-4}$) эВ, т. е. больше расстояния между подуровнями в зоне.

В металлах, где зона не полностью укомплектована электронами, даже слабое поле способно сообщить электронам достаточный импульс, чтобы вызвать их переход на близлежащие свободные уровни. По этой причине металлы являются хорошими проводникам электрического тока.

В полупроводниках и диэлектриках при абсолютной температуре близкой к нулю все электроны находятся в валентной зоне, а зона проводимости свободна. Электроны полностью заполненной зоны не могут принимать участия в создании электрического тока.

Для появления электропроводности необходимо часть электронов перевести из валентной зоны в зону проводимости. Энергии электрического поля недостаточно для осуществления такого перехода, требуется более сильное энергетическое воздействие, например, нагревание твердого тела. Средняя кинетическая энергия тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке приблизительно равна $\frac{3}{2}kT$. При температуре 20°C эта величина составляет $0,04\text{эВ}$, что существенно меньше ширины запрещенной зоны $\Delta\mathcal{E}$.

Известно, что тепловая энергия неравномерно распределяется между частицами и в каждый момент времени имеются атомы, у которых амплитуда и энергия тепловых колебаний значительно превышают среднее значение. В процессе тепловых колебаний атомы взаимодействуют не только друг с другом, но и с электронами, передавая им часть тепловой энергии.

За счет тепловых флуктуаций часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости. Очевидно, чем выше температура и меньше запрещенная зона, тем выше интенсивность межзонных переходов электронов.

У диэлектриков запрещенная зона настолько велика, что электронная электрическая проводимость не играет определяющей роли. При каждом акте возбуждения и перехода электронов в зону проводимости появляются энергетические вакансии в распределении электронов по состояниям валентной зоны, называемые «дырками».

При наличии дырок электроны валентной зоны могут совершать эстафетные переходы с уровня на уровень.

Во внешнем электрическом поле дырка движется противоположно движению электрона, т. е. ведет себя как некоторый положительный заряд с отрицательной эффективной массой. Таким образом, дырки обеспечивают участие валентных электронов в процессе проводимости.

Процесс перехода электронов в свободное состояние сопровождается и обратным явлением, т. е. возвратом электронов в нормальное состояние. В результате в диэлектрике при любой температуре наступает динамическое равновесие, т. е. количество электронов, переходящих в свободную зону, становится равным количеству электронов, возвращающихся обратно в нормальное состояние.

4.2. Поляризация диэлектриков

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента объема вещества. Различают поляризацию, возникающую под действием внешнего электрического поля, и спонтанную (самопроизвольную), существующую в отсутствие поля.

В некоторых случаях поляризация диэлектриков появляется под действием на материал механических напряжений.

Способность материалов поляризоваться в электрическом поле характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_0}, \quad (4.1)$$

где C_D - емкость конденсатора с диэлектрическим материалом;

C_0 - емкость конденсатора с вакуумом между электродами.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость ε_a , значение которой зависит от выбора системы единиц, связана с относительной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon, \quad (4.2)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная.

Поляризация сопровождается появлением на поверхности диэлектриков связанных электрических зарядов, уменьшающих напряженность поля внутри материала. Количественной характеристикой поляризации служит поляризованность диэлектрика.

Поляризованностью P называют векторную физическую величину, равную отношению электрического момента элемента диэлектрика к объему этого элемента (Кл/м²):

$$P = \frac{dp}{dV} \quad (4.3)$$

Поляризованность однородного плоского диэлектрика в равномерном электрическом поле равна поверхностной плотности связанных зарядов. Для большинства диэлектриков в слабых электрических полях поляризованность пропорциональна напряженности поля:

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0\chi E, \quad (4.4)$$

где $\chi = \varepsilon - 1$ - диэлектрическая восприимчивость материала.

В изотропных диэлектриках направления векторов поляризованности и напряженности поля совпадают. Для анизотропных сред (кристаллы, текстуры) диэлектрическая восприимчивость является тензорной характеристикой, поэтому направления векторов P и E в общем случае оказываются различными. В сильных электрических полях нарушается линейная зависимость между поляризованностью и напряженностью поля (нелинейные эффекты).

Механизмы поляризации. Значение емкости конденсатора с диэлектриком и накопленный в нем электрический заряд обусловлены механизмами поляризации, которые различны у диэлектриков и могут иметь место одновременно у одного и того же материала. Эквивалентную схему диэлектрика, в котором существуют мгновенные и замедленные механизмы поляризации, представим в виде подключенных параллельно к источнику постоянного тока с напряжением U набора из девяти конденсаторов и шести активных сопротивлений.

Первые емкость C_0 и заряд Q_0 соответствуют собственному полю электродов (если в пространстве между ними вакуум), а остальные - мгновенным (электронной и ионной) и замедленным (дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, электронно-релаксационной, миграционной, резонансной и спонтанной) механизмам поляризации (рисунок 4.2).

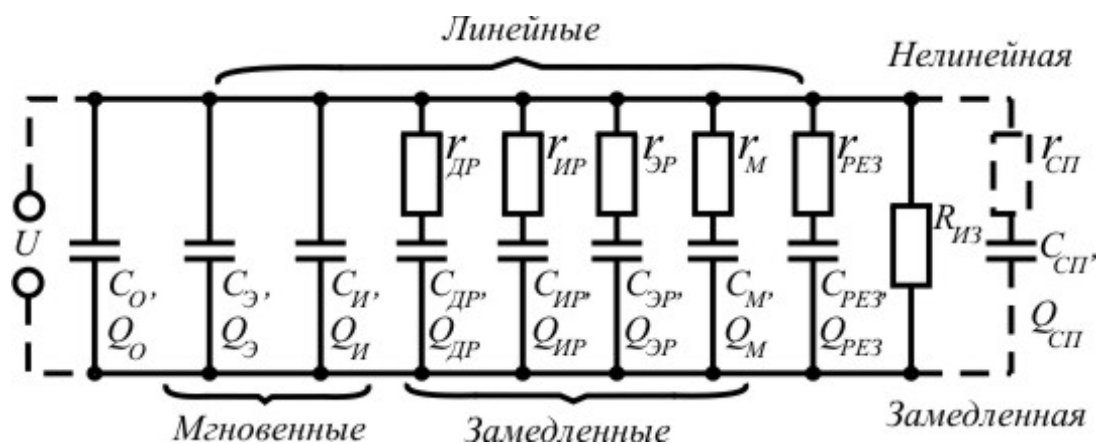


Рисунок 4.2 – Эквивалентная электрическая схема диэлектрика с мгновенными и замедленными механизмами поляризации

Суммарное сопротивление r означает некоторое сопротивление, которое эквивалентно потерям энергии при этих механизмах поляризации. Вся емкость конденсаторов эквивалентной схемы, показанной на рисунке 22, шунтирована сопротивлением изоляции $R_{ИЗ}$, представляющим собой сопротивление диэлектрика току сквозной электропроводности $I_{СК}$.

Электронная поляризация (ЭП) с параметрами емкости $C_э$ и заряда $Q_э$ представляет процесс упругого смещения и деформации электронных оболочек атомов и ионов (рисунок 4.3).

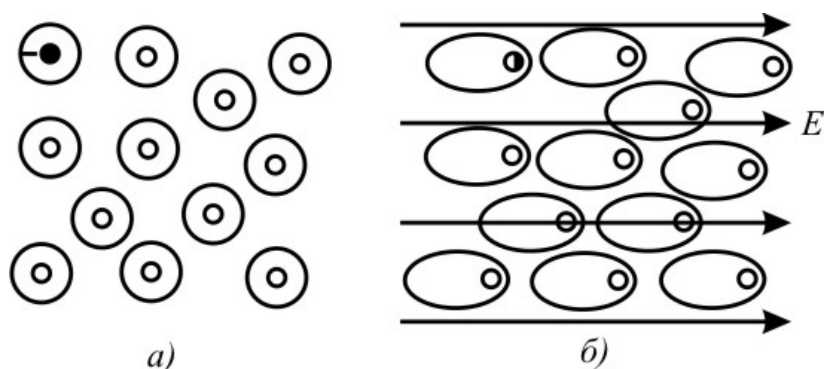


Рисунок 4.3 - Схемы моделей атомов водорода в отсутствие внешнего электрического поля (а) и при его воздействии (б)

Время установления ЭП мало (около 10^{-15} с) и её называют мгновенной. Поляризация проявляется при всех частотах, вплоть до частоты ($10^{14} \dots 10^{15}$)Гц (рисунок 4.4).

ЭП наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерями энергии до значений резонансных частот. Поляризуемость частиц при ЭП не зависит от температуры, а проницаемость ε уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры подобна кривой изменения плотности; причем наиболее резкие снижения наблюдаются при агрегатных переходах вещества (рисунок 4.5).

Изменение относительной проницаемости материала характеризуется температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости (K^{-1}):

$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}. \quad (35)$$

Ионная поляризация (ИП) с параметрами емкости $C_{И}$ и заряда $Q_{И}$ (рисунок 4.2) характерна для материалов с ионным строением и обусловлена процессом смещения упруго связанных ионов на расстояния, меньшие, чем период решетки.

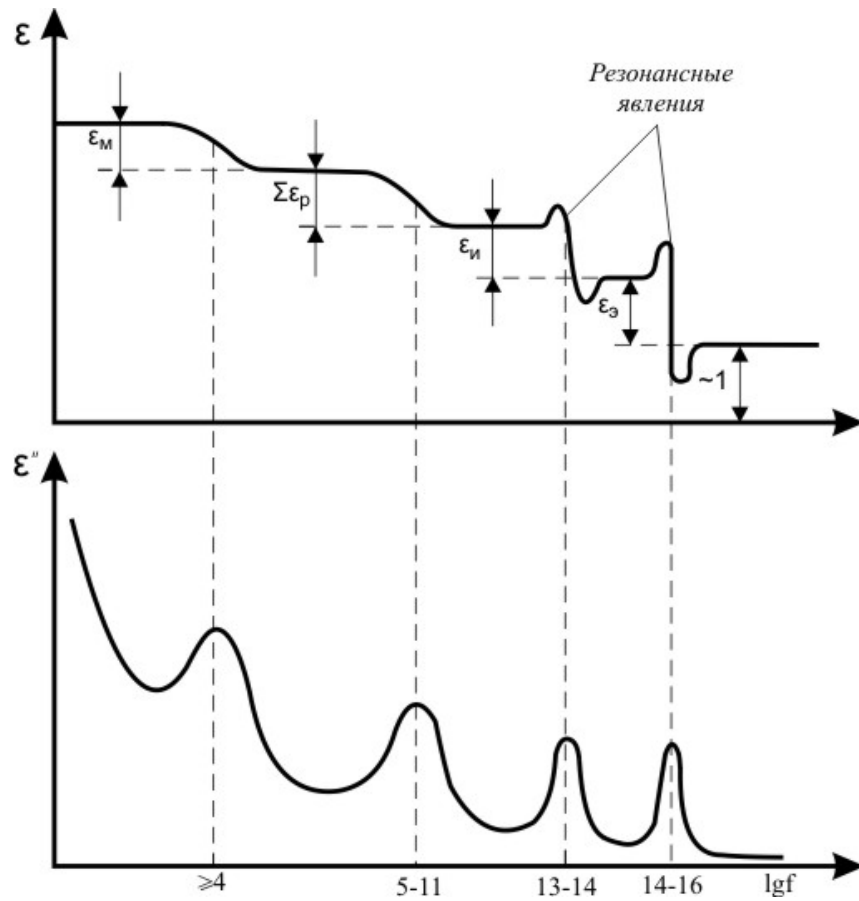


Рисунок 4.4 – Частотная зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости материала

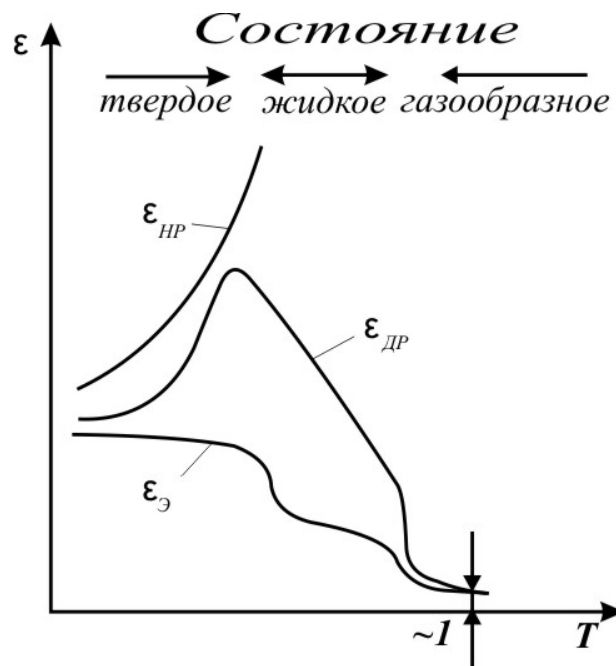


Рисунок 4.5 – Температурная зависимость диэлектрической проницаемости при различных видах поляризации материала

Рассмотрим на модели кристаллической решетки каменной соли при ИП явление смещения ионов натрия из узлов решетки по направлению электрического поля, а ионов хлора - против направления поля (рисунок 4.6).

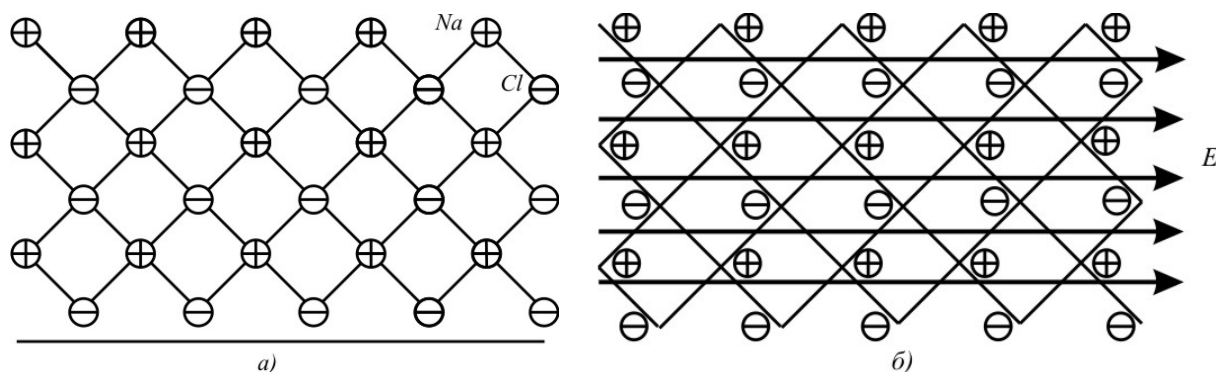


Рисунок 4.6 – Упрощенные модели расположения ионов каменной соли: **a** – в узлах кристаллической решетки при отсутствии электрического поля; **б** - смещенные из узлов решетки при воздействии поля

При ИП процессу смещения ионов с зарядом q , под действием электрического поля напряженностью E , препятствуют упругие силы химической связи. Если в диэлектрике состояние равновесия сил, то:

$$qE = k_{\text{УПР}}\Delta x, \quad (4.6)$$

где $k_{\text{УПР}}$ - коэффициент упругой связи; Δx - смещение ионов диэлектрика, обусловленное внешним электрическим полем.

Смещение на величину Δx двух разноименно заряженных ионов приводит к появлению элементарного электрического момента:

$$p_{\text{И}} = q\Delta x = \frac{q^2 E}{k_{\text{УПР}}}. \quad (4.7)$$

Сумма всех моментов $p_{\text{И}}$, приходящихся на единицу объема, определяет ионный вклад в поляризованность диэлектрика. С повышением температуры расстояния между ионами вследствие теплового расширения материала увеличиваются, что сопровождается ослаблением сил упругой связи и возрастанием поляризованности диэлектрика. Время завершения ИП около 10^{-13} с (рисунок 4.4).

Дипольно-релаксационная поляризация (ДРП) отличается от электронной и ионной тем, что дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием электрического поля, что и является причиной поляризации материала (рисунок 4.7).

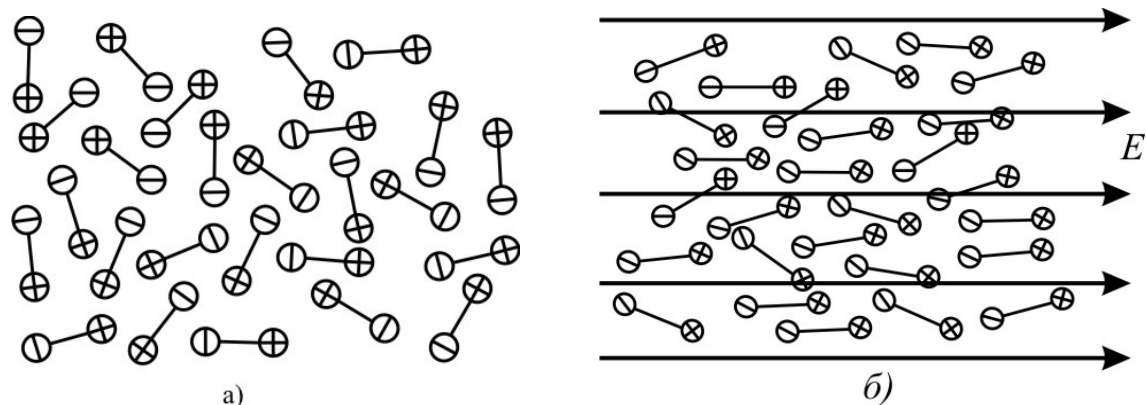


Рисунок 4.7 - Расположение дипольных молекул в отсутствие электрического поля (**a**) и при его воздействии на диэлектрик (**б**)

ДРП возможна, если молекулярные силы не мешают диполям ориентироваться вдоль электрического поля. С увеличением температуры молекулярные силы ослабевают, что усиливает ДРП. Однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому температурная зависимость диэлектрической проницаемости при ДРП характеризуется наличием максимума (рисунок 4.5).

Поворот диполей в направлении поля в вязкой среде требует преодоления некоторого сопротивления, а потому ДРП связана с потерями энергии и нагревом диэлектрика. Это отражено на рисунке 4.1 в виде последовательно включенного с конденсатором активного сопротивления $r_{ДР}$. В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что при быстропеременных полях диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и ДРП уменьшается с увеличением частоты приложенного напряжения (рисунок 4.4).

После снятия электрического поля ориентация частиц постепенно ослабевает. Математически такой процесс выражают формулой, отражающей зависимость дипольной составляющей поляризованности диэлектрика от времени:

$$P_{ДР}(t) = P_{ДР}(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right), \quad (4.8)$$

где t - время, прошедшее после снятия поля; τ_0 - время релаксации.

Время τ_0 - промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полем диполей, после снятия поля, уменьшается в 2,7 раза, вследствие наличия теплового движения в материале. Время τ_0 сильно зависит от температуры. Чем выше температура, тем меньше силы молекулярного сопротивления повороту диполей в вязкой среде, тем меньше время релаксации.

ДРП свойственна полярным жидкостям, этот вид поляризации наблюдают и в твердых полярных органических веществах. Но в этом случае ДРП обусловлена уже поворотом не самой молекулы, а имеющихся в ней полярных радикалов по отношению к молекуле. Такую поляризацию называют также дипольно-радикальной. Примером вещества с ДРП является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп -ОН и кислорода.

Ионно-релаксационная поляризация (ИРП) наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов, например в неорганических стеклах. Слабо связанные ионы вещества под воздействие внешнего электрического поля среди хаотических тепловых перебросов получают избыточные перебросы в направлении поля и смещаются на расстояния, превышающие постоянную кристаллической решетки. После снятия электрического поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия. Этот механизм можно отнести к релаксационной поляризации, при которой имеет место необратимое рассеяние энергии.

Температурная зависимость проницаемости $\varepsilon_{ИР}$ показана на рисунке 4.4. Кривая приведена для твердых диэлектриков, т.к. в расплавленном состоянии ионные соединения становятся проводниками с электролитической проводимостью. Для большинства материалов с ИРП максимума диэлектрической проницаемости в ее температурной зависимости экспериментально не обнаружено, т.к. количество ионов, участвующих в поляризации, с ростом температуры непрерывно возрастает.

Электронно-релаксационная поляризация (ЭРП) возникает за счет возбужденных тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок диэлектрика. Следует отметить высокое значение диэлектрической проницаемости и наличие максимума при ЭРП.

Резонансная поляризация (РП) наблюдается в диэлектриках при световых частотах. РП зависит от физико-химических особенностей вещества, может относиться к собственной частоте электронов или ионов (при очень высоких частотах) или к характеристической частоте дефектных электронов (при более низких частотах). Резонансные изменения диэлектрической проницаемости показаны на рисунке 4.4.

Различие собственных частот колебаний электронов и ионов обусловлено существенными различиями в массах этих частиц. При резонансе сильно увеличивается поглощение электромагнитной энергии. Изменение проницаемости материала с изменением частоты называют диэлектрической дисперсией. В соответствии с механизмами поляризации различают релаксационную и резонансную дисперсии.

Релаксационной называют дисперсию, выражающуюся в монотонном снижении диэлектрической проницаемости с ростом частоты. При резонанс-

ной дисперсии диэлектрическая проницаемость сначала растет, а затем уменьшается, проходя через минимум, и попадает в высокочастотную область характеристики.

Миграционная поляризация (МП) является дополнительным механизмом поляризации, проявляющимся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. МП отключается при наиболее низких частотах (рисунок 4.4) и связана со значительным рассеянием электрической энергии.

Причинами возникновения МП являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т. д. При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, которое становится подобным огромной поляризованной молекуле. В граничных и приграничных слоях слоистых материалов и электродов конденсатора может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов, что создает эффект миграционной поляризации. Время завершения МП ($10^{-3} \dots 1$)с.

Самопроизвольная или спонтанная поляризация (СП) существует у группы твердых диэлектриков, обладающих такими же особенностями поляризации, как и сегнетова соль, а потому получивших название сегнетоэлектриков. В материалах при отсутствии электрического поля происходит самопроизвольное смещение частиц, например, ионов в ионных кристаллах, которое приводит к несовпадению центров положительного и отрицательного зарядов ионов диэлектрика, т.е. к спонтанной поляризации.

Классификация диэлектриков по механизмам поляризации. Все диэлектрики подразделяют на линейные и нелинейные, в зависимости от влияния напряженности электрического поля на значение относительной диэлектрической проницаемости материала, (рисунок 4.8).

Для линейных диэлектриков с малыми потерями энергии зависимость заряда конденсатора от напряжения (переменной полярности) имеет вид, показанный на рисунке 4.8, *а*.

Для нелинейных диэлектриков (сегнетоэлектриков) в этих условиях зависимость заряда от напряжения принимает форму петли гистерезиса (рисунок 4.8, *б*).

На рисунке 4.8 приведены также зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля, подчеркивающие различия линейных и нелинейных диэлектриков. Если емкость конденсатора с линейным диэлектриком зависит только от одних его геометрических размеров и не меняется в случае приложенной разности потенциалов, то в нелинейном диэлектрике емкость становится управляемой электрическим полем, а диэлектрик - активным.

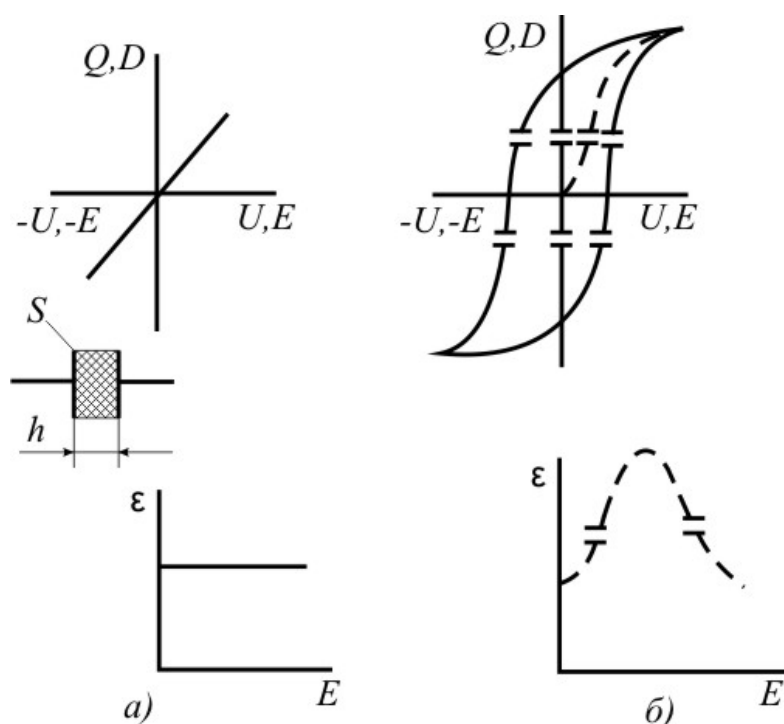


Рисунок 4.8 - Зависимость заряда конденсатора от напряжения для линейных диэлектриков (а) и сегнетоэлектриков (б)

Разделим линейные диэлектрики на группы по механизмам поляризации. Неполлярные диэлектрики, вещества, обладающие в электронной поляризацией: газы (гелий, водород, азот, метан); жидкости (бензол, четыреххлористый углерод); твердые тела (алмаз, полиэтилен, парафин, сера, фторопласт).

Полярные (дипольные) диэлектрики (вещества, имеющие одновременно дипольно-релаксационную и электронную поляризации): нитробензол, кремнийорганические соединения, фенолоформальдегидные смолы, эпоксидные компаунды, хлорированные углеводороды, капрон и др.

Ионные соединения составляют твердые органические диэлектрики с ионной, электронной, ионно-релаксационными и электронно-релаксационными поляризациями.

В этой группе, ввиду существенного различия их электрических характеристик, целесообразно выделить две подгруппы материалов:

- диэлектрики с ионной и электронной поляризациями;
- диэлектрики с ионной, электронной и релаксационными поляризациями.

К первым преимущественно относятся кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов, например, кварц, слюда, корунд (Al_2O_3) и др.

Ко вторым принадлежат неорганические стекла, многие виды керамики, кристаллические диэлектрики с неплотной упаковкой частиц в решетке

Влияние агрегатного состояния на диэлектрическую проницаемость линейных диэлектриков. Значение относительной диэлектрической проницаемости вещества, характеризующее степень его поляризуемости определяется механизмами поляризации. Однако величина проницаемости ε в большой мере зависит и от агрегатного состояния вещества, так как при переходах из одного состояния в другое существенно меняются плотность вещества, его вязкость и изотропность.

Диэлектрическая проницаемость газов (ε). Газы характеризуются малыми плотностями вследствие больших расстояний между молекулами, поэтому поляризация всех газов незначительна ($\varepsilon \approx 1,0$). Поляризация газов бывает чисто электронной или дипольной. Диэлектрическая проницаемость газов тем больше, чем больше радиус молекулы газа, и численно близка к квадрату коэффициента преломления света вещества.

Зависимость диэлектрической проницаемости газа от температуры и давления определяют числом молекул в единице объема вещества. У воздуха при нормальной температуре и давлении $\varepsilon = 1,0006$, а температурный коэффициент диэлектрической проницаемости $\alpha_\varepsilon = 2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков. Вещества могут состоять из неполярных или полярных молекул. Значение проницаемости неполярных жидкостей определяется электронной поляризацией и не велико ($\varepsilon \leq 2,5$). Зависимость относительной диэлектрической проницаемости неполярной жидкости от температуры связана с уменьшением числа молекул в единице объема (рисунок 4.4).

Коэффициент α_ε по абсолютному значению близок к температурному коэффициенту объемного расширения жидкости (α_V). Температурные коэффициенты α_ε и α_V отличаются знаком. Поляризация жидкостей, содержащих дипольные молекулы, определяется электронной и дипольно-релаксационной составляющими процесса.

Вещества обладают большей диэлектрической проницаемостью, чем больше значение электрического момента диполей и число молекул в единице объема диэлектрика. Температурная зависимость проницаемости ε в случае полярных жидкостей имеет более сложный характер, чем в случае неполярных (рисунок 4.5).

Значительное влияние на величину проницаемости ε полярной жидкости оказывает частота (рисунок 4.9).

Когда частота становится настолько большой, что молекулы не успевают следовать за изменением поля, проницаемость ε уменьшается и приближается к величине, обусловленной электронной поляризацией.

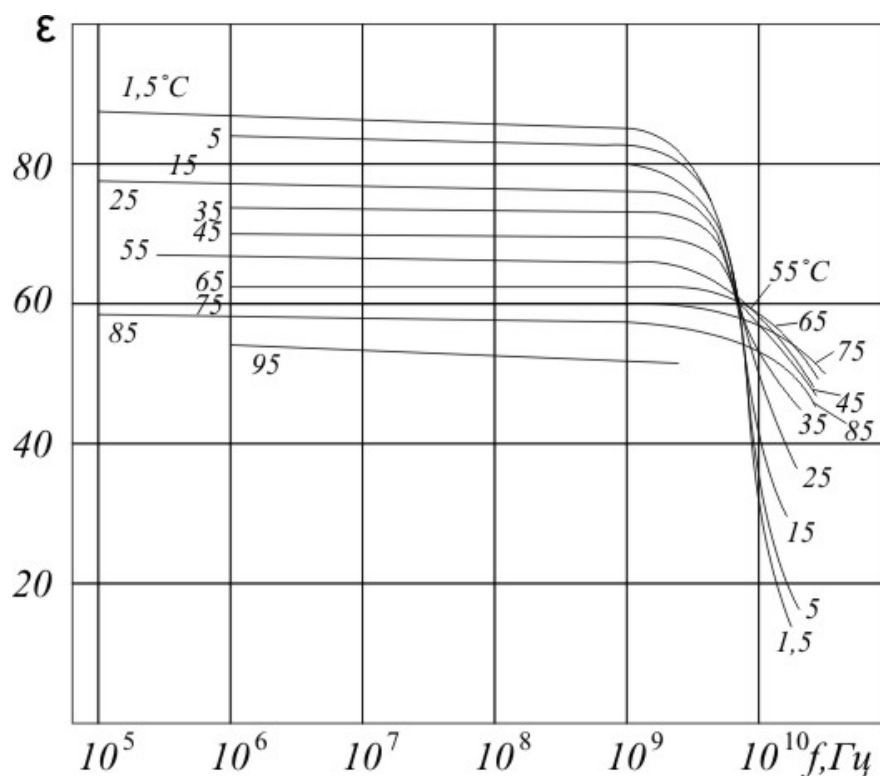


Рисунок 4.9 - Зависимость диэлектрической проницаемости воды от частоты при различных температурах

Рассмотрим влияние частоты на характер зависимости диэлектрической проницаемости от температуры для полярной жидкости (рисунок 4.10).

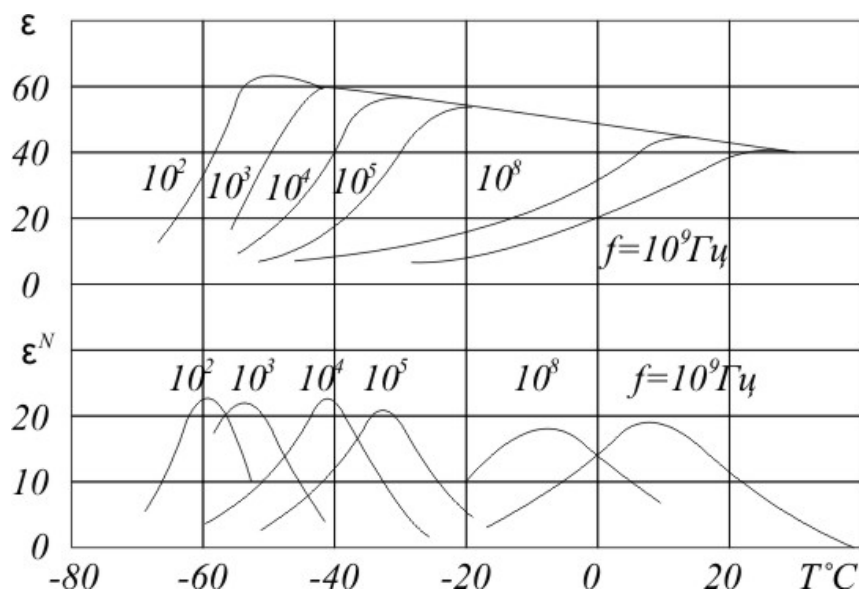


Рисунок 4.10 - Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для полярной жидкости (глицерина) при различных частотах и температурах

С увеличением частоты максимум зависимости диэлектрической проницаемости смещается в область более высоких температур. Это объясняется тем, что максимум проницаемости ε наблюдается, когда время релаксации становится одного порядка с полупериодом действия электрического поля. Если увеличить частоту, то это совпадение наступает при более высокой температуре.

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков. Проницаемость ε принимает самые различные числовые значения из-за разнообразия структуры твердого диэлектрика. В твердых телах возможны все виды поляризации (рисунок 4.2). Наименьшие значения проницаемости ε имеют вещества, состоящие из неполярных молекул и обладающие только электронной поляризацией.

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с плотной упаковкой частиц, обладают электронной и ионной поляризациями и имеют значение диэлектрической проницаемости, лежащее в широких пределах (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Значения относительной диэлектрической проницаемости неполярных твердых диэлектриков

№	Материал	n	n^2	ε
1	Парафин	1,43	2,06	1,9...2,2
2	Полистирол	1,55	2,40	2,4...2,6
3	Сера	1,92	3,69	3,6...4,0
4	Алмаз	2,40	5,76	5,6...5,8

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ионных кристаллов в большинстве случаев положителен, т.к. при повышении температуры наблюдается не только уменьшение плотности вещества, но и возрастание смещения ионов в узлах решетки. Исключением являются кристаллы, которые содержат ионы титана, имеющие отрицательный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости.

Рассмотрим значения проницаемости ε и коэффициента α_ε ионных кристаллов при комнатной температуре (таблица 4.2).

Относительная диэлектрическая проницаемость неорганических стекол находится в узких пределах ($\varepsilon = 4...20$), а коэффициент $\alpha_\varepsilon > 0$.

Таблица 4.2 - Значения относительной диэлектрической проницаемости и ее температурного коэффициента для ионных кристаллов

№	Кристалл	ε	$\alpha_\varepsilon \cdot 10^6, K^{-1}$
1	Каменная соль ($NaCl$)	6,0	+150
2	Корунд (Al_2O_3)	10,0	+100
3	Рутил (TiO_2)	110	-750
4	Титанат кальция ($CaTiO_3$)	150	-1500

Полярные органические диэлектрики обладают в твердом состоянии дипольно-релаксационной поляризацией. Диэлектрическая проницаемость материалов сильно зависит от температуры и частоты приложенного напряжения.

4.3. Электропроводимость диэлектриков

Применяемые в электроэнергетическом оборудовании диэлектрики содержат в своем объеме небольшое количество свободных зарядов, которые перемещаются под действием электрического поля. В электроэнергетическом оборудовании все диэлектрики, находящиеся в постоянном электрическом поле, пропускают сквозной ток утечки. Одновременно происходят поляризационные процессы смещения любых зарядов, протекающие во времени до момента установления и получения равновесного состояния.

Явление поляризации приводит к появлению поляризационных токов (токов смещения) в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризациях настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать обычными измерительными приборами электроэнергетического оборудования.

Токи смещения в диэлектриках. Токи смещения (I_{CM}) при различных видах замедленной поляризации, наблюдаемые у многих технических диэлектриков ЭУ, называют токами абсорбции (I_{AB}). При постоянном напряжении токи I_{AB} , меняя свое направление, проходят только в периоды включения и выключения напряжения электроэнергетическом оборудовании. При переменном напряжении токи I_{AB} протекают в течение всего времени в работы электроэнергетического оборудования.

Наличие в электроизоляционных материалах небольшого числа свободных зарядов, а также инжекция зарядов из электродов электрооборудования приводят к возникновению малых токов сквозных токов ($I_{СК}$).

Полная плотность тока в диэлектрике (тока утечки), представляет собой сумму плотностей абсорбционного и сквозного токов:

$$J_{УТ} = J_{АБ} + J_{СК}. \quad (4.9)$$

Плотность тока смещения в электроизоляционных материалах определяется скоростью изменения вектора электрического смещения (D):

$$J_{СМ} = \frac{dD}{dt} \approx J_{АБ}. \quad (4.10)$$

Плотность тока $J_{СМ}$ включает в себя мгновенные (электронные, ионные) и замедленные смещения зарядов диэлектрика.

Рассмотрим временную зависимость плотности тока $J_{СМ}$ и емкости конденсатора с диэлектриком при мгновенном и длительном приложении электрического поля (рисунок 4.11).

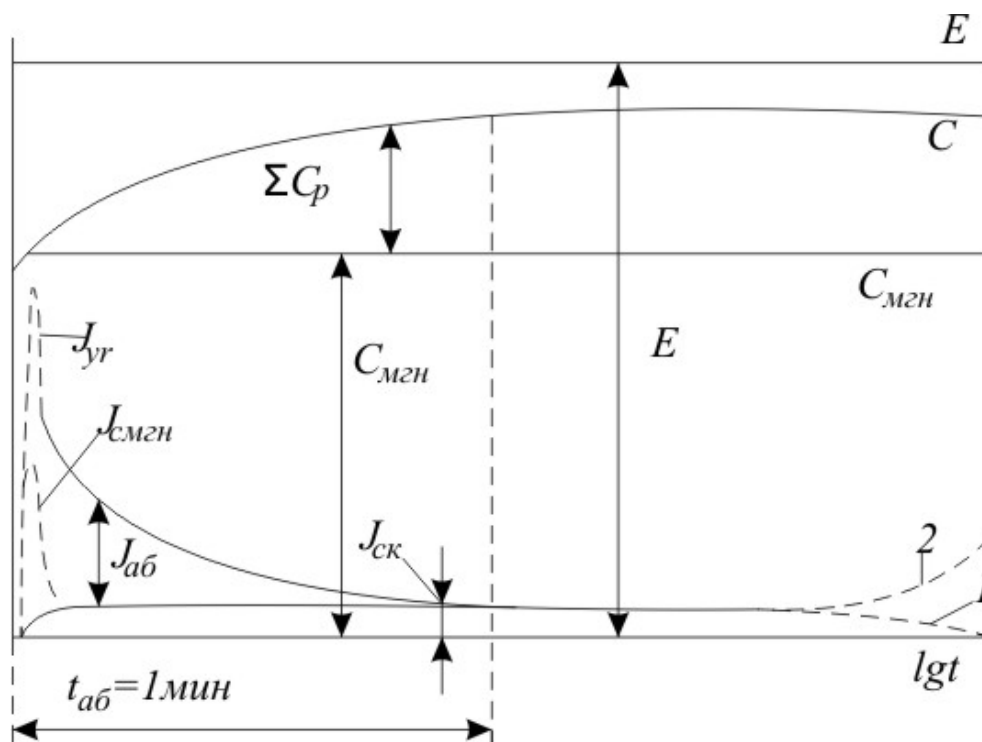


Рисунок 4.11 – Временные зависимости плотности тока и емкости конденсатора с диэлектриком при мгновенном и длительном приложении электрического поля

После завершения процессов поляризации, длящихся меньше одной минуты, через диэлектрик протекает только небольшой ток $I_{СК}$. Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току, который сопровождается выделением и нейтрализацией зарядов на электродах.

При переменном напряжении электропроводность определяется не только током $I_{СК}$, но и активными составляющими поляризационных токов. В большинстве случаев электропроводность диэлектриков ионная, реже - электронная.

Сопротивление изоляции диэлектрика при постоянном напряжении:

$$R_{ИЗ} = \frac{U}{I_{УТ} - I_{АБ}}, \quad (4.11)$$

где U - приложенное к диэлектрику напряжение; $I_{УТ}$ - наблюдаемый ток утечки; $I_{АБ}$ - ток абсорбции.

Соответственно ток абсорбции:

$$I_{АБ} = \sum I_{ПОЛ}, \quad (4.12)$$

где $\sum I_{ПОЛ}$ - сумма токов, вызванных замедленными механизмами поляризации диэлектрика.

У твердых электроизоляционных материалов различают объемную (γ) и поверхностную (γ_s) электропроводности. Для сравнительной оценки электропроводностей γ и γ_s материалов используют удельное объемное (ρ) и удельное поверхностное (ρ_s) сопротивления.

Сопротивление ρ численно равно сопротивлению куба с ребром в 1м, мысленно выделенного из диэлектрика, если ток протекает через две противоположные грани куба (Ом·м).

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление:

$$\rho = R \frac{S}{h}, \quad (4.13)$$

где R - объемное сопротивление, Ом; S - площадь электрода, м²;
 h - толщина образца, м.

Удельное поверхностное сопротивление численно равно сопротив-

лению квадрата, выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата:

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l}, \quad (4.14)$$

где R_s - поверхностное сопротивление образца между параллельно поставленными электродами шириной d , отстоящими друг от друга на расстоянии l .

По удельному объемному сопротивлению определяют удельную объемную: $\gamma = \frac{1}{\rho}$ и удельную поверхностную: $\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$ проводимости. Полная проводимость твердого диэлектрика ($\gamma_{пол}$), соответствующая сопротивлению $R_{из}$ складывается из объемной γ и поверхностной γ_s проводимостей.

Электропроводность диэлектриков зависит от их агрегатного состояния, а также от влажности и температуры окружающей среды. При длительной работе под напряжением сети сквозной ток через твердые или жидкие диэлектрики с течением времени может уменьшаться или увеличиваться, как показано на рисунке 4.11.

Уменьшение тока $I_{СК}$ со временем объясняется тем, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшалась за счет электрической очистки образца (кривая 1 на рисунке 4.11). Увеличение тока $I_{СК}$ со временем (кривая 2) свидетельствует об участии в нем зарядов, которые являются структурными элементами самого изоляционного материала, а также о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения, способном постепенно привести к механическому разрушению – пробоем диэлектрика.

Электропроводность газообразных диэлектриков. Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают малой проводимостью, например, сопротивление воздуха $\rho_B = 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$. Ток в газах возникает только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает под действием внешних факторов или вследствие соударений ионизированных частиц самого газа с молекулами газа (ударная ионизация).

Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются рентгеновские, ультрафиолетовые и космические лучи, радиоактивное излучение, а также термическое воздействие (сильный нагрев газа). Одновременно с процессом ионизации часть положительных ионов, соединяясь с отрицательными частицами, образует нейтральные молекулы. Этот процесс называют рекомбинацией.

Наличие рекомбинации препятствует безграничному росту числа ионов и объясняет установление определенной концентрации газа. Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено напряжение U . Ионы под влиянием напряжения перемещаются, и в цепи возникает ток I . Часть ионов нейтрализуется на электродах, часть исчезает за счет рекомбинации.

Рассмотрим зависимость тока от напряжения для газообразного диэлектрика (рисунок 4.12).

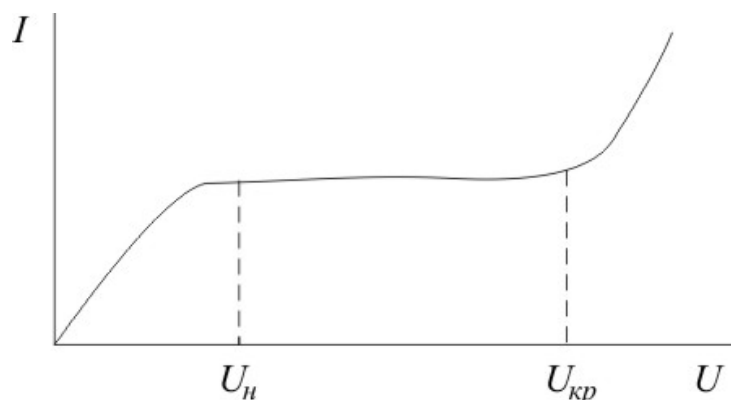


Рисунок 4.12 – Зависимость тока от напряжения для газа

На начальном участке кривой до напряжения U_n выполняется закон Ома (ток I пропорционален напряжению U , а плотность тока (j) – напряженности (E) поля). На рабочем участке (напряжения $U_n \dots U_{кр}$) ионы уносятся к электродам и разряжаются на электродах газообразного диэлектрика, образуя ток насыщения ($I_{нас}$).

Дальнейшее увеличение напряжения вызывает резкое возрастание тока $I_{нас}$. Ток насыщения для воздуха в нормальных условиях и расстоянии между электродами 1 см наблюдается при напряженностях $E \approx 0,6 \text{ В/м}$. Плотность тока насыщения в воздухе составляет около 10^{-15} А/м^2 .

Воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик, до тех пор, пока не появятся условия для появления ударной ионизации. При возникновении ударной ионизации напряжение $U > U_{кр}$ ток $I_{нас}$ начинает быстро увеличиваться и наступает пробой диэлектрика. Для воздуха при нормальных условиях процесс ударной ионизации наступает при напряженности $E_n = 10^6 \text{ В/м}$.

Процесс ударной ионизации используют в технологическом цикле нанесения на части оборудования электроэнергетического оборудования слоев из электроизолирующих материалов.

Электропроводимость жидких диэлектриков. Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул самой жидкости. В неполярных жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе и влаги. В полярных жидкостях электропроводность зависит не только от примесей; иногда она вызывается диссоциацией молекул диэлектрика на ионы.

Ток в жидкости может быть обусловлен как передвижением ионов, так и перемещением относительно крупных заряженных коллоидных частиц. Невозможность полного удаления примесей из жидкого диэлектрика затрудняет получение электроизоляционных жидкостей с малой удельной проводимостью.

Полярные жидкости по сравнению с неполярными имеют повышенную удельную проводимость. Очистка диэлектриков от примесей дает повышение удельного объемного сопротивления жидкости. Удельная проводимость диэлектрика сильно зависит от температуры, так с увеличением температуры: уменьшается вязкость, возрастает подвижность, увеличивается степень тепловой диссоциации ионов и проводимость материала.

Рассмотрим процесс перемещения иона в жидком диэлектрике. Если напряженность $E = 0$, то ион совершает тепловые колебания в положении временного закрепления с частотой $\nu = (10^{12} \dots 10^{13})$ Гц. В результате приобретенной энергии активации, заряд преодолевает силы взаимодействия с соседними молекулами и скачком перемещается в новое положение временного закрепления на расстояние $l = 10^{-10}$ м. В электрическом поле ЭУ перемещение иона становится направленным и приводит к переносу заряда, т.е. к электропроводимости жидкого диэлектрика.

Электропроводность твердых диэлектриков. Для твердых диэлектриков, бумага, картон, лак, пленка, керамика, стекло и других характерна ионная проводимость. Электропроводность обусловлена как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей. Ионная электропроводность сопровождается переносом вещества на электроды.

При электронной электропроводности это явление не наблюдается. В процессе прохождения тока через диэлектрик содержащиеся в нем ионы примесей могут частично удаляться, выделяясь на электродах; что с течением времени приводит к уменьшению проводимости и тока материала (рисунок 4.11).

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена перемещением ионов, вырываемых из решетки под влиянием флуктуаций теплового движения. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы, в частности ионы примесей, а при высоких - основные ионы кристаллической решетки. В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность зависит от наличия примесей.

Удельная проводимость (См/м):

$$\gamma = qN_T\mu_T, \quad (4.15)$$

где q - заряд носителя, (Кл); N_T - число носителей в единице объема, (м^{-3});

$$\mu_T - \text{подвижность носителей заряда, } \left(\frac{\text{м}}{\text{В} \cdot \text{с}} \right).$$

Закон Ома в твердых диэлектриках соблюдается при невысоких напряженностях электрического поля, когда концентрация N_T и подвижность μ заряда не зависят от напряженности поля электроэнергетического оборудования.

В результате скорость перемещения зарядов пропорциональна напряженности поля:

$$v = \mu \cdot E. \quad (4.16)$$

Экспериментами подтверждено, что подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов ($\mu_{\text{э}} \gg \mu_{\text{и}}$). Например, в двуокиси титана подвижность $\mu_{\text{э}} \approx 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, тогда как в алюмосиликатной керамике подвижность $\mu_{\text{э}} \approx 10^{-16} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. В диэлектрике с электронной электропроводностью концентрация электронов до 10^{13} раз меньше, чем в материале с ионной электропроводностью. При ионной электропроводности диэлектрика число диссоциированных ионов:

$$N_T = N \cdot \exp\left(\frac{\mathcal{E}_D}{kT}\right), \quad (4.17)$$

где N - общее число ионов в 1 м^3 ; \mathcal{E}_D - энергия диссоциации заряда;

kT - тепловая энергия диэлектрика.

В изоляционном материале подвижность иона:

$$\mu_T = \mu_{\text{МАКС}} \cdot \exp\left(\frac{\mathcal{E}_{\text{ПЕР}}}{kT}\right), \quad (4.18)$$

где $\mu_{\text{МАКС}}$ - предельная подвижность иона; $\mathcal{E}_{\text{ПЕР}}$ - энергия перемещения.

Подставляя значения N_T и μ_T в формулу (4.15) и объединяя постоянные в выражениях (4.17) и (4.18) одним коэффициентом A получим проводимость:

$$\gamma = A \exp\left(-\frac{b}{T}\right), \quad (4.19)$$

где параметр:

$$b = \frac{\mathcal{E}_D + \mathcal{E}_{ПЕР}}{k}. \quad (4.10)$$

Выражение (4.10) показывает, что чем больше значения энергий \mathcal{E}_D и $\mathcal{E}_{ПЕР}$ иона, тем резче изменяется проводимость при изменении температуры. Обычно энергия $\mathcal{E}_D \gg \mathcal{E}_{ПЕР}$ и температурная зависимость проводимости γ определяется изменением концентрации носителей заряда. Для твердых диэлектриков $b = (10000 \dots 22000) \text{ К}$.

Если в диэлектрике ток обусловлен передвижением разнородных ионов, то проводимость:

$$\gamma = \sum A_i \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_i}{kT}\right). \quad (4.11)$$

В соответствии с формулой (4.11) логарифмические зависимости удельной проводимости от температуры имеют изломы, т.к. при низких температурах электропроводность γ обусловлена ионизированными примесями, а при высоких температурах она становится собственной. Иногда излом кривой температурной зависимости логарифма удельной проводимости объясняется тем, что ионы основного вещества диэлектрика имеют различные энергии диссоциации.

На практике для расчета проводимости и сопротивления применяют формулы:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \exp[\alpha_\gamma(T - T_0)], \quad (4.12)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp[\alpha_\rho(T - T_0)], \quad (4.13)$$

где γ_0 и ρ_0 - удельные объемные проводимость и сопротивление при температуре $T = T_0$; $|\alpha_\gamma| = |\alpha_\rho|$ - температурные коэффициенты материала.

Собственная электропроводность твердых диэлектриков электроустановок и изменение ее в зависимости от температуры определяются структурой вещества и его составом.

В телах кристаллического строения с ионной решеткой электропроводность связана с валентностью ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей проводимостью γ , чем кристаллы с многовалентными ионами. Так, для кристалла $NaCl$ удельная проводимость значительно больше, чем для кристаллов MgO или Al_2O_3 .

В анизотропных кристаллах проводимость γ неодинакова по разным его осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном этой оси. В кристаллических телах с молекулярной решеткой (сера, алмаз) проводимость γ мала и определяется в основном примесями. У твердых пористых диэлектриков при наличии в них влаги значительно увеличивается удельная проводимость. Высушивание материалов повышает их сопротивление, но при нахождении высушенных материалов во влажной среде сопротивление вновь уменьшается.

Наиболее заметное снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, которые содержат растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой проводимостью. Для уменьшения влагопоглощения и влагопроницаемости пористые электроизоляционные материалы подвергают специальной пропитке.

При больших напряженностях поля необходимо учитывать возможность появления в твердых диэлектриках дополнительного электронного тока, возрастающего с увеличением напряженности поля, в результате происходит отступление от закона Ома и пробой изолятора электроустановки.

Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков. Поверхностная электропроводность обусловлена наличием влаги, загрязнениями и различными дефектами поверхности электроизоляционных материалов ЭУ. Вода, покрывающая поверхность диэлектрика, обладает значительной электропроводимостью. Даже при тончайшем слое влаги на поверхности диэлектрика можно обнаружить заметную проводимость, которая определяется толщиной слоя воды.

Поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, удельную поверхностную проводимость рассматривают как свойство самого диэлектрика. Адсорбция влаги на поверхности материала находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому относительная влажность является решающим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Удельная поверхностная проводимость (γ_s) тем ниже, чем меньше полярность вещества и чем чище поверхность диэлектрика.

Наличие загрязнений на поверхности материала, мало сказывается на удельной поверхностной проводимости гидрофобных твердых тел, но сильно влияет на проводимость γ_s гидрофильных диэлектриков.

К гидрофобным относят неполярные диэлектрики, у которых чистая поверхность которых не смачивается водой, а к гидрофильным - полярные и ионные диэлектрики со смачиваемой поверхностью. Значительное увеличение проводимости γ_s происходит у полярных диэлектриков, частично растворимых в воде, на поверхности которых образуется пленка электролита.

Кроме того, к поверхности полярных диэлектриков прилипают различные загрязнения, также приводящие к росту поверхностной проводимости. Высокой проводимостью γ_s обладают и объемно-пористые вещества, т.к. процесс поглощения влаги в глубь материала стимулирует образование ее пленки на поверхности диэлектрика.

С целью уменьшения поверхностной проводимости применяют различные приемы очистки поверхности - промывку спиртом, водой с последующей просушкой и т. п. Наиболее эффективной очисткой поверхности стойкого к нагреву электроизоляционного материала, не впитывающего воду, является продолжительное кипячение в дистиллированной воде.

Покрытие керамики и стекол пленками кремнийорганических лаков сохраняет низкую поверхностную электропроводимость изделий во влажной среде.

4.4. Диэлектрические потери

Мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле электроэнергетического оборудования называют диэлектрическими потерями.

В электроизоляционных материалах потери энергии происходят как при переменном, так и при постоянном напряжении, поскольку в диэлектриках существует сквозной ток утечки, обусловленный электропроводностью. При постоянном напряжении качество материала характеризуют удельные объемные и поверхностные сопротивления, определяющие значения сопротивлений изоляции электроэнергетического оборудования.

При воздействии переменного напряжения на диэлектрик в нем кроме сквозной электропроводности проявляются и другие механизмы превращения электрической энергии в тепловую. Например, потери возрастают, если в твердом диэлектрике есть газовые включения (поры). Качество материала недостаточно характеризовать только сопротивлением изоляции. При эксплуатации электроэнергетического оборудования, для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле, используют такой параметр, как тангенс угла диэлектрических потерь.

Угол диэлектрических потерь (δ) - угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз (φ) между током и напряжением в емкостной цепи. Например, в

случае идеального диэлектрика вектор тока, протекающего в цепи, опережает вектор напряжения на угол равный 90° , угол $\delta = 0$. Чем больше рассеивается мощность, тем меньше угол φ и тем больше угол δ . Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) входит в формулу для рассеиваемой в диэлектрике мощности, поэтому при эксплуатации электроэнергетического оборудования часто пользуются этой характеристикой.

Значение параметра $tg\delta$ на частоте 50Гц измеряют по той же стандартной методике, которая применяется для измерения электрической емкости с помощью моста имеющего четыре плеча, к одному из которых подключают диэлектрик с электродами (конденсатор).

Параметры потерь в диэлектриках. Для оценки параметров, характеризующих потери в диэлектрических материалах электроустановок, рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком. Схема выбрана с таким расчетом, чтобы активная мощность, расходуемая в ней, была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора. Задачу оценки потерь можно решить, заменив конденсатор с потерями идеальным конденсатором с параллельно или последовательно включенным активным сопротивлением. Хотя эквивалентные схемы не объясняют механизм диэлектрических потерь, такой способ достаточно прост и нагляден (рисунок 4.13).

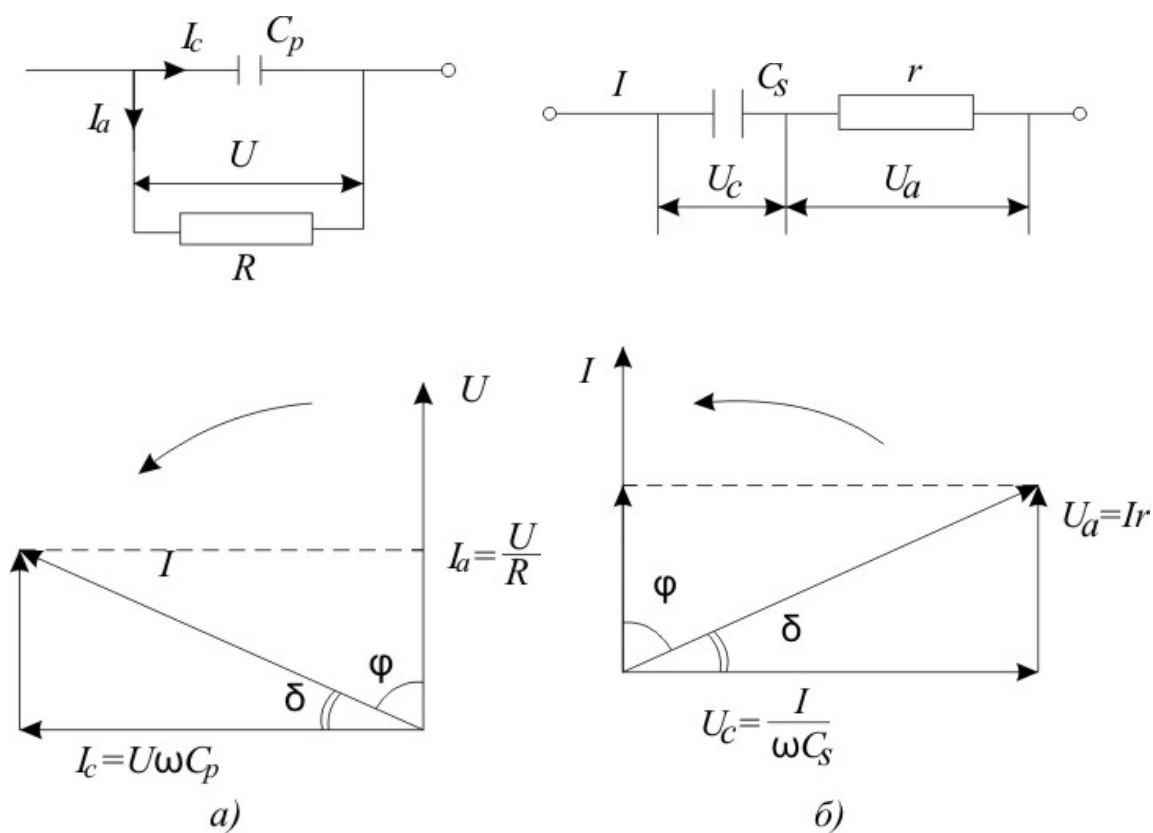


Рисунок 4.13 – Эквивалентные параллельная (а) и последовательная (б) схемы диэлектрика и их векторные диаграммы

Параллельная и последовательная схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $Z_1 = Z_2 = Z$ также равны соответствующие им активные и реактивные составляющие.

В этом случае для параллельной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega C_p R}, \quad (4.14)$$

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta, \quad (4.15)$$

а для последовательной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_a}{U_c} = \omega C_s r, \quad (4.16)$$

$$P_a = IU_a = \frac{U^2 r}{x^2 \left(1 + \frac{r^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (4.17)$$

Из соотношений мощностей (4.15), (4.17) и углов потерь (4.14), (4.16) найдем соотношения между емкостями и сопротивлениями диэлектрика:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad (4.18)$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right). \quad (4.19)$$

Для доброкачественных диэлектриков (значение $\operatorname{tg}^2 \delta \rightarrow 0$ по сравнению с единицей) считаем, что емкости равны ($C_p \approx C_a = C$). Выражения для активной мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут одинаковы:

$$P_a = U^2 \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (4.20)$$

При переменном напряжении сети емкость диэлектрика с большими по-

терями становится условной величиной и зависит от выбора той или иной эквивалентной схемы замещения. Для большинства диэлектриков параметры эквивалентной схемы зависят от частоты. Поэтому, определив каким-либо методом значения емкости и эквивалентного сопротивления конденсатора при некоторой заданной частоте, нельзя использовать эти параметры для расчета $tg\delta$ при другой частоте.

Такой расчет справедлив только в случаях, когда эквивалентная схема имеет физическое обоснование. Так, если известно, что потери в диэлектрике определяются только потерями от сквозной электропроводности в широком диапазоне частот, то угол δ конденсатора вычисляют для любой частоты, лежащей в этом диапазоне, по формуле (4.14).

Соответственно, активные потери в конденсаторе:

$$P_a = \frac{U^2}{R}. \quad (4.21)$$

Если же потери в конденсаторе обусловлены сопротивлениями соединительных проводов и электродов, то активная мощность возрастет пропорционально квадрату частоты и определяется как:

$$P_a = U^2 \omega \cdot C \cdot tg\delta = U^2 \omega^2 C^2 r. \quad (4.22)$$

Таким образом, конденсаторы автоматики электроустановок, предназначенные для работы на высокой частоте, должны обладать малыми сопротивлениями электродов, соединительных проводов и переходных контактов. Механизм потерь в высокочастотном конденсаторе сложный и его нельзя свести только к потерям от сквозной электропроводности или к потерям в контактах. Поэтому параметры конденсатора необходимо определять при той частоте, при которой он будет использован в электроустановке.

При оценке диэлектрических потерь в электроэнергетическом оборудовании применяют удельные характеристики. Активные потери, отнесенные к единице объема диэлектрика, называют удельными потерями:

$$p = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \omega \cdot C \cdot tg\delta}{S \cdot h} = \frac{U^2 \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot tg\delta}{S \cdot h^2} = \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot tg\delta \cdot E^2, \quad (4.23)$$

где V - объем диэлектрика между плоскими электродами, (m^3);

E - напряженность электрического поля, (В/м).

Параметр диэлектрика $\varepsilon \cdot tg\delta = \varepsilon''$ называют коэффициентом диэлектрических потерь. В результате, потери p в материале пропорциональны коэффициенту ε'' .

Известно, что параметр $tg\delta$ - отношение активной составляющей проводимости к емкостной составляющей (рисунок 4.13,*a*). Для плоского конденсатора при заданной частоте параметр:

$$tg\delta = \frac{\gamma \cdot f}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (4.24)$$

Таким образом, из выражений (4.20) и (4.23) следует, что диэлектрические потери имеют важное значение для изоляционных материалов, используемых в электроустановках, работающих на промышленной частоте и выше, т.к. значение диэлектрических потерь пропорционально квадрату приложенного напряжения и частоте электрической сети.

Большие диэлектрические потери в электроизоляционных материалах вызывают сильный нагрев изделия и могут привести к его тепловому и механическому разрушению электроэнергетического оборудования. Если диэлектрик используется в колебательном контуре схемы автоматики электроустановки, то диэлектрические потери препятствуют достижению высокой добротности (настройки на резонанс) устройства.

Виды диэлектрических потерь. По физической природе и особенностям диэлектрические потери подразделяют на четыре основных вида: потери на электропроводность, релаксационные потери, ионизационные потери и резонансные потери.

Потери на электропроводность (ПЭ) существуют в диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную проводимость. Если при этом другие виды потерь малы, то частотные зависимости параметров P_a и $tg\delta$ получают, используя параллельную эквивалентную схему замещения диэлектрика (рисунок 4.13,*a*). В этом случае активные потери P_a не зависят от частоты приложенного напряжения, а параметр $tg\delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону (рисунок 4.14, *a*).

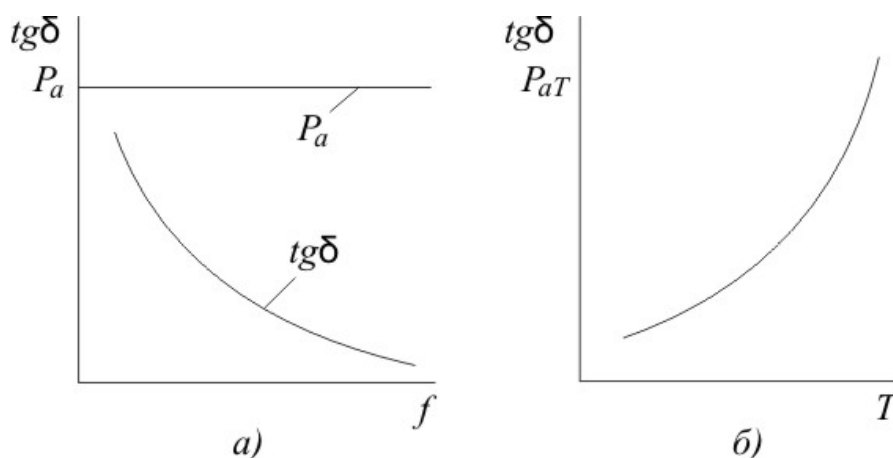


Рисунок 4.14 – Зависимости потерь на электропроводность диэлектрика от частоты сети (*a*) и температуры (*б*):

P_a - потери в диэлектрике

Значение параметра $tg \delta$ при заданной частоте сети определяют как:

$$tg \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho}, \quad (4.25)$$

если известно сопротивление ρ , измеренное при постоянном токе, и проницаемость ε , измеренная при данной частоте ЭУ.

Потери возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону:

$$P_{aT} = A \exp\left(-\frac{b}{T}\right), \quad (4.26)$$

где параметры A и b - постоянные материала.

В зависимости от температуры T параметр $tg \delta$ изменяется по тому же закону, т.к. реактивная мощность потерь диэлектрика от температуры не зависит.

Релаксационные потери (РП) обусловлены активными составляющими поляризационных токов. Потери характерны для диэлектриков, обладающих замедленными видами поляризации. РП проявляются в области высоких частот, когда сказывается отставание поляризации от изменения поля. Рассмотрим происхождение РП на примере дипольно-релаксационной поляризации (ДРП) полярных жидкостей.

При воздействии на диэлектрик синусоидального напряжения высокой частоты дипольные молекулы не успевают ориентироваться в вязкой среде и следовать за изменением поля. Отставание поляризации выражается в появлении угла фазового запаздывания (ψ) между поляризованностью диэлектрика ($P_{ДР}$) и напряженностью (E) поля (рисунок 4.15, *а*).

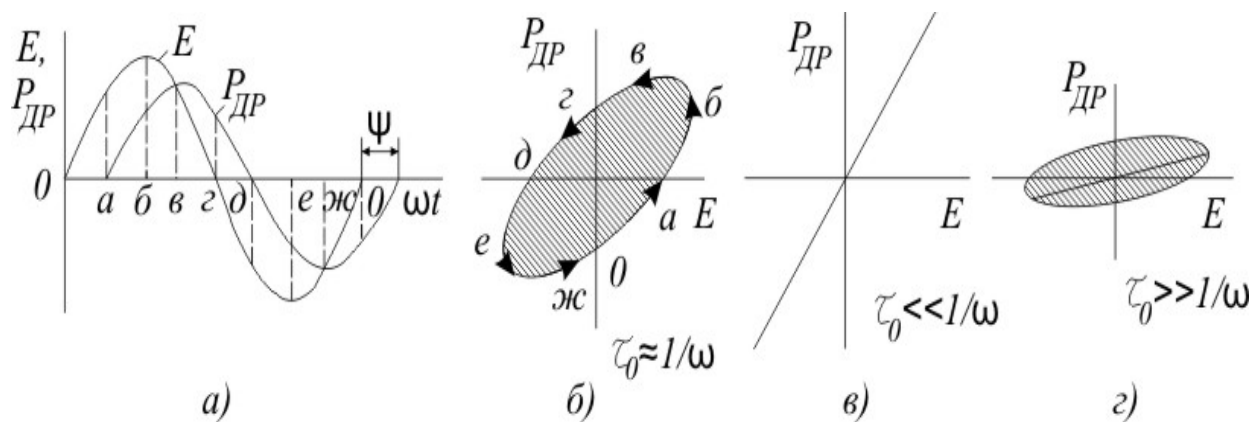


Рисунок 4.15 – Схемы механизмов релаксационных потерь в диэлектриках

Зависимость $P_{др}(E)$ при наличии фазового сдвига между данными параметрами имеет форму эллипса (рисунок 4.15, б). Интеграл по замкнутому контуру схемы ($o \rightarrow \bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow e \rightarrow o$) характеризует энергию, затрачиваемую полем за один период (T) на поляризацию единицы объема диэлектрика:

$$\mathcal{E}_{др} = \oint P_{др} dE \approx \varepsilon'' . \quad (4.27)$$

При неизменной напряженности E площадь петли зависит от значения параметра $P_{др}$ и угла ψ , которые определяются соотношением времени релаксации (τ_0) и периода T . Если время $\tau_0 \ll 1/\omega$, то за время каждого полупериода ($T/2$) поляризация получает полное развитие, ее отставание от изменения поля отсутствует.

При этом эллипс, характеризующий зависимость $P_{др}(E)$, вырождается в прямую линию (рисунок 4.15, в). Таким образом, если нет запаздывания поляризации по отношению к полю, то нет и релаксационных потерь.

При условии, что время $\tau_0 \gg 1/\omega$, релаксационная поляризация выражена в диэлектрике слабо. Угол поворота диполей за время полупериода оказывается незначительным и потери энергии за период T будут малы (рисунок 4.15, г).

Максимуму потерь соответствуют условия, при которых период T сравним со временем установления поляризации (τ_0) (рисунок 4.15, б).

Рассмотренный механизм релаксационных потерь позволяет объяснить температурную и частотную зависимости параметра $tg\delta_{др}$, которые отличаются наличием взаимосвязанных максимумов (рисунки 4.16, а, б).

При низкой температуре из-за большой вязкости жидкого диэлектрика электроустановки время $\tau_0 \gg 1/\omega$, возможности поворота диполей в вязкой среде ограничены. В результате амплитудное значение потерь $P_{др}$ оказывается незначительным, соответственно мал и параметр $tg\delta_{др}$.

С повышением температуры вязкость жидкости уменьшается, а время $\tau_0 \approx T$. ДРП получает развитие, благодаря чему возрастает параметр $tg\delta_{др}$. При более высоких температурах время $\tau_0 \ll 1/\omega$ и практически исчезает запаздывание поляризации относительно поля и уменьшаются потери $P_{др}$.

С повышением частоты максимум параметра $tg\delta_{др}$ смещается в область более высокой температуры, т.к. при меньшем времени полупериода инерционность поворота диполей будет сказываться даже при малом времени τ_0 .

Рассмотрим зависимости параметра $tg\delta_{др}$ от абсолютной температуры

и частоты (рисунок 4.16). Зависимость параметра $tg\delta_{ДР}$ в диэлектрике от температуры на рисунке 4.16,а имеет два максимума частоты при температурах T_1 и T_2 , что подчеркивает различие в частотных зависимостях $tg\delta_{ДР}$ и потерь активной мощности ($P_{аДР}$).

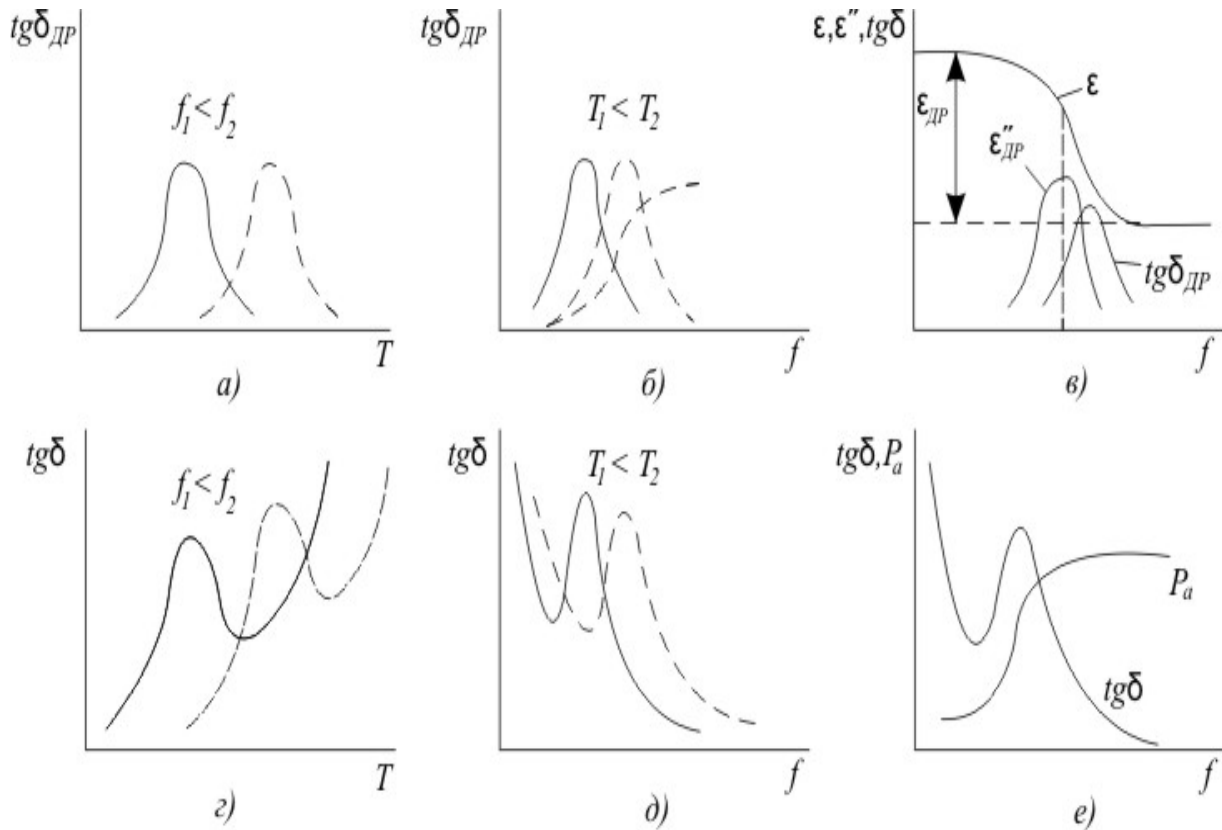


Рисунок 4.16 – Зависимости тангенса угла релаксационных потерь в диэлектриках от абсолютной температуры и частоты

Возрастание потерь $P_{аДР}$ с ростом частоты обусловлено усиливающимся отставанием поляризации от изменения поля (возрастает угол ψ). Если частоту еще увеличивать, то ДРП выражается очень слабо и потери $P_{ДР}$ оказываются незначительными. Поэтому малы потери энергии за период ($\mathcal{E}_{ДР}$) и параметр $tg\delta_{ДР}$, характеризующий эти потери. На высоких частотах велико число циклов поляризации диэлектрика и активная мощность потерь остается практически постоянной.

Рассмотрим взаимное расположение частотных зависимостей трех параметров диэлектрика $\epsilon_{ДР}, \epsilon''_{ДР}, tg\delta_{ДР}$, характеризующих ДРП, которые представляют выборку узкого частотного диапазона из широкого спектра частот (рисунок 4.16, в). Соответственно, рисунки 4.16, г, д, и е характеризуют изме-

нение потерь $P_{др}$ с учетом вкладов релаксационного механизма в электропроводность диэлектрика.

Релаксационные потери происходят и у линейных диэлектриков с ионно-релаксационным и электронно-релаксационным механизмами поляризации.

Миграционные потери, обусловленные миграционной поляризацией, происходят в электроизоляционных материалах со случайными примесями или отдельными компонентами, намеренно введенными в диэлектрик, для требуемого эксплуатацией ЭУ изменения электрических и других свойств. Случайными примесями в диэлектрике являются полупроводящие вещества, например, восстановленные окислы. Ввиду разнообразия структуры неоднородных диэлектриков не существует простой общей формулы расчета электрических потерь.

Резонансные потери наблюдаются в твердых электроизоляционных материалах ЭУ, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний диэлектрика. Наличие максимума в частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь характерно и для резонансных потерь, но максимум параметра при изменении температуры не смещается.

Ионизационные потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Механизм потерь будет рассмотрен при изучении потерь в диэлектриках в зависимости от их агрегатного состояния.

4.5. Зависимость диэлектрических потерь от агрегатного состояния материала

Диэлектрическими потерями называют мощность, необратимо поглощаемую материалом электроэнергетического оборудования под воздействием приложенного напряжения сети. Потери мощности вызываются электрической проводимостью и медленными видами поляризации диэлектрика. Если в электроизоляционных материалах есть дефектные газовые включения (поры), то в процессе эксплуатации электроэнергетического оборудования возможна ионизация газа в порах, что приводит к дополнительным потерям на ионизацию.

Природа диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах электроэнергетического оборудования различна в зависимости от их агрегатного состояния.

Диэлектрические потери в газах (воздухе) при напряженностях поля, лежат ниже значения, необходимого для развития ударной ионизации молекул газов, очень малы. В этом случае газовый материал рассматривают как идеальный диэлектрик. Источником диэлектрических потерь газа является

электропроводность, т.к. ориентация дипольных молекул материала при их поляризации не сопровождается диэлектрическими потерями.

Все газы отличаются весьма малой электрической проводимостью и угол диэлектрических потерь у них очень мал ($\delta \rightarrow 0$), особенно при высоких частотах электроэнергетического оборудования. Значение параметра $tg\delta$, в этом случае, вычисляют по формуле (4.25).

Сквозной ток утечки у газового диэлектрика мал, сопротивление большое ($\rho \approx 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$), проницаемость $\varepsilon \approx 1,0$ и угол диэлектрических потерь при частоте $f=50\text{Гц}$ тоже мал ($tg\delta \leq 4 \cdot 10^{-8}$).

При высоких напряжениях в ЭУ молекулы газа ионизируются, вследствие чего в газовом диэлектрике возникают потери на ионизацию:

$$P_{aII} = A_1 f (U - U_{II})^2, \quad (4.28)$$

где A_1 - постоянный коэффициент; U - приложенное напряжение; U_{II} - напряжение, соответствующее началу ионизации диэлектрике.

Соотношение (4.28) справедливо, если напряжение $U \geq U_{II}$, а зависимость параметра $tg\delta$ от напряженности поля линейна. Напряжение U_{II} зависит от давления газа, т.к. развитие ударной ионизации молекул связано с длиной свободного пробега электронов. С увеличением давления газа выше атмосферного значение напряжения U_{II} возрастает. Ионизационные потери являются дополнительным механизмом потерь для твердого диэлектрика, содержащего газы включения.

Рассмотрим влияние газовых включений диэлектрика на характер изменения параметра $tg\delta$ (рисунок 4.17).

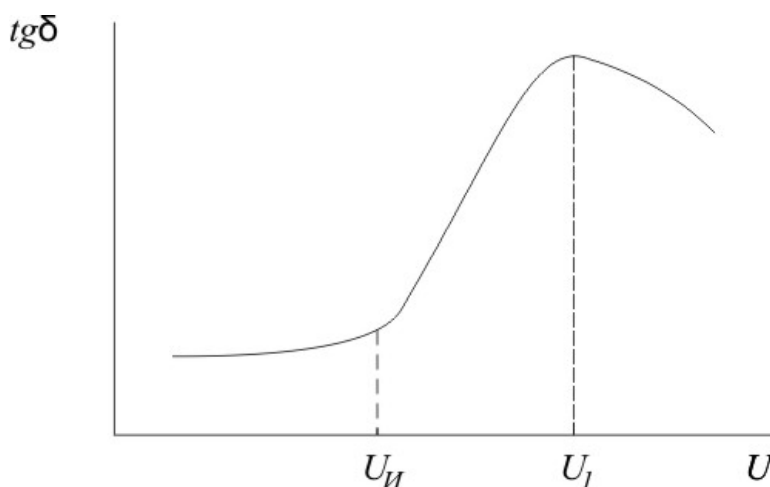


Рисунок 4.17 – Зависимость параметра тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения для твердой изоляции с газовыми включениями

На участке начальной ионизации, когда напряжение $U \geq U_{II}$ параметр $tg\delta$ растет. При напряжении $U \geq U_1$, когда газ во включениях в материал уже ионизирован, требуется меньшая энергия на развитие процесса и величина $tg\delta$ уменьшается. Зависимость $tg\delta = f(U)$ часто называют ионизационной кривой. При высоких частотах ионизация усиливается, и потери в газах возрастают, что может привести к разрушению материалов электроэнергетического оборудования с газовой изоляцией.

Ионизация газа, заполняющего поры, приводит к образованию трещин и разрушению твердых диэлектриков, например, изоляторов воздушной линии электропередач. Ионизация воздуха сопровождается образованием озона и окислов азота, что в одних случаях вызывает химическое разрушение органической изоляции электроэнергетического оборудования, содержащей газы, в других - цепную реакцию окисления.

Диэлектрические потери в жидких материалах. Рассмотрим неполярные жидкости. Если диэлектрик не содержит примесей с дипольными молекулами, то потери обусловлены только электропроводностью, т.е. сквозным током. С ростом частоты сети увеличивается емкостной ток, протекающий через диэлектрик, а активный ток сквозной утечки остается постоянным (рисунок 4.13).

Следовательно, параметр $tg\delta$ неполярного электроизоляционного материала с ростом частоты уменьшается. Удельная проводимость нейтральных чистых жидкостей очень мала, поэтому небольшие и диэлектрические потери в материалах. Примером может служить очищенное от примесей нефтяное конденсаторное масло, параметр $tg\delta$ которого мал.

Полярные жидкости. Диэлектрик в зависимости от условий эксплуатации ЭУ могут обладать заметными потерями, связанными с дипольно-релаксационной поляризацией, помимо потерь на электропроводность. Удельная проводимость таких жидкостей при температуре 20⁰С составляет 10⁻¹¹ См/м. Дипольно-релаксационные потери, в вязких жидкостях при переменном напряжении, значительно превосходят потери на электропроводность.

Дипольно-релаксационные потери в маловязких жидкостях при низких частотах незначительны и меньше потерь на электропроводность. При высоких частотах дипольно-релаксационные потери полярной жидкости велики и превосходят потери на электропроводность, поэтому полярные жидкости не используются в электроэнергетическом оборудовании работающих на высокой частоте.

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках зависят от структуры электроизоляционных материалов. Твердые вещества, применяемые в электроустановках, имеют разный состав и строение; в изоляции возможны все виды диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери в электроизоляционных материалах с молекулярной структурой зависят от вида молекул. Диэлектрики, имеющие молекулярную структуру с неполярными молекулами и не содержащие примесей, обладают малыми диэлектрическими потерями. К диэлектрикам относят сера и церезин, а также неполярные полимеры – полиэтилен и полистирол.

Твердые диэлектрики, состоящие из полярных молекул, представляют собой органические вещества. Полярные полимеры - эпоксидные компаунды кремнийорганические смолы, капрон, лавсан, гетинакс имеют большие диэлектрические потери.

Диэлектрические потери в веществах с ионной структурой зависят от особенностей упаковки ионов в решетке. В веществах с кристаллической структурой и плотной упаковкой ионов в отсутствие примесей, искажающих решетку, диэлектрические потери малы. При повышенных температурах в материалах происходят потери на электропроводность.

К диэлектрикам относят кристаллические неорганические соединения, имеющие значение в производстве электротехнической керамики, например, корунд. К ним относят каменную соль, чистые кристаллы которой обладают ничтожными потерями, а малейшие примеси резко увеличивают диэлектрические потери.

К диэлектрикам, имеющим кристаллическую структуру с неплотной упаковкой ионов, относят ряд веществ, характеризующихся релаксационной поляризацией, вызывающей повышенные диэлектрические потери. Многие из материалов входят в состав керамических масс, изоляторного фарфора, огнеупорной керамики и т. д.

Диэлектрические потери в квазиаморфных веществах с ионной структурой - неорганических стеклах - отличаются особенностями. В стеклах за релаксацию ответственны слабосвязанные ионы, совершающие перескоки из одной ячейки решетки в другую.

Потенциальные барьеры, ограничивающие движение слабосвязанных ионов, неодинаковы вследствие локальных неоднородностей структуры стекла. Поэтому релаксационные потери в стеклах определяют широким набором времен релаксации. Происходит расширение и сглаживание максимумов в температурной и частотной зависимостях параметра $tg\delta$ (рисунок 4.18).

Чем больше набор времени релаксации диэлектрика, тем меньше значение релаксационного максимума. Сглаженные максимумы релаксационных потерь могут маскироваться потерями на электропроводность и не проявляться в явном виде. При высоких частотах, приближающихся к частотам собственных колебаний ионов, в стеклах возможны также резонансные потери.

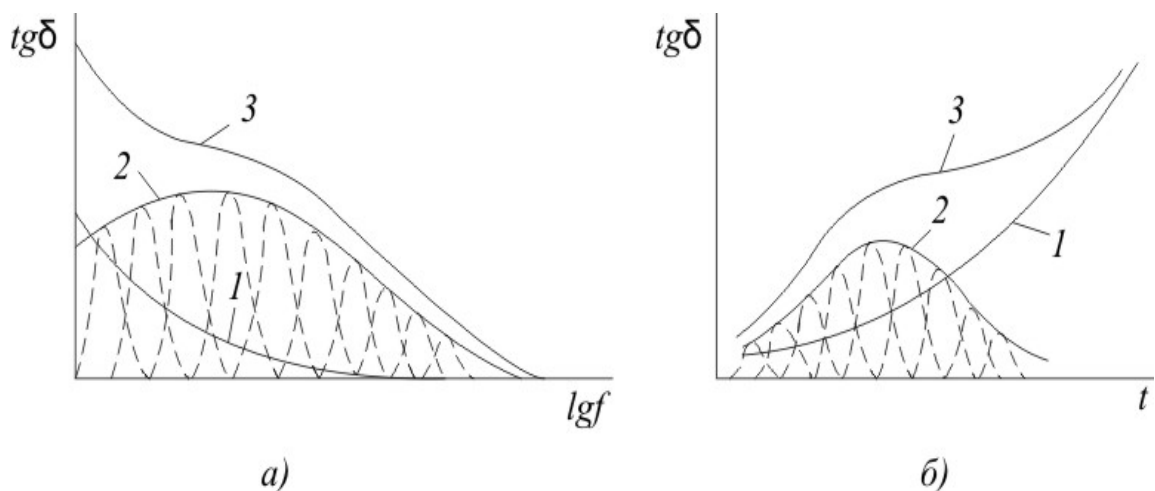


Рисунок 4.18 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты (**а**) и температуры (**б**) для органического стекла:
 1 – потери на электропроводность; 2 – релаксационные потери;
 3 – суммарные потери

4.6. Пробой электроизоляционных материалов

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, может потерять свойства изоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Явление образования проводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля называют пробоем.

Значение напряжения в момент пробоя, называют пробивным напряжением $U_{пр}$, а напряженность электрического поля – электрической прочностью $E_{пр}$. Если напряжение достигло значения $U_{пр}$, то сквозной ток увеличивается, напряжение на электродах уменьшается, сопротивление падает, а электропроводность диэлектрика возрастает. Наступает электрический пробой материала (рисунок 4.19).

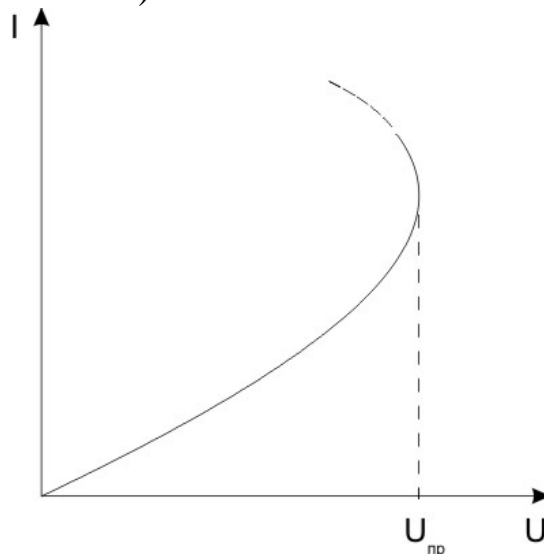


Рисунок 4.19 – Зависимость сквозного тока от напряжения, приложенного к диэлектрику

Значение напряжения $U_{\text{ПР}}$ зависит от толщины диэлектрика (h) и конфигурации электродов и самой изоляции. Поэтому пробивное напряжение характеризует не столько свойства материала, сколько способность диэлектрика противостоять сильному электрическому полю. Для сравнения свойств изоляторов более удобной характеристикой является электрическая прочность диэлектрика.

Минимальную напряженность однородного электрического поля приводящую к пробое диэлектрика называют электрической прочностью:

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{h}. \quad (4.29)$$

Напряжение $U_{\text{ПР}}$ удобно выражать в киловольтах, толщину h - в миллиметрах, а прочность $E_{\text{ПР}}$ - в киловольтах на миллиметр. Если пробой произошел в газообразных и жидких диэлектриках, то благодаря подвижности молекул пробитый участок после снятия напряжения восстанавливает свои электрические свойства. Пробой твердых диэлектриков заканчивается разрушением изоляции ЭУ. Однако разрушение материала можно предупредить, ограничив нарастание тока утечки допустимым пределом.

Определение прочности $E_{\text{ПР}}$ производится стандартными методами, что позволяет сравнивать электрические свойства диэлектриков. Пробой диэлектриков возникает в результате электрических, тепловых и электрохимических процессов, обусловленных действием электрического поля электроустановки.

Электрический пробой газов. Воздух является изоляционной средой для частей ЭУ, поэтому, когда объект работает на поверхности земли, физические процессы происходят при нормальном атмосферном давлении и температуре. Однако при эксплуатации электроэнергетического оборудования в неблагоприятных условиях надо учитывать свойства воздуха при низких или высоких давлениях и температуре.

Прочность $E_{\text{ПР}}$ газов в нормальных условиях невелика по сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками. Пробой газов является следствием развития процессов фотоионизации и ударной ионизации.

Механизм пробоя газа. Небольшое количество содержащихся в газе положительных (+) и отрицательных (-) ионов и электронов, находящихся в беспорядочном тепловом движении, при воздействии поля получают добавочную скорость и начинают перемещаться в направлении поля или против него. При этом каждая заряженная частица в однородном поле приобретает дополнительную энергию:

$$\mathcal{E} = Eq\bar{l}, \quad (4.30)$$

где E - напряженность поля; q - заряд; \bar{l} - длина свободного пробега.

Дополнительная энергия заряженных частиц сообщается атомам или молекулам газа, с которыми эти частицы сталкиваются. Если энергия достаточно велика, происходит возбуждение атомов, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту или ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и (+) ионы.

Условие ионизации молекул диэлектрика:

$$\mathcal{E} \geq \mathcal{E}_И, \quad (4.31)$$

причем энергия \mathcal{E} включает в себя и энергию теплового движения, небольшую при нормальной температуре.

Из выражений (4.30) и (4.31) имеем:

$$Eq\bar{l} \geq \mathcal{E}_И. \quad (4.32)$$

Энергию $\mathcal{E}_И$ характеризуют ионизационным потенциалом:

$$U_И = \frac{\mathcal{E}_И}{q}. \quad (4.33)$$

Потенциал $U_И = (4...25)\text{В}$, что соответствует энергии $\mathcal{E}_И = (4...25)\text{эВ}$.

При заданных значениях давления и температуры ударная ионизация начинается при определенном (начальном) значении напряженности E , т.к. заряд q и длина \bar{l} постоянны для газов.

Наибольшее число актов ионизации приходится на электроны, т.к. их длина свободного пробега на порядок выше, чем у ионов. Электроны по сравнению с ионами обладают в (100...1000) раз большей подвижностью и за одинаковый промежуток времени они пройдут в (100...1000) раз большее расстояние и произведут большое число актов ионизации молекул.

При явлениях разряда (+) ионы высвобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода диэлектрика. Иногда электрон приводит молекулу в «возбужденное состояние», т.е. вызывает изменение в движении электронов, связанных с молекулой.

В следующий момент эта «возбужденная» молекула отдает свою избыточную энергию в форме излучения - испускает фотон. Часть фотонов имеют энергию, превышающую энергию ионизации молекул и при поглощении фотона, другой молекулой возможна ее ионизация. Внутренняя фотонная

ионизация газа приводит к развитию процесса ионизации в разрядном промежутке каналов.

Рассмотрим схему, поясняющую, почему рост электропроводящего канала (стримера) происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины (рисунок 4.20).

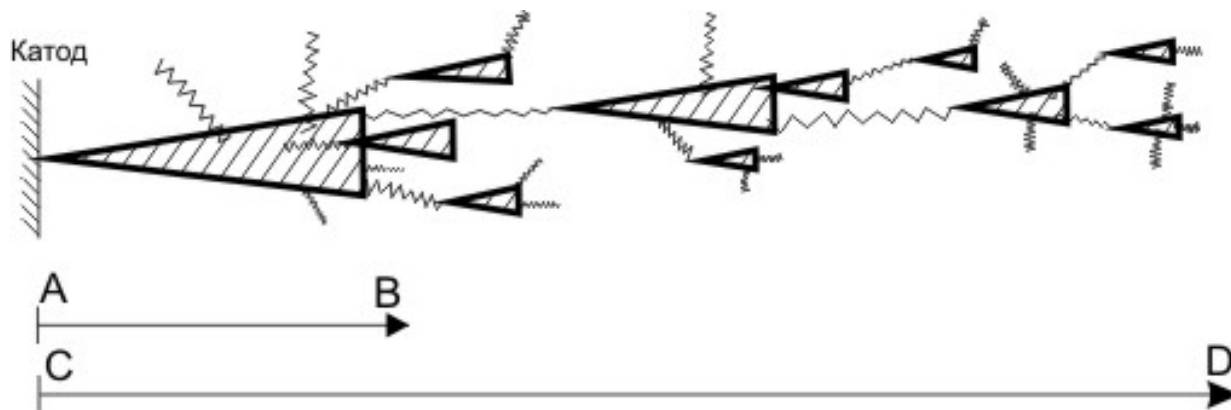


Рисунок 4.20 – Схема развития отрицательного стримера от катода к аноду диэлектрика

Лавины показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути фотонов. Внутри каждого конуса газ ионизируется ударами электронов.

Выбитые электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые ими частицы газа и лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число (+) ионов, направляющихся к катоду.

Начала волнистых линий исходят из атомов, которые были возбуждены ударом электрона и вслед за тем испустили фотон. Двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, фотоны обгоняют лавину и в месте, соответствующем концу волнистой линии, ионизируют частицу газа. Выбитый электрон, устремляясь к аноду, порождает новую лавину впереди первой лавины.

Пока первая лавина вырастает на расстояние, равное длине стрелки AB , намечающийся стример, распространяется на расстояние, равное длине стрелки CD .

На следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг друга, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа. Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока (+) заряженных частиц, направленного к катоду.

Рассмотрим положительный (+) стример

Электронные лавины оставляют на своем пути большое число новообразованных (+) ионов, концентрация которых велика около анода.

Если концентрация (+)ионов у анода достигает определенного значения, то, во-первых, происходит интенсивная фотоионизация, во-вторых, электроны притягиваются зарядом в головную часть (+) стримера, и, в-третьих, концентрация (+)ионов на пути стримера увеличивается (рисунок 4.21)..

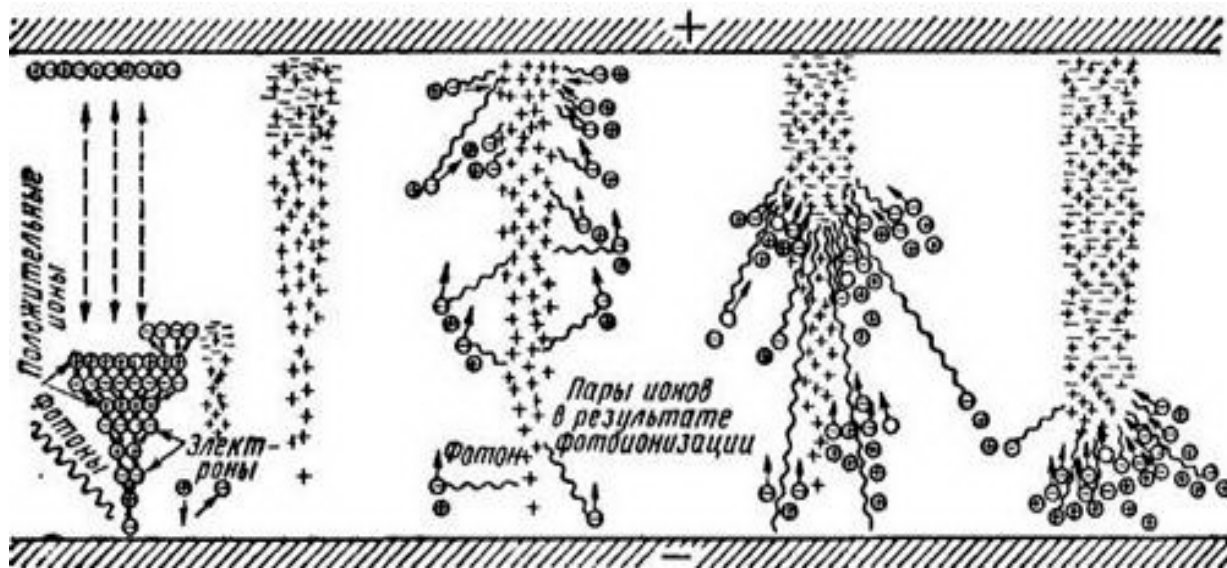


Рисунок 4.21 - Схема развития положительного стримера от анода к катоду по стадиям (слева направо)

Из рисунка 4.21 видно, что многие электроны вовлекаются в головную часть (+) стримера. Насыщение электронами пространства превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. Под влиянием ударов (+) частиц на катоде возникает катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа.

Пробой газа в однородном поле. Однородное поле получают между плоскими электродами. Если источник напряжения имеет большую мощность, между электродами внезапно возникает искра, которая затем переходит в дугу.

Рассмотрим зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами (рисунок 4.22).

В нормальных условиях эксплуатации ЭУ прочность E воздуха при расстоянии между электродами в 1 см составляет около 3,2МВ/м. При малых расстояниях между электродами прочность E увеличивается, что объясняется трудностью формирования разряда.

Рассмотрим зависимость пробивного напряжения от произведения (ph) при неизменной температуре (рисунок 4.23).

Минимальные значения пробивных напряжений для газов —

(280...420)В, а для воздуха - 300В. При неизменном расстоянии между электродами ($h = 1$) кривые на рисунке 4.23 характеризуют зависимость прочности воздуха и водорода от давления, если температура постоянна. При увеличении давления расстояние между отдельными молекулами становится меньше.

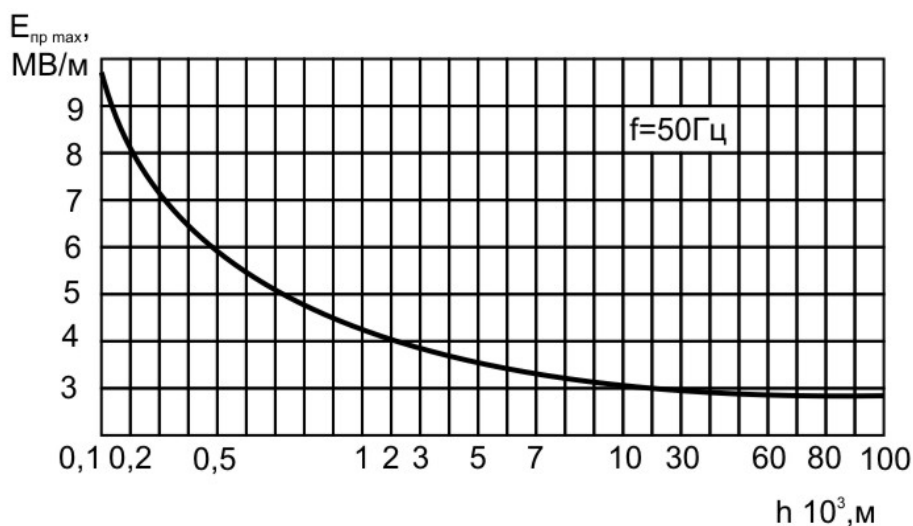


Рисунок 4.22 – Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в случае однородного поля

В результате, уменьшается длина свободного пробега электронов, и электрическая прочность газа возрастает; при расстоянии между электродами в 1см она составит более 3,2МВ/м.

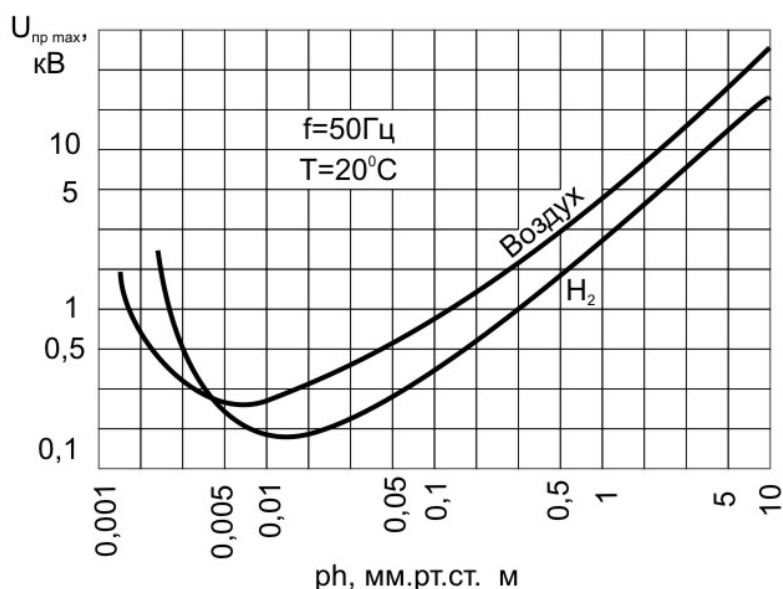


Рисунок 4.23 – Зависимость пробивного напряжения от давления газа (p) на межэлектродное расстояние (h) для воздуха и водорода

При уменьшении давления ниже атмосферного вначале падает прочность $E_{\text{ПР}}$, но когда давление доходит до некоторого значения, прочность $E_{\text{ПР}}$ возрастает. Это объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема до такого количества, при котором вероятность столкновений электронов с молекулами значительно уменьшается.

Пробивное напряжение газа в однородном поле меняется в зависимости от частоты при высоких частотах работы ЭУ. Рассмотрим зависимость пробивного напряжения воздуха от частоты (f) (рисунок 4.24).

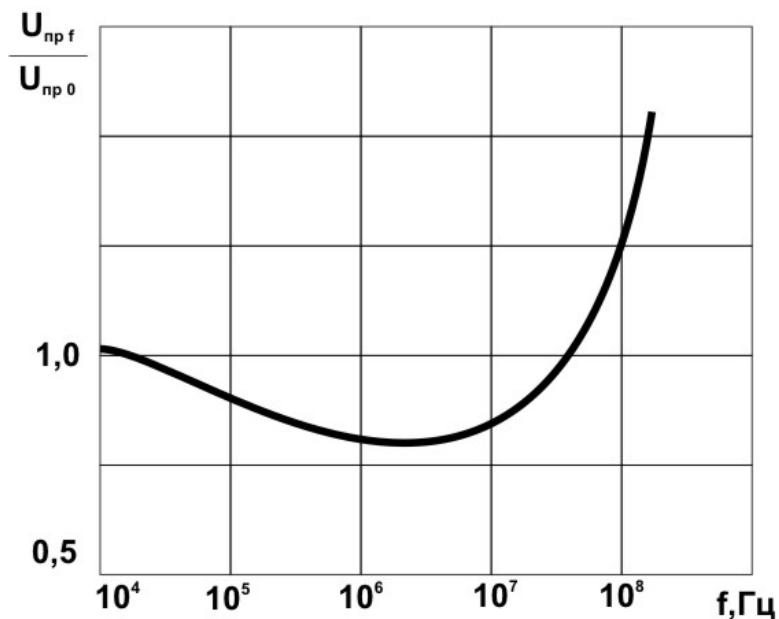


Рисунок 4.24 – Зависимость отношения пробивных напряжений воздуха к частоте

При небольших частотах амплитудное значение напряжения $U_{\text{ПР}}$ совпадает со значением напряжения $U_{\text{ПР}}$ при постоянном токе; при более высоких частотах напряжение $U_{\text{ПР}}$ уменьшается и доходит до минимума при $f = 5 \cdot 10^6$ Гц. После чего вновь возрастает и достигает значений, превосходящих напряжение $U_{\text{ПР}}$ при постоянном токе более чем на 1,5раза. Уменьшение напряжения $U_{\text{ПР}}$ с ростом частоты объясняется искажением поля, из-за образования объемных зарядов в газе и различной подвижности (+) ионов и электронов.

Протекающие при этом процессы отражает временная диаграмма напряжений (рисунок 4.25).

Ионизация газа и прораствание электронных лавин происходит в те промежутки времени, когда мгновенное значение напряжения превосходит порог ионизации ($U_{\text{И}}$). При снижении напряжения до уровня ниже порогового, ионизация прекращается и начинается рассасывание образовавшегося объемного заряда в межэлектродном пространстве диэлектрика.

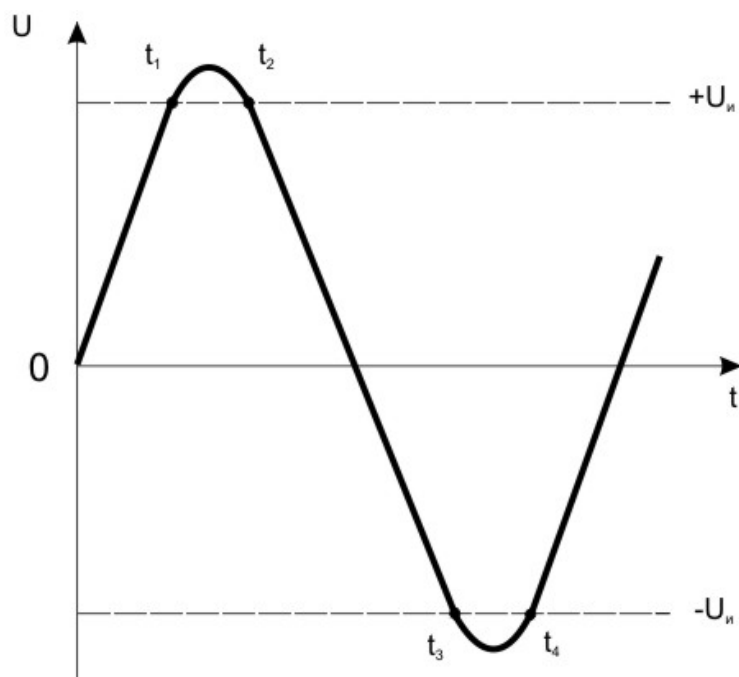


Рисунок 4.25 - Временная диаграмма напряжений, поясняющая особенности ионизации газа в переменном поле

Скорость рассасывания определяется скоростью дрейфа ионов к катоду. В области высоких частот продолжительность полупериода изменения поля становится соизмеримой со временем формирования электронных лавин. Для полного завершения процесса ударной ионизации надо повысить напряжение на электродах.

Электрическая прочность сильно зависит от химического состава газа. Пониженной прочностью обладают инертные газы, используемые для заполнения источников света. Повышенную прочность имеют тяжелые газы с высокой молекулярной массой, элегаз (SF_6) и фреон (CCl_2F_2), у которых пробивная напряженность примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха.

Пробой жидких диэлектриков. Природа электрического пробоя жидких диэлектриков зависит от их чистоты (примесей). Процесс пробоя начинается с инжекции в диэлектрик электронов с катода и образования электронных лавин. Возникают подобные стримеру образования, которые в результате процессов фотоионизации перемещаются от анода к катоду со скоростью 10^5 м/с. Пробой завершается, когда плазменный канал замыкает электроды диэлектрика. Энергию достаточную для ионизации электроны приобретают при напряженности E в 100 раз большей, чем в газах.

Предельно чистые жидкости получить очень трудно. Постоянными примесями в жидкости являются вода, газы и мельчайшие механические частицы. Наличие примесей усугубляет явление пробоя диэлектриков и затрудняет выяснение механизмов пробоя. В максимально очищенных от при-

месеи жидкостях при высоких значениях напряженности E происходит вырывание электронов из металлических электродов и разрушение молекул самой жидкости за счет соударений с заряженными частицами, как и в случае пробоя газов.

При этом повышенная прочность жидких диэлектриков по сравнению с газами обусловлена меньшей длиной свободного пробега электронов. Пробой технически чистых жидкостей происходит из-за частичного перегрева и вскипания жидкости в местах наибольшего количества примесей, которое приводит к образованию газового мостика между электродами.

При эксплуатации силовых трансформаторов большое влияние на электрическую прочность масла оказывают примеси воды в эмульсионном состоянии. Вода, в трансформаторном масле в виде эмульсии, образует капли диаметром 10^{-6} м. В электрическом поле трансформатора сферические водяные включения втягиваются в пространство между электродами (фазами) и деформируются.

При деформации водяных включений образуются эллипсоиды вращения, которые поляризуются, притягиваются друг к другу и, сливаясь, могут образовать между фазами «мостики» с малыми сопротивлениями, с последующим разрядом (пробоем). Электрическая прочность масла уменьшается, что может привести к короткому замыканию между фазами трансформатора.

Влияние примесей в меньшей степени сказывается при пробое жидких диэлектриков импульсным напряжением. Пробой материалов при повышенных частотах обусловлен ее разогревом за счет диэлектрических потерь, что приводит к термическому разрушению жидкости. Поэтому предельно допустимые рабочие напряженности электрического поля для жидких диэлектриков на высоких частотах оказываются ниже, чем на промышленной частоте.

Пробой твердых диэлектриков. У твердых диэлектриков наблюдают три основных механизма пробоя: электрический, тепловой и электрохимический. Каждый из них может иметь место в одном и том же материале в зависимости от характера электрического поля - постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; времени воздействия напряжения; наличия в диэлектрике дефектов, закрытых пор; толщины материала; условий охлаждения и т. д.

Электрический пробой диэлектриков характеризуется весьма быстрым развитием и протекает за время ($10^{-7} \dots 10^{-8}$) с. Пробой не обусловлен тепловой энергией, хотя прочность при электрическом пробое зависит от температуры. Пробой сопровождается, в своей начальной стадии, разрушением диэлектрика в узком канале. Пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из начальных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Развитие лавин сопровождается фотоионизацией, которая

ускоряет образование проводящего канала.

Ускоренные полем электроны при столкновениях передают свою энергию узлам кристаллической решетки диэлектрика и разогревают материал вплоть до плавления. В разрядном канале создается давление, которое приводит к появлению трещин или полному разрушению изолятора электроэнергетического оборудования.

Чисто электрический пробой происходит, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. В случае однородного поля и однородности структуры диэлектрика напряженность E служит мерой электрической прочности ($E_{\text{пр}}$) вещества. Такие условия наблюдаются у монокристаллов многих окислов, щелочно-галогенидных соединений и органических полимеров. При этом прочность $E_{\text{пр}} \approx 1000 \text{ МВ/м}$.

Электрический пробой наблюдается у большинства диэлектриков при кратковременном (импульсном) воздействии напряжения. Тонкие пленки обладают высокой электрической прочностью, нежели массивные образцы. Это свойство получило название электрического упрочения материалов. Его использование позволяет повысить надежность пленочной изоляции микронных элементов и устройств автоматики ЭУ.

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепловой энергии, выделяющейся в диэлектрике, превышает то количество энергии, которое может рассеиваться в данных условиях. В результате, нарушается тепловое равновесие, и процесс пробоя приобретает лавинообразный характер. Явление теплового пробоя сводится к разогреву диэлектрика в поле до температур, соответствующих его расплавлению, обугливанию и пр.

Прочность при тепловом пробое является характеристикой не только материала, но и изделия из него, тогда как прочность при электрическом пробое служит характеристикой самого материала.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и др. Напряжение $U_{\text{пр}}$ зависит от нагревостойкости материала; органические диэлектрики (например, полистирол) имеют более низкие значения электротепловых пробивных напряжений, чем неорганические (кварц, керамика), при прочих равных условиях. Типичными признаками теплового пробоя является экспоненциальное уменьшение напряжения $U_{\text{пр}}$ с ростом температуры окружающей среды.

В реальных условиях явление теплового пробоя протекает сложно. По толщине диэлектрика получается перепад температуры, средний слой оказывается нагретым выше, чем прилегающие к электродам, сопротивление его резко падает, что ведет к искажению электрического поля. Имеет значение

также и теплопроводность материала электродов. Все это способствует пробой образцов при более низких напряжениях.

Разновидностью теплового пробоя является ионизационный пробой. Пробой характерен для твердых пористых диэлектриков и обусловлен ионизацией газа в порах. За счет ионизационных потерь разогревается поверхность закрытых пор, возникают локальные перепады температуры в диэлектрике и связанные с ними термомеханические напряжения.

Такие процессы особенно опасны в хрупких электроизоляционных материалах электроустановок, поскольку термомеханические напряжения могут превзойти предел прочности материала и вызвать растрескивание диэлектрика.

Электрохимический пробой электроизоляционных материалов происходит при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Потеря прочности происходит при напряжениях $U_{\text{ПР}}$, когда в материале усиливаются процессы, сильно уменьшающие сопротивление изоляции (электрохимическое старение) электроэнергетического оборудования.

Пробой изоляции (керамики) возможен при высоких частотах, если в закрытых порах (дефектах) происходит ионизация газа с тепловым эффектом (нагрев – остывание).

Для развития электрохимического пробоя требуется время, поскольку процесс связан с явлением электропроводности диэлектрика. В керамике, содержащей окислы металлов переменной валентности, пробой происходит чаще, чем в керамике, состоящей из окислов алюминия, кремния, магния, бария. Известно, что явление потери электрической прочности возможно и у органических веществ (зависит от материала электродов диэлектрика электроустановки).

Поверхностный пробой. При эксплуатации изоляторов электроэнергетического оборудования с высокой прочностью $E_{\text{ПР}}$ происходит явление поверхностной потери электрической прочности (пробой жидкости на поверхности твердого диэлектрика).

В случае поверхностного пробоя общая прочность диэлектрика не нарушается (образование токопроводящего канала на поверхности изолятора уменьшает рабочее напряжение электроэнергетического оборудования). Значение напряжения $U_{\text{ПР}}$ определяется конфигурацией электродов, габаритными размерами и формой электроизоляционного материала.

Если изолятор электроэнергетического оборудования эксплуатируют на воздухе, то напряжение $U_{\text{ПР}}$ зависит от давления, температуры, относительной влажности воздуха и частоты поля. В некоторых конструкциях изоляторов напряжение $U_{\text{ПР}}$ ниже, чем у газа в тех же условиях эксплуатации электроэнергетического оборудования.

Одной из причин эффекта потери прочности изолятора является искажение однородности электрического поля электроэнергетического оборудования (явление перераспределения зарядов в адсорбированной пленке влаги). Происходит явление смещения ионов на влажной поверхности и увеличение напряженности поля у электродов конструкции электроэнергетического оборудования (крайние элементы гирлянды изоляторов).

Чем резче выражены гидрофильные свойства диэлектрика, тем сильнее падает поверхностное напряжение $U_{\text{ПР}}$ в условиях эксплуатации электроэнергетического оборудования при повышенной влажности.

Однако влияние влажности воздуха на напряжение $U_{\text{ПР}}$ невелико при повышенных частотах работы ЭУ, когда поверхность изолятора подсушивается из-за возросших диэлектрических потерь в адсорбированной пленке.

Для предотвращения пробоя увеличивают длину пути тока утечки по поверхности конструкции ЭУ, путем создания ребристой поверхности, проточкой специальных канавок, а также изготовлением изоляторов с «утопленными» электродами.

Повышение рабочих напряжений электроэнергетического оборудования достигается сглаживанием неоднородностей поля за счет изменения формы электродов диэлектрика. Аналогичный эффект получают при нанесении на поверхность изолятора слабо проводящих покрытий или пленок с повышенной диэлектрической проницаемостью.

Эффективной мерой борьбы с поверхностным пробоем является замена воздуха трансформаторным маслом или специальными газовыми диэлектриками. Повышенная, по сравнению с воздухом, диэлектрическая проницаемость жидкостей снижает напряженность поля на поверхности твердого диэлектрика. Погружением твердого изолятора в жидкий диэлектрик добиваются повышения предельных рабочих напряжений и надежности электроустановок.

4.7. Пассивные диэлектрические материалы

Диэлектрическими материалами называют особый класс электротехнических материалов, в которых используется способность поляризоваться и оказывать большое сопротивление прохождению электрического тока по изолирующим частям электроэнергетического оборудования. Соответственно, электроизоляционными материалами или пассивными диэлектриками называют часть диэлектриков способных создать электрическую изоляцию от токоведущих частей электроэнергетического оборудования в различных условиях её эксплуатации. В электроустановках применяют множество различных видов пассивных и активных диэлектриков.

Классификация диэлектриков. По функциям, выполняемым в электроэнергетического оборудования, диэлектрики делят на два больших класса: электроизоляционные и конденсаторные материалы (пассивные диэлектрики) и управляемые материалы (активные диэлектрики).

Электроизоляционные материалы используют для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электроэнергетического оборудования и отделяет друг от друга элементы оборудования или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Применение диэлектриков в конденсаторах позволяет получать требуемые значения емкости элементов схем автоматики электроэнергетического оборудования.

Диэлектрик конденсатора может запасать, а потом отдавать в цепь электрическую энергию (емкостный накопитель). Иногда конденсатор используют для разделения цепей постоянного и переменного токов, для изменения угла фазового сдвига и т.д. Некоторые диэлектрики применяют как для создания электрической изоляции, так и в качестве конденсаторных материалов (например, слюда, керамика, стекло, полистирольные и другие пленки).

Требования к электроизоляционным и конденсаторным материалам электроэнергетического оборудования существенно различаются. На практике, от электроизоляционного материала требуется невысокая относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ) и большое удельное электрическое сопротивление (ρ), а от диэлектрика конденсатора, наоборот - повышенная проницаемость ϵ и малое значение тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$).

Роль диэлектрика в конденсаторе также нельзя считать только пассивной или активной, т.к. конденсатор уже является функциональным элементом в электрической схеме автоматики электроустановок.

Конденсаторы с активными диэлектриками применяют для усиления сигналов по мощности, создания различных преобразователей, элементов памяти, датчиков ряда физических процессов и генерации колебаний в схемах автоматики ЭУ.

Рассмотрим классы пассивных (неуправляемых) и активных (управляемых) диэлектриков (рисунок 4.26).

Управляемые материалы (активные диэлектрики) делят по принципу управления. Классификация осуществлена на основе особенностей строения диэлектриков в тех состояниях, в которых их применяют при эксплуатации электроустановок, т.е. на основе особенностей свойств диэлектрических материалов.

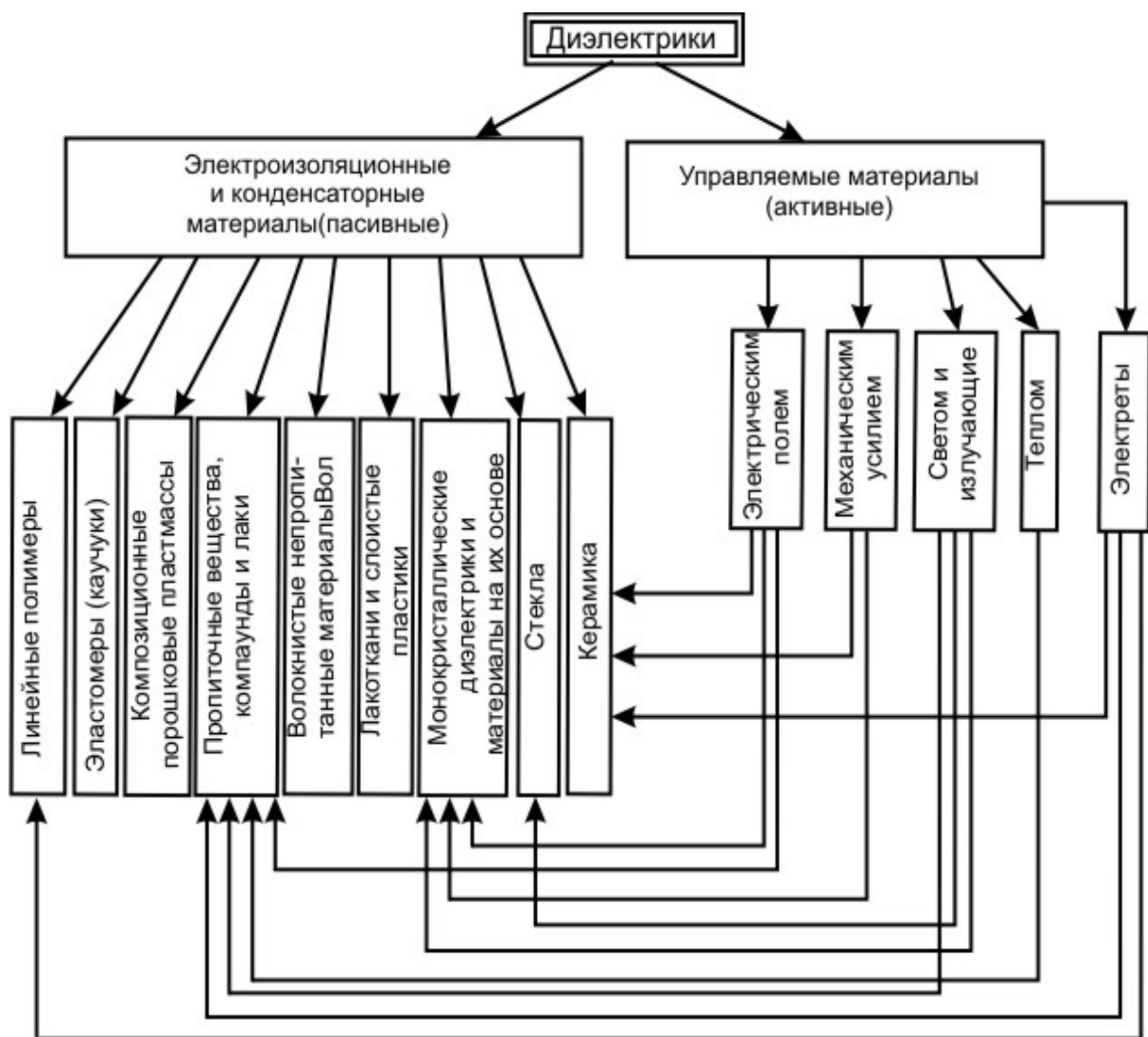


Рисунок 4.26 – Структурная схема классификации диэлектриков

К основным особенностям диэлектриков относятся:

- инертная высокополимерная структура пластичных в технологии материалов (пластических масс);
- эластичное состояние полимерных материалов (каучуков);
- волокнистое строение;
- монокристалличность и поликристалличность;
- стеклообразное состояние (многофазность).

С учетом разнообразия, применяемых в схемах автоматики электро-энергетического оборудования диэлектриков, различия свойств и исторически сложившихся в электротехнике традиций, деление материалов по данной классификации сложно полностью выдерживать.

Свойства пассивных диэлектрических материалов. Механические свойства диэлектриков. Свойства характеризуют способность материала

выдерживать внешние статические и динамические нагрузки без недопустимых изменений первоначальных размеров и формы конструкции. Статическая нагрузка на материал плавно возрастает с заданной скоростью, а динамическая действует рывком или ударом, изменяясь по силе и направлению.

Способность диэлектрика выдерживать статические нагрузки характеризуется разрушающим напряжением при растяжении, сжатии или изгибе, пределом текучести, относительным удлинением при разрыве, относительной деформацией при сжатии и другими характеристиками. Для испытаний используют образцы определенной формы и размеров. Например, прочность на разрыв тонких листов бумаги и картона определяют на образцах в виде полосок шириной 15мм (для бумаги) или 50мм (для картона), длиной 180 или 100мм.

При статических испытаниях анизотропных листовых материалов образцы вырезают вдоль и поперек рулона, причем образцы, вырезанные вдоль рулона, имеют большее разрушающее напряжение и меньшее относительное удлинение при растяжении по сравнению с образцами, вырезанными поперек рулона.

Для пластмасс важным параметром является *сопротивление раскалывания*, измеряемое на образцах в виде брусков с размерами 15×15×10мм. В ходе испытаний в торец образца, размещенного на нижней опорной плите разрывной машины, вдавливается клин, укрепленный на верхней плите. Сопротивление раскалывания:

$$S_p = F/b, \quad (4.34)$$

где F - наибольшая нагрузка в момент раскалывания образца диэлектрика в ньютонах (H); b - ширина средней части образца (m).

Механические свойства гибких материалов (бумаги, пленок) характеризуются таким условным параметром, как *стойкость к надрыву*. Для определения используют полоску материала шириной (8...20)мм, которую пропускают в закрепленную в верхнем зажиме разрывной машины скобу (полукольцо), перегибают на 180°, затем оба конца полоски закрепляют в нижнем зажиме. В зависимости от ширины полоски радиус полукольца имеет размер (5...13)мм. При натяжении полоски наибольшие усилия передаются на ее края. Стойкость к надрыву равна нагрузке в ньютонах, при которой происходит надрыв краев полоски.

При определении *твердости* электроизоляционных материалов используют статический метод вдавливания индентера в поверхность образца при заданной нагрузке. Индентер - полированный стальной шарик диамет-

ром 5мм. Твердость определяют по глубине вдавливания индентера в образец:

$$H = \frac{F}{\pi dh}, \quad (4.35)$$

где F - нагрузка (H); d - диаметр шарика ($мм$);

h - глубина вдавливания ($мм$).

Способность диэлектрика выдерживать динамические нагрузки характеризуют *ударной вязкостью и стойкостью к вибрации*.

Вязкость:

$$W_{уд} = \frac{A_{уд}}{S}, \quad (4.36)$$

где $A_{уд}$ - работа удара ($Дж$);

S - площадь поперечного сечения образца ($м^2$).

Вязкость $W_{уд}$ характеризует прочность диэлектрика при динамическом изгибе. В таком режиме работают многие узлы электроэнергетического оборудования, выполненные из пластмасс, слоистых пластиков и других материалов.

Стойкость диэлектриков к вибрациям определяется отсутствием механических повреждений, нарушением герметичности, сохранением в заданных пределах электрических параметров изоляции после воздействия в течение определенного времени вибрации с заданными параметрами (амплитудой, ускорением, диапазоном частот и др.). Для испытаний материалов используются специальные вибрационные стенды.

Важным параметром является *гибкость*, которая обеспечивает сохранение высоких механических и электрических параметров изоляции при механических деформациях. Методы определения гибкости основаны на определении числа перегибов тонкого материала, вызывающих его разрушение, с помощью специальных приборов (эластомеров).

Для испытаний используют образец в виде полоски 25×200 мм (располагают вертикально и зажимают между двумя парами губок). Верхняя пара губок может поворачиваться на заранее установленный угол. К нижней паре губок подвешивается чашка с грузом.

Гибкость определяется числом двойных перегибов, которые вызывают разрыв образца. При определении гибкости лаковых пленок тонкую медную фольгу с нанесенной лаковой пленкой изгибают вокруг стержней разных диаметров. Показателем гибкости служит наименьший диаметр стержня, при изгибе вокруг которого пленка еще не растрескивается.

Термические свойства диэлектриков. Поведение диэлектрика при нагревании характеризуется рядом свойств, которые в совокупности определяют его допустимую рабочую температуру. К термическим свойствам относят: теплопроводность, теплоемкость, плавление и размягчение материала, тепловое расширение, нагревостойкость, стойкость к термоударам.

Теплопроводность определяет процесс отвода теплоты от нагретых проводников и магнитопроводов электроэнергетического оборудования через слой электрической изоляции, а также отвод теплоты из толщи электрической изоляции, нагретой за счет диэлектрических потерь.

Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности (λ), который равен количеству теплоты, прошедшей через единицу площади при градиенте температуры $1 \text{ K}/\text{м}$. Как правило, диэлектрики являются плохими проводниками теплоты, и коэффициент λ мал. Так, для газов $\lambda = (2...5) \cdot 10^{-2}$, для твердых диэлектриков $\lambda = (0,2...3,0) \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

Теплоемкость (C) диэлектрика по количеству теплоты (Q), которое необходимо для нагревания тела с массой (m), от температуры T_0 до T ($\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$):

$$C = \frac{Q}{m(T - T_0)}. \quad (4.37)$$

Время нагревания или охлаждения электроизоляционных конструкций электроэнергетического оборудования зависит от теплоемкости используемых в них материалов. Теплоемкость определяет количество теплоты, необходимой для их нагревания в ходе технологий изготовления диэлектриков.

Теплоемкость C диэлектриков при $T = 20^\circ \text{C}$ ($\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$): (300...1000) для щелочных стекол; (800...900) - электротехнического фарфора; (1200...2200) - органических полимеров; (1800... 2500) - нефтяных электроизоляционных масел и 4200 для воды.

Диэлектрики в электроэнергетическом оборудовании при нагревании расширяются. Термическое расширение оценивают температурными коэффициентами ($1/\text{К}$):

$$\text{длины} - TKl = \frac{1}{l \cdot (dl/dT)}, \quad (4.38)$$

$$\text{объема} - TKV = \frac{1}{V \cdot (dV/dT)}, \quad (4.39)$$

где коэффициент: $TKV = 3TKI$.

Для большинства диэлектриков $TKI = (0,3...20) \cdot 10^{-5} K^{-1}$. У кварцевого стекла $TKI = 0,05 \cdot 10^{-5} K^{-1}$, поэтому изделия из него не разрушаются при резких перепадах температур. В композиционном электроизоляционном материале, состоящем из диэлектриков с разными коэффициентами TKI , при нагревании (охлаждении) возникают внутренние механические напряжения.

При многократном повторении цикла «нагревание - охлаждение» в материалах образуются трещины (расслоения), сопровождаемые резким снижением электрических параметров изделия.

Для жидких и аморфных вязких материалов (смола, компаунды) важным параметром является *вязкость*. Вязкость свойственна текучим телам, где имеет место сопротивление перемещению одной части (одного слоя) тела относительно другой.

Такое сопротивление характеризуется динамической (Па·с) и кинематической вязкостью (m^2/c), равной отношению динамической вязкости к плотности материала. Условная вязкость измеряется с помощью вискозиметров разных типов. С помощью универсальных вискозиметров вязкость измеряется по времени истечения заданного объема диэлектрика через сопло заданного диаметра.

Вязкость определяет электрические свойства материалов и такие технологические процессы производства электрической изоляции, как пропитка твердых диэлектриков лаками, компаундами, прессование материалов и изделий из них. Вязкость минерального масла определяет конвекционный теплоотвод от нагретых частей в окружающую среду в масляных трансформаторах (выключателях).

В процессе эксплуатации электроэнергетического оборудования материалы и подвергаются воздействию различных старящих факторов. К ним относятся нагревание и электрическое напряжение. Одновременно могут воздействовать влажность, химически активные вещества, радиация, механические нагрузки, в том числе вибрационные.

Нагревостойкость изоляции электроэнергетического оборудования определяют по изменениям электрической прочности (E_{IP}) и параметра $tg\delta$, потере массы и механической прочности в процессе выдержки при повышенных температурах. Например, при температуре размягчения снижается механическая прочность диэлектрика, происходит деформация изделий и выход из строя электроэнергетического оборудования.

Оценкой нагревостойкости материала служит температура T_{PA3M} . Показателем нагревостойкости является время выхода из строя образца при температуре испытаний.

Материалы, используемые в изоляции трансформаторов, электрических машин и аппаратов, по нагревостойкости разделяют на семь классов (*Y, A, E, B, F, H, C*). Для каждого класса устанавливается определенная максимальная температура (90,105,120,130,155,180,200)⁰С, при которой материал может длительно работать без ухудшения свойств. Класс нагревостойкости для электроизоляционных материалов (систем изоляции) определяют на основе опыта эксплуатации (испытаний) ЭУ, показывающих пригодность диэлектриков данного класса для работы при установленной температуре.

Иногда изоляция ЭУ должна сохранять свои свойства при охлаждении до температуры (-70⁰С), а в особых случаях и при температурах: жидкого азота (-196⁰С), водорода (-252⁰С) и гелия (-268,7⁰С). При низких температурах электрические свойства диэлектриков, как правило, улучшаются, а механические ухудшаются.

Например, эластичные и гибкие в нормальных условиях материалы, при низких температурах становятся жесткими, хрупкими и легко разрушаются, особенно при вибрациях.

Холодостойкость изоляции электроэнергетического оборудования определяется методом сравнения механических характеристик при отрицательной и нормальной температурах. Например, измеряют деформации диэлектрика при растяжении с учетом температур и рассчитывают коэффициент холодостойкости:

$$k_{\text{ХОЛ}} = l_2/l_1, \quad (4.40)$$

где l_2 - деформации диэлектрика при растяжении с учетом низкой температуры; l_1 - деформации диэлектрика при растяжении с учетом нормальной температуры.

Холодостойкость определяется предельно низкой температурой ($T_{\text{ХОЛ}}$), при которой коэффициент $k_{\text{ХОЛ}}$ остается постоянным.

Стойкость к термоударам определяется для хрупких материалов и изделий из них. Например, изоляторы из электротехнического фарфора должны выдерживать трехкратное нагревание без заметного ухудшения основных свойств. При определении стойкости к термоударам нагретые изоляторы погружаются в ледяную воду, где выдерживаются определенное время. После выдержки изоляторы кондиционируются на воздухе при комнатной температуре. Далее цикл «нагревание - охлаждение» повторяют. После трех циклов изоляторы кондиционируются и подвергаются электрическим испытаниям.

Физико-химические свойства диэлектриков. Электроизоляционные материалы имеют различную стойкость к разрушению (коррозии) при кон-

такте с водой, кислотами, щелочами, солевыми растворами, маслами, топливом, газами.

При определении химической стойкости образцы выдерживают в условиях, близких к эксплуатационным требованиям и определяют изменение их внешнего вида, массы, электрических и других параметров. Например, в нефтяных маслах при эксплуатации происходит коррозия погруженных в масло изделий из изоляции и металлов с образованием кислоты (масло стареет).

Кислоты содержатся и в плохо очищенных маслах электроэнергетического оборудования. Количество кислоты в масле характеризуется кислотным числом, равным количеству граммов едкого кали (KOH), необходимого для нейтрализации всех свободных кислот, содержащихся в 1 кг испытуемого материала.

Влагостойкость диэлектрика определяется способностью материала сорбировать (поглощать) влагу из окружающей среды (влажного воздуха). В процессе выдержки во влажной атмосфере контролируют параметры диэлектрика, например - сопротивление изоляции ($R_{ИЗ}$) и определяют влагопоглощение:

$$w_d = \frac{m_t - m}{m}, \quad (4.41)$$

где m - начальная масса образца, m_t - масса образца после его выдержки в течение времени (t) во влажной атмосфере.

Водостойкость и водопоглощение определяются по изменению таких же параметров диэлектрика в процессе выдержки его в дистиллированной воде.

Под действием ионизирующих излучений (ИИ) происходят необратимые изменения структуры диэлектрика электроустановки, которые называют *радиолизом*. В полимерах радиолиз приводит к структурированию - образованию связей между молекулами, а также и к деструкции - разрушению молекул. В результате изменяются физико-химические, механические и электрические свойства материалов.

Радиолиз керамических диэлектриков происходит при поглощении больших доз ИИ, при этом контролируют изменения механических свойств диэлектрика. Необратимые изменения механических свойств определяют изменения электрических свойств.

Тропикостойкость диэлектрика определяют по изменению сопротивления ρ , параметра $tg\delta$, электрической ($E_{ИП}$) и механической прочности под воздействием тропических климатических факторов. Для районов с тропическим влажным (морским) климатом характерны неблагоприятные

факторы: холод, жара, влага, солнечная радиация, атмосфера, загрязненная морской солью и т.д. Дополнительно на электроустановки объектов воздействуют микроорганизмы (плесневые грибы, бактерии); вредители животного мира (термиты, муравьи, тараканы, грызуны) и других представителей фауны. В результате, свойства диэлектриков, в составе электротехнических изделий, резко ухудшаются (может произойти пробой изоляции электроустановки).

Газообразные диэлектрики. Преимуществами газообразных диэлектриков являются высокое удельное сопротивление (ρ), малый тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$), малая диэлектрическая проницаемость (ϵ). Наиболее важным свойством газов является их способность восстанавливать электрическую прочность ($E_{ПР}$) после разряда.

Кроме воздуха в качестве изоляции используют азот, водород, углекислый газ. Прочность $E_{ПР}$ газов в нормальных условиях эксплуатации ЭУ мало отличаются друг от друга (равны прочности воздуха).

В таблице 4.3 даны отношения прочности газов $E_{ПРГ}$, к прочности воздуха $E_{ПРВ}$, (принята за единицу) и даны точки кипения газов при нормальном давлении.

Таблица 4.3 – Основные параметры газообразных диэлектриков

№	Диэлектрик	Плотность, кг/м ³	Температура кипения, °С	$\frac{E_{ПРГ}}{E_{ПРВ}}$
1	Азот	1,25	-196	1,0
2	Гексафторид серы (элегаз)	6,70	-64	2,3
3	Дихлорфторметан (фреон-12)	6,33	-30	2,4
4	Гексафторэтан	9,01	-78	2,0
5	Трифторметилпентафторсера	-	-20	3,1

Требования к газам в электроизоляционных конструкциях лучше всех удовлетворяют элегаз (SF_6) и фреон (CCl_2F_2).

Например, гексафторэтан нельзя использовать при повышенных давлениях из-за низких критических параметров ($P_{кр} = 3,3$ МПа, $T = -24^{\circ}C$).

Азот имеет с воздухом одинаковую прочность $E_{\text{ПР}^B}$ и применяется вместо воздуха в газовых конденсаторах ЭУ, т.к. не содержит кислорода (окисляет соприкасающиеся с ним материалы).

Элегаз имеет прочность $E_{\text{ПР}^D}$ примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха. Диэлектрик обладает низкой температурой кипения и высокой плотностью (в 5,1 раза тяжелее воздуха), SF_6 сжимают до давления 2МПа без сжижения.

Элегаз нетоксичен, химически стоек, не разлагается до температуры 800°C. Газ SF_6 применяют в силовых трансформаторах при особых требованиях к пожарной безопасности. Такие трансформаторы эксплуатируются с применением принудительной циркуляции SF_6 .

Интерес, как диэлектрик, для электроэнергетического оборудования представляет водород, имеющий высокий коэффициент теплопроводности, несмотря на его меньшую прочность $E_{\text{ПР}^B}$ по сравнению с воздухом. Водород применяют в качестве электроизоляционной и охлаждающей среды в турбогенераторах электростанций. В электроэнергетическом оборудовании применяют инертные газы (гелий), которые используют, как добавки к высокопрочным сжатым газам, для повышения их способности гасить дугу в выключателях.

Жидкие диэлектрики (ЖД) предназначены для пропитки электрической изоляции электроэнергетического оборудования (трансформаторов, конденсаторов, кабелей) с целью повышения электрической прочности и отвода тепла; для гашения дуги в масляных выключателях; заливки маслонаполненных вводов, реакторов и реостатов.

По химической природе ЖД делят на нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное, кабельное) и синтетические жидкости (хлорированные и фторированные углеводороды, кремний и фторорганические жидкости и т.п.).

Нефтяные масла получают фракционной перегонкой нефти. Выделенные фракции представляют собой смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов с небольшой примесью других компонентов, содержащих атомы серы, кислорода и азота. Масла, в которых преобладают нафтеновые углеводороды, называют нафтеновыми.

Среди трансформаторных масел на их долю приходится (75...80)%. Составной частью электроизоляционных масел являются ароматические углеводороды (10...12%), обеспечивающих увеличение срока службы диэлектриков (излишнее количество ароматических углеводородов увеличивает $tg\delta$). Трансформаторное масло получают очисткой масляного дистиллята, который остается после отгонки от нефти легких нефтепродуктов (бензин, керосин, лигроин).

Свежее трансформаторное (конденсаторное) масло имеет соломенно-желтый цвет причем, чем глубже очистка, тем светлее масло. Масла, бывшие в эксплуатации имеют темный цвет.

Нефтяные электроизоляционные масла (горючие жидкости) представляют пожарную опасность в масляных хозяйствах энергопредприятий. Правила пожарной безопасности при работе с маслonaполненным оборудованием должны строго соблюдаться. Пожарную опасность ЖД оценивают по температуре вспышки паров трансформаторного масла в смеси с воздухом (ниже 140°C), а для масляных выключателей - по температуре застывания масла (-45°C).

Свойства трансформаторного масла нормированы стандартом. Важной характеристикой является кинематическая вязкость при температурах 20 и 50°C , т.к. при увеличении вязкости хуже отводится теплота от обмоток и магнитопровода трансформатора и сокращается срок службы электрической изоляции электроэнергетического оборудования.

Стандартом нормировано кислотное число (КЧ), которое учитывает старение масла в процессе эксплуатации. Для разных марок масла КЧ не должно превышать значений $(0,03...0,1)$ г КОН на 1кг. Для расчета расширителей трансформаторов учитывают плотность масла $(0,85...0,9 \text{ Мг/м}^3)$ и температурный коэффициент объемного расширения $(0,00065 \text{ К}^{-1})$.

По своим диэлектрическим характеристикам очищенное от примесей и влаги масло обладает свойствами неполярного диэлектрика. Так проницаемость масла $\varepsilon = 2,3$ при температуре окружающей среды 20°C , а параметр $\text{tg}\delta = 0,003$ при частоте 50 Гц. Значение параметра $\text{tg}\delta$ определяется проводимостью и зависит от степени очистки масла. Получение масел с пониженными диэлектрическими потерями ($\text{tg}\delta = 0,002...0,0005$) для кабелей и конденсаторов требует очистки с применением адсорбентов. Свежее трансформаторное масло при 20°C имеет сопротивление $\rho = 10^{13}$ Ом·м.

Важной характеристикой масла электроэнергетического оборудования является его электрическая прочность, которая чрезвычайно чувствительна к увлажнению. Стандартами установлены нормы прочности $E_{\text{ПР}}$ для чистого и сухого масла, приготовленного для заливки в трансформатор, и для масла, находившегося в эксплуатации.

Проверку масла на прочность $E_{\text{ПР}}$ производят в устройстве с металлическими дисковыми электродами диаметром 25 мм при расстоянии $2,5$ мм между ними. Напряжение $U_{\text{ПР}}$ чистых масел в разряднике составляет $(50...60)$ кВ при частоте 50 Гц и примерно 120 кВ при воздействии импульсного напряжения (вода в масле снижает значение напряжения пробоя).

Если вода находится в масле в виде эмульсии, которая втягивается в места, где напряженность поля велика, то в этом месте начинается развитие

явления пробоя. Увеличение напряжения $U_{\text{ПР}}$ с ростом температуры объясняется переходом воды из суспензии в молекулярно-растворенное состояние. Рост напряжения $U_{\text{ПР}}$ при уменьшении температуры ниже 0°C объясняется образованием льда и ростом вязкости масла.

Для повышения устойчивости масел к процессам старения их состав подбирают так, чтобы в нем не было естественных катализаторов окисления, а сохранялись соединения, замедляющие окисление (ингибиторы). В масла вводят синтетические ингибиторы - ионол, ДВРС в концентрации (0,1...0,5)%. Например, введение ионола замедляет процесс старения масла в (2...3)раза.

Масла, побывавшие в эксплуатации, подвергают регенерации. Влага и крупные твердые примеси удаляют на центрифугах (электроэнергетическое оборудование напряжением ниже 35кВ) и термовакуумной обработкой в специальных аппаратах (электроэнергетическое оборудование напряжением выше 35кВ).

Осушение масел производят искусственными цеолитами (молекулярные сита). Масла с КЧ ниже 0,4мг КОН на 1г подвергают очистке адсорбентами при температуре (50...60) $^{\circ}\text{C}$. Основные характеристики регенерированного масла соответствуют нормам на свежие трансформаторные масла.

Синтетические жидкие диэлектрики (СЖД). Жидкости применяют, когда необходимо обеспечить длительную и надежную работу высоковольтных ЭУ при повышенных тепловых нагрузках и напряженности поля, а также в пожароопасной или взрывоопасной среде. СЖД используют для заливки в герметичные емкости с блоками автоматики ЭУ.

Раньше применяли СЖД на основе хлорированных углеводородов, обладающих термической устойчивостью, электрической стабильностью, негорючестью, хорошей диэлектрической проницаемостью и невысокой стоимостью. Если цену нефтяного масла принять равной единице, то стоимость хлорированных углеводородов по отношению к маслу равна (4...10), кремнийорганических - (80...370) и фторорганических жидкостей - до 1150.

Однако в связи с токсичностью хлорированных углеводородов их применение запретили, хотя в части ЭУ они еще имеются. СЖД на основе хлорированных дифенилов являются токсичными и биологически вредными соединениями. При использовании СЖД надо соблюдать правила техники безопасности и промышленной санитарии.

Жидкие диэлектрики на основе кремнийорганических соединений (*полиорганосилоксановые жидкости - ПОСЖ*) не токсичны и экологически безопасны. ПОСЖ представляют собой полимеры с низкой степенью поли-

меризации в молекулах, в которых содержится повторяющаяся силоксанная группировка ($-Si-O-Si-$), атомы кремния которой связаны с органическими радикалами. В зависимости от строения радикала (метил-, этил-, фенил-), связанного с атомом кремния, группы *кремнийорганических жидкостей* (КОЖ) имеют название:

- полиметилсилоксановые (ПМСЖ);
- полиэтилсилоксановые (ПЭСЖ);
- полифенилсилоксановые (ПФСЖ).

Температура вспышки паров КОЖ нормируется не ниже 300°C , а температура застывания - ниже -60°C . При температурах более высоких, чем температура вспышки паров, КОЖ самовоспламеняются без контакта с открытым пламенем. По своим диэлектрическим характеристикам ПОСЖ приближаются к неполярным диэлектрикам. ПОСЖ используют в импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах, блоках радио- и электронной аппаратуры и т.п.

Жидкие диэлектрики на основе фторорганических соединений отличаются негорючестью, высокой химической, окислительной и термической стабильностью, высокими электрофизическими и теплопередающими свойствами. По химическому составу диэлектрики представляют собой углеводороды, амины, эфиры и другие соединения, в которых атомы водорода частично (полностью) замещены атомами фтора (хлора).

Если атомы водорода полностью замещены атомами фтора, то такие соединения называются перфторированными. Фтор углеводороды применяют в качестве хладагентов (хладонов, ранее - фреонов). Некоторые сорта хладонов выбирают в качестве жидких диэлектриков.

Жидкости используют для заполнения небольшого электроэнергетического оборудования (трансформаторов, блоков электронного оборудования и т.п.) в тех случаях, когда рабочие температуры велики для других жидких диэлектриков.

Перфторированные диэлектрики используют для создания испарительного охлаждения в силовых трансформаторах. По диэлектрическим свойствам фторированные углеводороды относят к неполярным соединениям. Смесь хладонов с воздухом взрывобезопасна.

Хладоны признаны нетоксичными соединениями, однако в помещении, заполненном их парами, возможна смерть теплокровных животных от удушья, вызванного недостатком кислорода. При высоких температурах хладоны разлагаются с выделением токсичных продуктов.

Твердые диэлектрики. Рассмотрим неполярные линейные полимеры. Полимеры, у которых мономерные звенья макромолекул не обладают дипольным моментом (полиэтилен, полистирол и т.п.).

Полиэтилен (ПЭ) продукт полимеризации этилена в присутствии катализаторов. При полимеризации получают ПЭ высокого (среднего, низкого) давления, с различной степенью кристалличности и механической прочности. Так, если предел прочности при растяжении первого ПЭ равен 14МПа, то второго и третьего ПЭ - 30МПа, а относительные удлинения при разрыве соответственно 600 и 400%. ПЭ обладает эластичностью и стойкостью к действию кислот и щелочей (таблица 9).

Полистирол (ПС) мономер стирола (легкая бесцветная синтетическая жидкость) с характерным запахом. Стирол полимеризуется при хранении на холоде. В темноте и при отсутствии катализаторов ПС превращается в твердую, прозрачную и бесцветную, как стекло, массу. Для ПС среднее значение степени полимеризации $n = 6000$. Для предотвращения самопроизвольной полимеризации ПС во время хранения к нему добавляют специальные вещества, замедляющие реакцию полимеризации. Такие вещества получили название ингибиторов.

Рассмотрим основные свойства неполярных линейных полимеров (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Основные свойства неполярных линейных полимеров

№	Параметры тонких пленок полимеров	Полиэтилен	Полистирол	Фторопласт
1	Удельное объемное сопротивление, (Ом·м)	$10^{14} \dots 10^{15}$	$10^{14} \dots 10^{16}$	$10^{14} \dots 10^{16}$
2	Относительная диэлектрическая проницаемость	2,3...2,4	2,5...2,6	1,9...2,2
3	Параметр $tg\delta$ при частоте 10^6 Гц	0,0002... 0,0005	0,0002... 0,0004	0,0002... 0,0003
4	Электрическая прочность, МВ/м (верхние пределы)	150	110	250
5	Нагревостойкость, °С	105...130	75...80	290...300

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) имеет симметричное строение, высокую нагревостойкость (300°C) и стойкость к действию химических реагентов. ПТФЭ не горит, не растворяется в растворителях, неигроскопичен и не смачивается водой и другими жидкостями.

Как видно из таблицы 4.4, все неполярные полимеры характеризуются небольшой проницаемостью ε , малым $\operatorname{tg} \delta$, высокой прочностью E и высоким сопротивлением ρ . Диэлектрическая проницаемость неполярных полимеров определяется электронной поляризацией, значение ε не зависит от частоты и слабо уменьшается с повышением температуры. Диэлектрические потери ($\operatorname{tg} \delta$) в неполярных полимерах чувствительны к полярным примесям, только тщательной очисткой полимеров удастся снизить релаксационные потери.

У полярных линейных полимеров из-за асимметрии строения молекул сильно выражена дипольно-релаксационная поляризация (пониженные электроизоляционные свойства по сравнению с неполярными полимерами). К ним относят: поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, полиметилметакрилат (органическое стекло), полиамидные смолы и т.п.

Поливинилхлорид (ПВХ) - твердый продукт полимеризации газообразного винилхлорида $H_2C = CH - Cl$ представляющего собой этилен, в молекуле которого один атом H замещен атомом Cl . Название винилхлорид происходит от слова «винил». ПВХ имеет состав (C_2H_3Cl) . Благодаря сильным полярным межмолекулярным связям, прочно сцепляющим молекулярные цепи, ПВХ жесткий и негибкий. Для придания эластичности к ПВХ добавляют пластификаторы (полярные пластификаторы ухудшают электрические свойства).

Полиэтилентерефталат (лавсан) - термопластичный полимер, полученный из этиленгликоля и терефталевой кислоты $C_6H_4(COOH)_2$. Лавсан (дипольный диэлектрик) обладает хорошей механической прочностью и высокой температурой размягчения (рисунок 4.27).

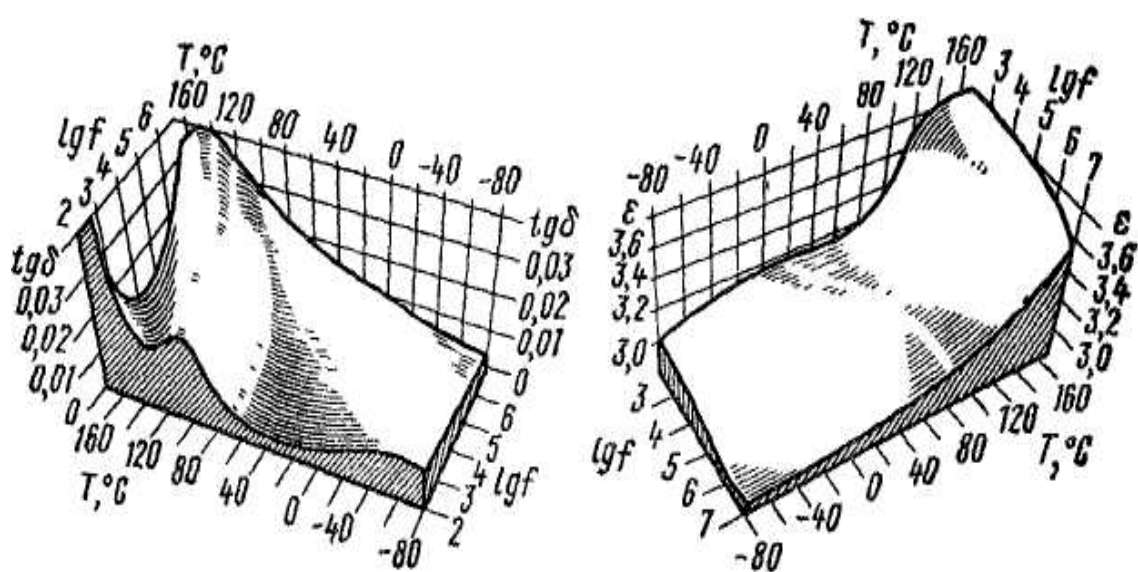


Рисунок 4.27 – Температурные и частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости

Лавсан применяют для изготовления волокон, пленок. При повышенных температурах диэлектрик быстро окисляется на воздухе. Обработку размягченного нагревом материала производят в атмосфере нейтрального газа (азота). Из лавсана получают тонкие пленки для межслойной изоляции обмоток трансформаторов, дросселей и т.п., рассчитанных на рабочую температуру $(-60\dots+150)^{\circ}\text{C}$. Пленки из лавсана с высокой механической прочностью имеют толщину около 6,5 мкм. Конденсаторы из таких пленок обладают большей рабочей температурой до 150°C .

Полярные полимеры по сравнению с неполярными, характеризуются на два порядка большим значением параметра $\operatorname{tg} \delta$ и заметно меньшим удельным объемным сопротивлением (ρ). Полярные полимеры используют в основном как изоляционные и конструкционные материалы электроэнергетического оборудования в диапазоне низких частот. Следствием полярности является сильная зависимость удельного поверхностного сопротивления (ρ_s) от влажности окружающей среды.

Композиционные порошковые пластмассы предназначены для изготовления изделий методом горячего прессования или литья под давлением. Состоят из связующего вещества (искусственные смолы - пространственные или линейные полимеры) и наполнителей (древесная мука, кварцевый песок, асбестовое или стеклянное волокно). Кроме того, в массу добавляют красители и для получения наилучших технологических свойств - пластификаторы. В качестве связующего вещества используют феноло-формальдегидные, крезолоформальдегидные, кремнийорганические и другие смолы.

Выпускают более 60 марок порошков, обладающих различными свойствами, для производства электротехнических изделий. Феноло-формальдегидные смолы благодаря наличию в их молекулах гидроксильных групп - OH , полярны. Термореактивная смола (бакелит) имеет сопротивление $\rho = 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и проницаемость $\varepsilon = 0,01$.

Крезоло-формальдегидные смолы ($\text{CH}_3 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{OH}$) имеют менее выраженные полярные свойства. Использование кремнийорганических смол позволяет получить пластмассы с нагревостойкостью более 300°C .

В качестве электроизоляционных и конструкционных материалов ЭУ используют композиционные пластмассы. Из них изготавливают корпуса различного электрооборудования, радиоприемников, телевизоров, измерительных приборов, клеммные щитки, головки кнопок, рукоятки, штепсельные разъемы. Изготовление таких изделий обычной механической обработкой трудоемко, прессование же из пластмассы позволяет получить их за одну технологическую операцию.

Слоистые пластики. Разновидностью композиционных пластмасс являются слоистые пластики, в которых в качестве наполнителя используют листовые волокнистые материалы. К слоистым пластикам относятся гетинакс и

текстолит.

Гетинакс получают горячей прессовкой бумаги, пропитанной фенолоформальдегидной смолой. Слоистое строение гетинакса приводит к анизотропии свойств. Удельное объемное сопротивление гетинакса вдоль слоев в (50...10) раз ниже, чем поперек, а электрическая прочность вдоль слоев в (5...8) раз ниже, чем поперек. Гетинакс относится к числу сильнополярных диэлектриков, т.к. волокнистая основа и пропитывающее вещество обладают полярными свойствами (прочность $E_{\text{ПР}} \approx 30 \text{ МВ/м}$).

Для изготовления печатных схем низкочастотных цепей автоматики электроэнергетического оборудования используют фольгированный гетинакс (выпускают около десяти марок). Материал представляет собой гетинакс, облицованный с одной или с двух сторон электрической красно-медной фольгой толщиной (0,035...0,05)мм. Требуемый рисунок печатной схемы получают путем избирательного травления.

Стекла. Стеклообразное состояние является основной разновидностью аморфного состояния вещества. *Стеклами* называют аморфные тела, получаемые в результате переохлаждения расплава, приобретающие в результате постепенного увеличения вязкости механические свойства твердых тел (процесс перехода из жидкого состояния в твердое обратим). В составы стекол введена большая часть элементов Периодической системы Д.И. Менделеева. Наиболее высокие показатели механических свойств имеют кварцевые и бесщелочные стекла, а наиболее низкие - стекла с повышенным содержанием оксидов PbO, Na_2O, K_2O .

Плотность стекол – (220...6500)кг/м³. Теплопроводность стекла низкая (максимальная у кварцевого и боросиликатного стекла). Термическая стойкость стекла прямо пропорциональна его прочности при разрыве и обратно пропорциональна его упругости и коэффициенту линейного расширения. Химическая устойчивость стекла зависит от сопротивляемости его разрушающему воздействию различных реагентов - воды, кислот, щелочей.

Для электротехнических стекол химическая устойчивость имеет существенное значение. Наибольшей стойкостью к воздействию влаги обладает кварцевое стекло. Гидролитическая стойкость стекол уменьшается при введении в состав стекла щелочных оксидов.

Электрические свойства стекла сильно зависят от состава стекла. Большинство стекол характеризуется ионной проводимостью. Специальные виды стекол имеют электронную или смешанную проводимость. Сильно понижают электропроводность стекол SiO_2, B_2O_3 (наименьшую электропроводность имеет кварцевое стекло, а наибольшую – высокощелочное), причем более химически устойчивые стекла имеют меньшую электропроводность.

Электропроводность стекол возрастает с ростом температуры из-за

увеличения подвижности ионов. Удельное объемное сопротивление стекол при невысоких температурах составляет $(10^8 \dots 10^{15}) \text{ Ом} \cdot \text{ м}$. Большое влияние на электропроводность стекол имеет поверхностная проводимость, сильно зависящая от адсорбированной водяной пленки.

Диэлектрические потери в стеклах складываются из трех видов потерь (проводимость, релаксационных и структурных). Параметр $\text{tg} \delta$ стекол увеличивается с ростом содержания щелочных оксидов (при малом содержании оксидов тяжелых металлов). Стекла с большим содержанием оксидов PbO и BaO имеют низкий параметр $\text{tg} \delta$.

Малую проницаемость ϵ_r имеет кварцевое стекло (3,7...3,8) и стеклообразный борный ангидрид (3,1...3,2) с электронной поляризацией. При наличии оксидов металлов свинца и бария, обладающих высокой поляризуемостью, проницаемость стекол $\epsilon_r = 20$.

Пробой стекол вызывается электрическими и тепловыми процессами. При постоянном напряжении электрическая прочность стекла $E_{\text{пр}} \leq 500 \text{ МВ/м}$, а при увеличении температуры резко снижается. В переменном электрическом поле прочность стекол $E_{\text{пр}} = (17 \dots 80) \text{ МВ/м}$.

Высоким набором свойств обладает кварцевое стекло, выплавленное из горного хрусталя или чистых кварцевых песков. Стекла отличаются хорошей оптической прозрачностью, механической прочностью при температурах свыше 1000°C , инертностью к действию многих химических реагентов и высокими электрическими характеристиками при нормальной ($\text{tg} \delta = 0,0002; \epsilon_r = 3,8$) и высокой ($200^\circ \text{C}; \rho = 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$) температурах.

Кварцевое стекло применяют для изготовления изделий для ЭУ: трубчатых, опорных и проходных изоляторов для электрических газоочистительных установок, изоляторов для линий электропередач, а также деталей переменных конденсаторов, катушек самоиндукции, ламп и т.п. Изоляторы из обычного щелочного стекла используют в качестве подвесных изоляторов (типа ПС на линиях напряжением 10, 35, 110 и 220кВ).

Ситаллы (стеклокристаллические материалы), получают путем стимулированной кристаллизации стекол специально подобранного состава (занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой). Недостатком стекол считается процесс местной кристаллизации (расстекловывание). Если в состав стекол, склонных к кристаллизации, ввести добавки веществ, дающих зародыши кристаллизации, то удастся стимулировать процесс кристаллизации стекла по всему объему изделия и получить материал с однородной микрокристаллической структурой.

Механическая прочность не меняется при нагревании до температуры $(700 \dots 800)^\circ \text{C}$. Рассмотрим зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и проницаемости от частоты (рисунок 4.28).

Диэлектрические потери в материалах определяются свойствами остаточной стекловидной фазы (сопротивление $\rho=(10^8 \dots 10^{12})\text{Ом}\cdot\text{м}$, прочность $E_{\text{пр}}=(25 \dots 75)\text{МВ/м}$, параметр $\text{tg}\delta=0,0001 \dots 0,008$). По назначению ситаллы делят на установочные и конденсаторные.

Установочные ситаллы используют в качестве подложек гибридных интегральных микросхем и дискретных пассивных элементов автоматики электроэнергетического оборудования. Достоинством ситалловых конденсаторов являются повышенная электрическая прочность по сравнению с керамическими конденсаторами (рисунок 4.28).

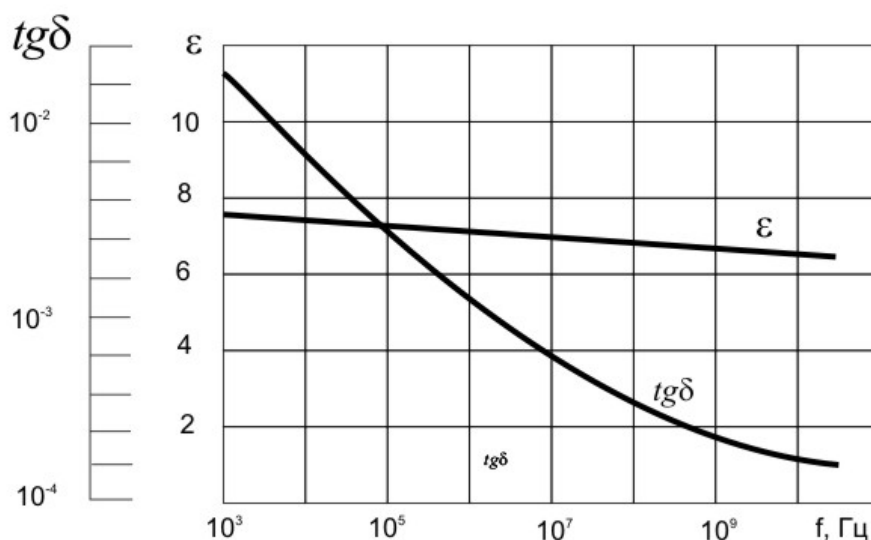


Рисунок 4.28 - Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и проницаемости ситалла от частоты

Керамические материалы. Под керамикой понимают группу диэлектриков с разнообразными свойствами, объединенных общим технологическим циклом. Слово «керамика» произошло от греческого «керамос», что значит «горшечная глина». При изготовлении из них изделий требуется высокотемпературный обжиг. Керамические материалы электроэнергетического оборудования по техническому назначению делят на электротехнические (установочные) и конденсаторные.

Электротехническую керамику (ЭТК) получают обжигом формовочной массы из минералов и оксидов металлов, выбирая состав ЭТК, получают материалы с разнообразными свойствами. Керамическую технологию применяют для изготовления диэлектрических, полупроводниковых, пьезоэлектрических, магнитных, металлокерамических и других изделий. Многие ЭТК имеют высокую механическую прочность и нагревостойкость, хорошие электрические характеристики.

У диэлектриков отсутствуют механические деформации при длитель-

ном приложении нагрузки, ЭТК имеют большую, чем у органических материалов, устойчивость к электрическому и тепловому старению.

Электротехнический фарфор (ЭТФ) является основным керамическим материалом, используемым для производства низковольтных и высоковольтных изоляторов и других изоляционных элементов электроэнергетического оборудования напряжением до 1150кВ переменного и до 1500кВ постоянного тока.

ЭТФ состоит из кристаллической, аморфной и газовой фаз. Свойства ЭТФ определяются химическим и фазовым составами, структурой и технологией изготовления. Основными компонентами ЭТФ являются сырьевые материалы минерального происхождения - глинистые вещества (каолин и глина, кварц, гипс). Изделия из ЭТФ получают обточкой, прессовкой, отливкой в гипсовые формы, выдавливанием через отверстие нужной конфигурации. После оформления изделия производится сушка полуфабриката для удаления воды, вводимой в массу для придания ей пластичности.

Следующая операция - глазурирование ЭТФ - выполняется для предохранения от загрязнения и создания поверхности, легко очищаемой в условиях эксплуатации ЭУ. При обжиге глазурное покрытие плавится и покрывает поверхность изолятора тонким стекловидным слоем. Глазурь увеличивает механическую прочность, «заглаживая» трещины и другие дефекты, уменьшает ток утечки по поверхности изоляторов ЭУ и повышает их напряжение перекрытия.

Наличие стекловидной фазы определяет высокую механическую прочность фарфора. ЭТФ имеет высокий предел прочности на сжатие (400...700)МПа, значительно меньший предел прочности при растяжении (45...70)МПа и изгибе (80... 150)МПа. Электроизоляционные свойства ЭТФ при нормальной температуре позволяют использовать его при низких частотах. Угол диэлектрических потерь ЭТФ быстро растет при увеличении температуры, что затрудняет применение его при высоких температурах и на высоких частотах.

Стеатитовая керамика (на основе тальковых минералов) характеризуется высокими значениями удельного сопротивления, малым углом диэлектрических потерь за исключением материала, предназначенного для производства крупных высоковольтных изоляторов.

Керамика обладает высокими механическими свойствами, стабильностью параметров при воздействии различных внешних факторов (влаги, температуры, высокого напряжения и др.). Благодаря высоким электромеханическим свойствам материал применяют для изготовления конденсаторов, высоковольтных изоляторов ЭУ.

Радиофарфор - материал, стекловидная фаза которого облагорожена введением в нее тяжелого оксида бария, что позволило снизить диэлектрические потери и проводимость стекловидной фазы. Ультрафарфор является

усовершенствованным радиофарфором. Ультрафарфор имеет по сравнению с обычным фарфором повышенную механическую прочность и теплопроводность.

Высокоглиноземистая керамика состоит из оксида алюминия (глинозема) и требует высокой температуры обжига (до 1750°C), затрудняющей изготовление. Диэлектрик отличается хорошими характеристиками: нагревостойкостью до температуры 1600°C , высоким удельным сопротивлением и малым параметром $\text{tg}\delta$, высокой теплопроводностью и механической прочностью.

Конденсаторная керамика имеет высокую диэлектрическую проницаемость. К диэлектрику предъявляют требование возможно меньшего значения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости. Основу низкочастотной керамики составляют титанат бария и твердые растворы на его основе. Эти материалы отличаются высокими значениями диэлектрической проницаемости и ее нелинейной зависимостью от напряженности электрического поля.

4.8. Активные диэлектрики

В электроэнергетике *активными диэлектриками (АК)* называют материалы свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий, а используют эти воздействия для создания функциональных элементов электроники. АК позволяют осуществить генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, запоминание или преобразование информации. По мере наращивания сложности и перехода к микроэлектронике в схемах автоматики ЭУ, роль и значение АК возрастает.

К числу АК относят сегнетоэлектрики; электреты; жидкие кристаллы; электрооптические материалы и др. По строению и свойствам АК делят на кристаллические и аморфные, полярные и неполярные диэлектрики. Ряд материалов проявляет активность благодаря наличию в АК спонтанной или устойчивой остаточной поляризации. Однако поляризованное начальное состояние не является обязательным условием проявления активности материала при внешних воздействиях.

Резкой границы между активными и пассивными диэлектриками не существует. Один и тот же материал в различных условиях эксплуатации может выполнять пассивные (изолятора, конденсатора) или активные (управляющий или преобразующий элемент) функции.

Основное требование к АК: чем сильнее изменяют его свойства при внешних возмущениях, тем лучше диэлектрик должен выполнять элемент

функции управления энергией или преобразования поступающей в электро-энергетическое оборудование информации.

АК классифицируют по роду физических эффектов, которые можно использовать для управления свойствами материалов. Однако такая классификация не позволяет четко отделить одну группу материалов от другой. Это связано с тем, что многие АК проявляют высокую чувствительность по отношению к нескольким видам энергетических воздействий.

Наибольшей универсальностью характеризуются сегнетоэлектрики, сочетающие в себе свойства пьезоэлектриков, пироэлектриков, электретов и электрооптических материалов. Вместе с тем, сегнетоэлектрики обладают рядом специфических, только им присущих свойств, например нелинейное изменение поляризованности при воздействии электрического поля, что позволяет выделить сегнетоэлектрики в самостоятельную группу.

Сегнетоэлектрики (СЭ) - вещества, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой можно изменить с помощью внешнего электрического поля. В отсутствие внешнего поля СЭ имеют доменную структуру.

Домены - макроскопические области, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, которая возникает под влиянием внутренних процессов в СЭ. Направления электрических моментов у разных доменов различно.

Крупные образцы всегда разбиваются на множество доменов, поскольку однодоменное состояние энергетически невыгодно. Разбиение на домены уменьшает электростатическую энергию СЭ. В монокристалле относительная ориентация электрических моментов доменов определяется симметрией кристаллической решетки.

Рассмотрим доменную структуру для СЭ подобного типа (рисунок 4.29).

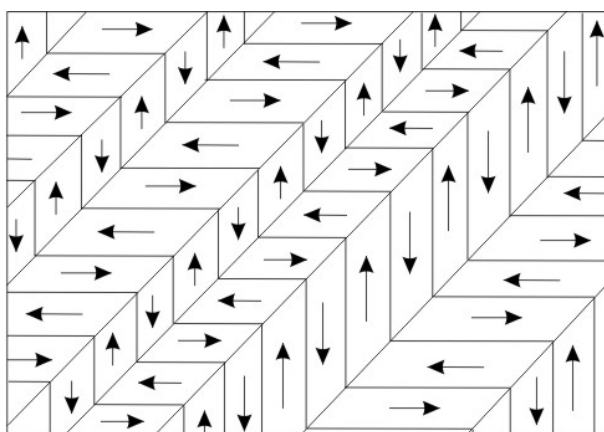


Рисунок 4.29 – Схема расположения доменов в кристалле титаната бария

Энергетически наиболее выгодной является такая структура, при которой обеспечивается электрическая нейтральность доменных границ и по этой

причине электрические моменты доменов ориентируются по принципу «голова» к «хвосту». Установлено, что линейные размеры доменов составляют $(10^{-4} \dots 10^{-1})$ см. Внешнее электрическое поле изменяет направления моментов доменов, что создает эффект сильной поляризации, т.е. сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости (до сотен тысяч).

Доменная поляризация связана с процессами зарождения и роста новых доменов, которые вызывают переориентацию вектора спонтанной поляризованности в направлении внешнего электрического поля.

Следствием доменного строения СЭ является нелинейная зависимость электрической индукции (D) от напряженности E (рисунок 4.30).

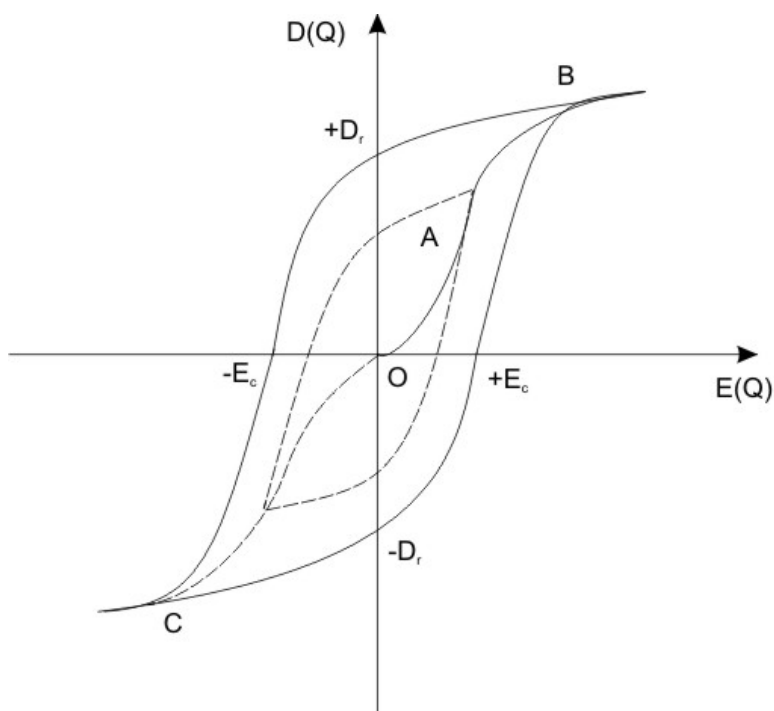


Рисунок 4.30 – Основная кривая поляризации сегнетоэлектрика (OAB) и петля диэлектрического гистерезиса ($ДГ$)

В слабом электрическом поле связь между параметрами D и E носит линейный характер. На участке OA преобладают процессы обратимого смещения (флуктуации) доменных границ, а на участке AB смещение доменных границ носит необратимый характер.

В процессе поляризации разрастаются домены с преимущественной ориентацией, у которых вектор спонтанной поляризации образует наименьший угол с направлением поля. При напряженности E (точка B) все домены оказываются ориентированными по полю. Наступает состояние технического насыщения (в монокристаллах соответствует однодоменному состоянию).

Возрастание индукции D на участке насыщения обусловлено процес-

сами индуцированной (т. е. электронной и ионной) поляризации, роль которой усиливается с повышением температуры. Кривую OAB называют основной кривой поляризации СЭ (кривая заряда сегнетоэлектрического конденсатора).

Если в поляризованном до насыщения СЭ уменьшить напряженность ($E \approx 0$), то индукция ($D \neq 0$), а примет некоторое остаточное значение D_r . При воздействии полем противоположной полярности индукция уменьшается и при некоторой напряженности поля изменяет свое направление.

Дальнейшее увеличение напряженности E вновь переводит СЭ в состояние насыщения (точка C). В результате, переполяризация СЭ в переменных полях сопровождается диэлектрическим гистерезисом. Напряженность E_C , при которой индукция проходит через ноль, называется коэрцитивной силой. ДГ обусловлен необратимым смещением доменных границ под действием поля и свидетельствует о дополнительном механизме диэлектрических потерь, связанных с затратами энергии на ориентацию доменов.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, рассеиваемой в СЭ за один период. Вследствие потерь на гистерезис СЭ имеют большой тангенс угла диэлектрических потерь ($tg \delta \approx 0,1$). Совокупность вершин петель ДГ, полученных при различных значениях амплитуды переменного поля, образует основную кривую поляризации СЭ.

Специфические свойства СЭ проявляются лишь в определенном диапазоне температур. В процессе нагревания происходит распад доменной структуры и СЭ переходит в параэлектрическое состояние, а температуру T_K фазового перехода называют сегнетоэлектрической точки Кюри. В точке Кюри спонтанная поляризованность исчезает, а проницаемость ε достигает своего максимального значения.

Переход СЭ в параэлектрическое состояние сопровождается резким уменьшением параметра $tg \delta$, т.к. исчезают потери на гистерезис. Известно несколько сотен соединений, обладающих свойствами СЭ. Группу СЭ дополняют и расширяют твердые растворы на основе различных соединений.

Таким образом, сегнетоэлектричество является распространенным явлением в диэлектриках, а СЭ характеризуются многообразием структурных типов, что свидетельствует о различии молекулярных механизмов спонтанной поляризации.

По типу химической связи и физическим свойствам СЭ делят на две группы: ионные и дипольные кристаллы. У ионных кристаллов структурным элементом кристаллической решетки является кислородный октаэдр. К ионным СЭ относят титанат бария, йодат калия и др. Дипольные кристаллы имеют полярные группы атомов, которые способны занимать различные положения равновесия.

К дипольным СЭ относят сегнетову соль, нитрит натрия и др. Именно в кристаллах сегнетовой соли впервые были обнаружены особенности в поведении диэлектриков, обусловленные спонтанной поляризацией, поэтому их назвали сегнетоэлектриками (СЭ).

В некоторых кристаллах СЭ электрические моменты соседних элементарных ячеек за счет смещения ионов (упорядочения дипольных моментов) ориентируются во взаимно противоположных направлениях. Такие вещества называют *антисегнетоэлектриками*. Применяют СЭ по направлениям:

- конденсаторы с большой удельной емкостью;
- материалы с большой нелинейностью поляризации для усилителей;
- ячейки памяти вычислительной техники;
- кристаллы для модуляции и преобразования лазерного излучения;
- диэлектрики пьезоэлектрических и пироэлектрических преобразователей.

Для электроэнергетического оборудования из конденсаторной сегнетовой керамики выделим элементы со слабо выраженной температурной зависимостью проницаемости ε - (Т-900); сглаженной зависимостью проницаемости ε от температуры - (СМ-1); максимальной проницаемостью ε в интервале температур - (Т-8000). Например, диэлектрик СМ-1 изготавливают на основе титаната бария с добавкой окислов циркония и висмута.

СЭ применяют для производства малогабаритных конденсаторов на низких напряжениях. Нелинейные диэлектрические элементы в тонкопленочном исполнении, являются основой электронных устройств - параметрических усилителей, низкочастотных усилителей мощности, умножителей частоты, модуляторов, стабилизаторов напряжения, управляемых фильтров и др.

Сегнетоэлектрики с ППГ. Благодаря диэлектрическому гистерезису СЭ применяют в запоминающих устройствах электроэнергетического оборудования. Для этих целей необходим СЭ с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), что характерно для монокристаллов.

В отсутствие внешнего поля СЭ с ППГ имеет два устойчивых состояния, соответствующих различным направлениям остаточной электрической индукции (рисунок 4.31).

Одно из этих состояний в запоминающей ячейке означает хранение единицы, а другое - хранение нуля. Подавая внешнее напряжение различной полярности, СЭ переводят из одного состояния в другое (основаны запись, считывание и стирание информации). Считывание информации выполняют без ее разрушения, например, оптическим методом или измерением сопротивления тонкой полупроводниковой пленки, нанесенной на поверхности сегнетоэлектрика.

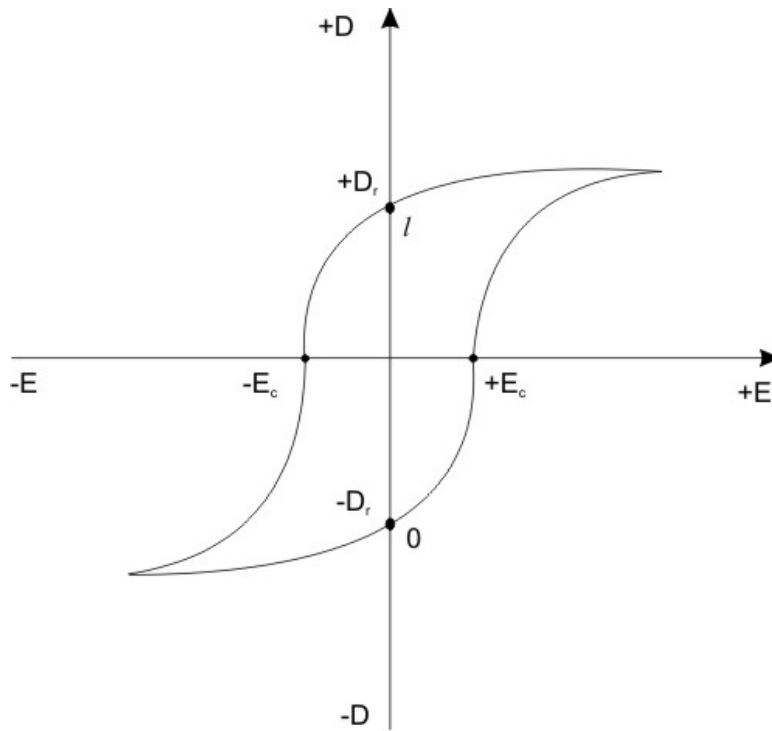


Рисунок 4.31 – Прямоугольная петля гистерезиса сегнетоэлектрика

К *пьезоэлектрикам* (ПЭ) относят диэлектрики, которые обладают сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом - явлением поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Явление было открыто братьями Кюри в 1880г.

Возникающий на поверхностях ПЭ электрический заряд изменяется по линейному закону в зависимости от механических усилий:

$$Q = dF, \quad (4.42)$$

$$Q/S = dF/S = q_s = P = d\sigma, \quad (4.43)$$

где Q - заряд; d - пьезомодуль; F - сила; S - площадь; q_s - заряд, который приходится на единицу площади; P - поляризованность; σ - механическое напряжение в сечении диэлектрика.

Таким образом, пьезомодуль d численно равен заряду, возникающему на единице поверхности ПЭ при приложении к нему единицы давления.

Пьезоэлектрический эффект обратим. При обратном эффекте происходит изменение относительных размеров диэлектрика ($\Delta l/l$) в зависимости от напряженности E по линейному закону:

$$\Delta l/l = \delta = dE, \quad (4.44)$$

где δ - относительная деформация ПЭ.

Пьезоэлектрический эффект наблюдают в веществах с гетерополярной химической связью, т. е. ПЭ могут быть либо ионные, либо сильнополярные диэлектрики. Вторым необходимым условием существования пьезоэлектрического эффекта является отсутствие центра симметрии в структуре диэлектрика, иначе деформация вызывает симметричное смещение положительных и отрицательных зарядов, и электрический момент не возникает.

ПЭ являются вещества с высоким удельным сопротивлением (ρ). В проводящих средах ПЭ поляризация компенсируется свободными носителями заряда. Поскольку любой диэлектрик обладает током утечки, применение пьезоэлектрического эффекта связано с переменными (быстропротекающими) процессами.

Известно более 1000 веществ, обладающих ПЭ свойствами, в том числе - все сегнетоэлектрики. Практическое применение в электронике находит ограниченный круг материалов, например монокристаллический кварц (модификация двуокиси кремния). Пьезоэлектрический эффект существует лишь у β -кварца, устойчивого до температуры 573°C . Выше этой температуры изменяется тип структуры, и ПЭ свойства исчезают.

Ввиду ограниченных запасов природного кварца, применяют искусственные кристаллы. В качестве ПЭ материала применяют сегнетоэлектрическую керамику.

Пьезоэлектрической керамикой (ПЭК) называют поляризованную сегнетовую керамику, предназначенную для использования в ПЭ преобразователях. Из ПЭК делают активные элементы любого размера и любой формы. Основным материалом для изготовления ПЭ элементов являются твердые растворы, например, цирконат-титанат свинца (ЦТС). ПЭК используется для дефектоскопии, механической обработки материалов.

Из ПЭК делают малогабаритные микрофоны, телефоны, громкоговорители (высокочастотные), слуховые аппараты. ПЭК элементы используют в качестве датчиков давлений, деформаций, ускорений и вибраций, а преобразование электрической энергии в механическую и наоборот положено в основу работы пьезотрансформатора.

Пьезоэлектрический трансформатор (ПЭТ) предназначен для получения высокого напряжения.

ПЭТ выполняют в виде пластины или бруска, одна половина которого (возбудитель колебаний) поляризуется по толщине, а другая половина (генератор) - по длине бруска (рисунок 4.32).

Переменное напряжение U_{BX} , подводимое к зажимам возбудителя ПЭТ, вызывает резонансные механические колебания по длине бруска. Механические колебания, возникающие в генераторной части, приводят

к появлению напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$.

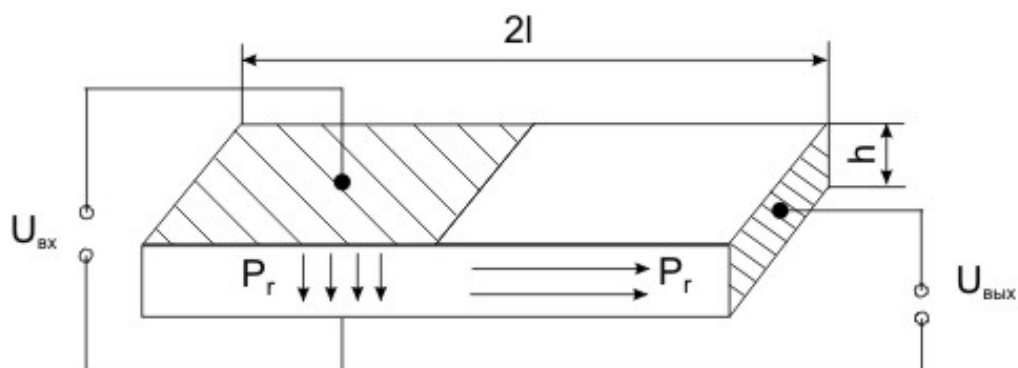


Рисунок 4.32 – Условная схема пьезоэлектрического трансформатора

ПЭТ работают в диапазоне частот (10...500) кГц, т.к. на более высоких частотах их размеры оказываются малыми, а на более низких - большими. Коэффициент трансформации напряжения, пропорциональный отношению $2l/h$ и достигает 50 и более.

ПЭТ используют в схемах питания электронно-лучевых трубок, газоразрядных приборов, счетчиков Гейгера и для генерирования высоковольтных импульсов. Достоинства источников питания: отсутствие магнитного поля, простота и надежность конструкции, малые масса и габаритные размеры.

Пироэлектрики - диэлектрики, обладающие пироэлектрическим эффектом, основанном на изменении спонтанной поляризованности диэлектриков ($P_{СП}$) при изменении температуры (T).

Уравнение пироэлектрического эффекта:

$$-dP_{СП} = p dT, \quad (4.45)$$

где p - пироэлектрический коэффициент.

Качество пироэлектрического материала характеризуют параметром:

$$R_B = \frac{p}{\varepsilon C}, \quad (4.46)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость; C - удельная объемная теплоемкость.

Чем больше значение параметра R_B , тем большую разность потенциалов получают на диэлектрике при одной и той же поглощаемой мощности. Пироэлектрическими свойствами обладают линейные диэлектрики, например, турмалин, сульфат лития и все сегнетоэлектрические

материалы. Пироэлектрический эффект в сегнетоэлектриках используют в тепловых датчиках и приемниках лучистой энергии, для регистрации инфракрасного излучения.

У линейных пироэлектриков, в отличие от сегнетоэлектриков, направление спонтанной поляризованности не изменяется с помощью внешнего электрического поля, где спонтанная поляризованность:

$$P_{СП} = A\sqrt{T_K - T}, \quad (4.47)$$

где A - константа для данного материала.

Высокое значение параметра $R_B = 8,5 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ имеют кристаллы триглицинсульфата. Благодаря хорошему сочетанию свойств этот материал используют в низкочастотных детекторах излучения.

Рассмотрим пироэлектрические свойства триглицинсульфата (рисунок 53).

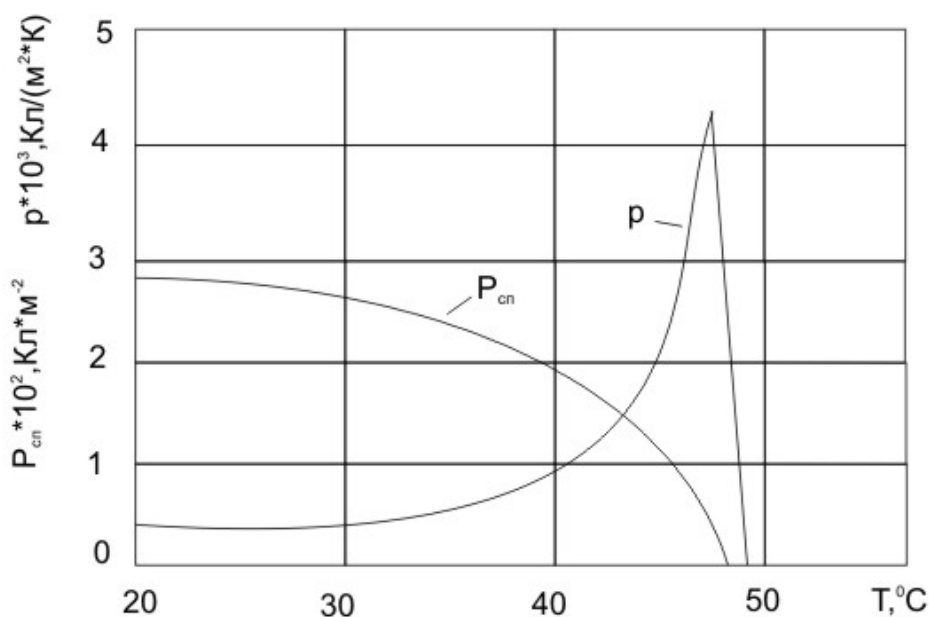


Рисунок 4.33 – Температурная зависимость спонтанной поляризованности ($P_{СП}$) и пироэлектрического коэффициента (p) активного диэлектрика - триглицинсульфата

Пироэлектрические и пьезоэлектрические свойства обнаружены у некоторых полимеров, например, у поляризованных пленок поливинилденфторида. Интерес к таким пленкам вызван простотой технологии, невысокой стоимостью, возможностью изготовления образцов практически любой геометрии.

Электретом (термоэлектретом) называют тело из диэлектрика, длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его

пространстве электрическое поле. Электрет является формальным аналогом постоянного магнита. Термоэлектреты создают электрическое поле в окружающем пространстве в течение многих месяцев, и даже лет.

Большой интерес представляют фотоэлектреты, изготавливаемые из материалов, обладающих фотоэлектропроводностью (сера, сульфид кадмия и др.), при одновременном воздействии света и электрического поля. Фотоэлектреты могут длительно сохранять заряды в темноте и быстро разряжаются при освещении.

Существуют и другие способы получения электретного состояния в диэлектриках. Например, электроэлектреты образуются при воздействии на диэлектрик только электрического поля без нагрева или облучения.

Рассмотрим образование электретного состояния в диэлектрике (рисунок 4.34).

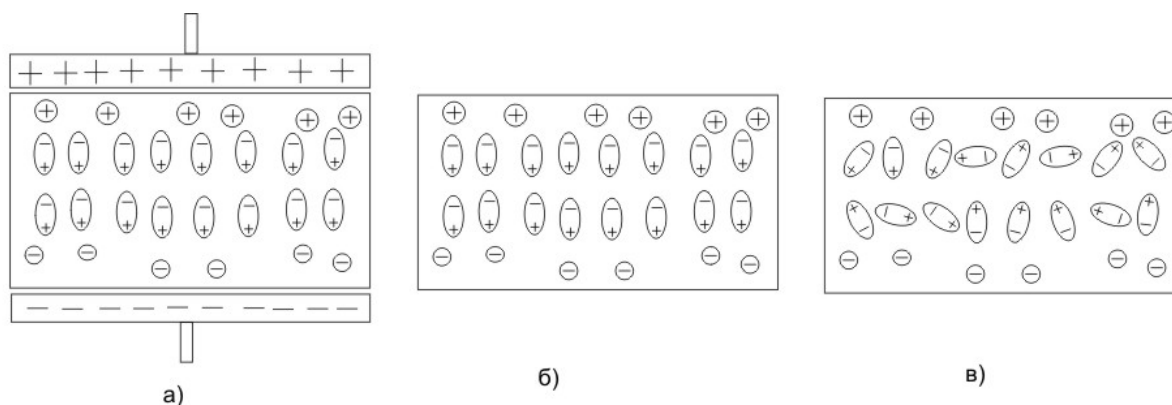


Рисунок 4.34 – Временные схемы состояния диполей электрета

На каждой из поверхностей электрета, находящегося под поляризующими электродами, образуются электрические заряды обоих знаков (рисунок 4.34, а). Заряды, перешедшие из поляризующего электрода на поверхностные ловушки электрета и имеющие тот же знак заряда, что и на электроде, называют гомозарядами.

Заряды с противоположным знаком полярности электродов, возникающие в электрете за счет различных релаксационных механизмов поляризации, называют гетерозарядами. Разность гетерозарядов и гомозарядов определяет результирующий заряд поверхности электрета. Преобладанием того или иного заряда объясняется инверсия его знака на поверхности электрета с течением времени.

Сразу после окончания поляризации преобладает гетерозаряд (рисунок 4.34, б), а спустя некоторое время, когда тепловое движение дезориентирует диполи, преобладающим оказывается гомозаряд (рисунок 4.34, в).

Это явление характеризуется кривыми заряда (рисунок 4.35).

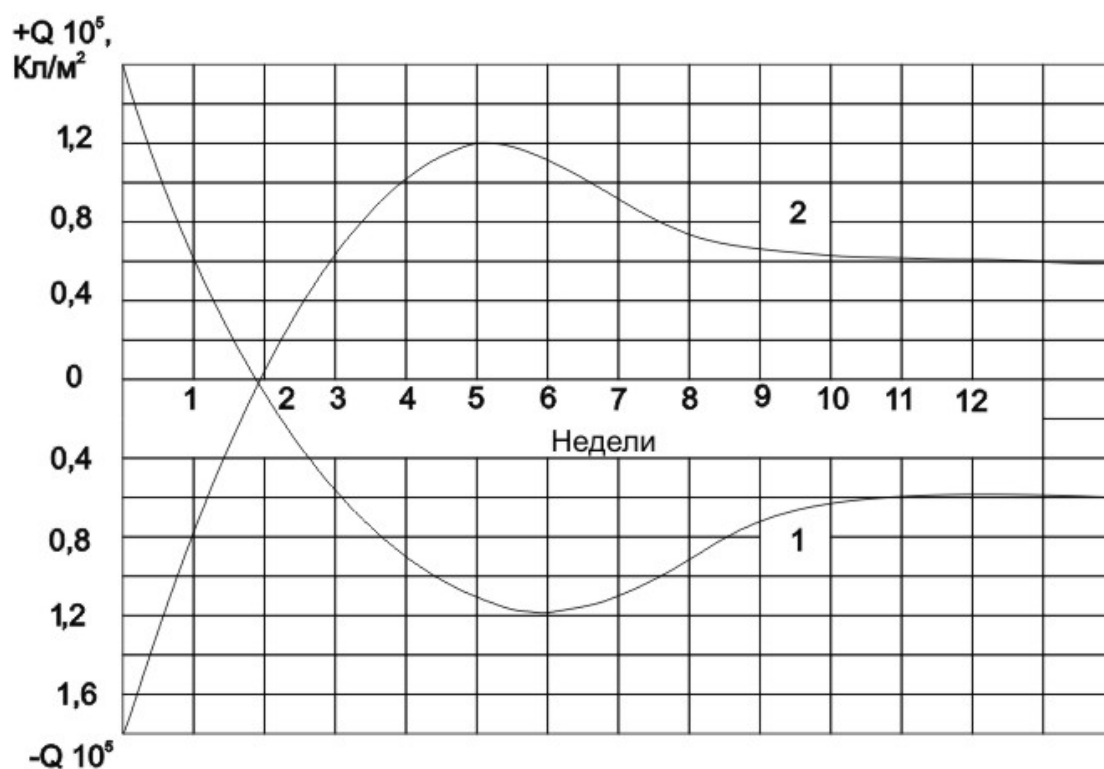


Рисунок 4.35 - Зависимости заряда электрета от времени:
 1 – сторона диэлектрика от минуса схемы; 2 – сторона диэлектрика от плюса схемы

Гомозаряды сохраняются в течение более длительного времени по сравнению с гетерозарядами. У органических полярных электретов преобладают гетерозаряды, у неорганических (керамических) материалов и органических неполярных диэлектриков - гомозаряды. У неполярного диэлектрика (пленочный фторопласт) существует прочно удерживаемый и значительный по величине гомозаряд.

Время жизни электретов достигает десятков лет и быстро уменьшается с повышением температуры и влажности окружающей среды. При нагревании освобождаются носители заряда, захваченные ловушками и нейтрализуются объемные заряды за счет электропроводности диэлектрика. В электретах с высоким удельным сопротивлением релаксация заряда, локализованного в ловушках, происходит медленно.

В электроэнергетическом оборудовании применяют электреты на основе полимерных пленок, например, политетрафторэтилен и полиэтилентерефталат. В условиях повышенной влажности наиболее стабильны электреты из политетрафторэтилена.

Электрет имеет вид тонкой пластинки с разноименными зарядами одинаковой поверхностной плотности на противоположных сторонах (рисунок 4.36).

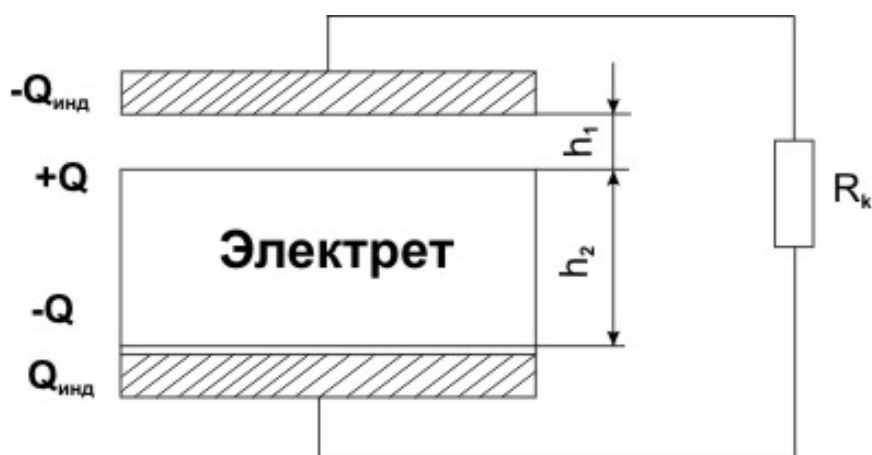


Рисунок 4.36 – Схема электрета с заданным сопротивлением нагрузки

Если электрет поместить между металлическими обкладками, то индуцированный заряд:

$$Q_{\text{инд}} = \frac{Q}{\varepsilon h_1/h_2 + 1}, \quad (4.48)$$

где Q - заряд на поверхности электрета; h_1 - зазор между электретом и электродом (зазор между другой поверхностью и электродом бесконечно мал); h_2 - толщина электрета; ε - диэлектрическая проницаемость материала электрета.

При изменении зазора h_1 индуцированный заряд также меняется. При периодическом изменении зазора в цепи между электродами проходит переменный ток (частота равна частоте изменения зазора). Внутреннее сопротивление системы «электрет – электроды» велико ($10^7 \dots 10^8$) Ом, в результате ток не зависит от внешней нагрузки (получается генератор переменного тока).

В преобразователях применяют полимерные пленки толщиной (3...20) мкм, металлизированные с одной стороны. Электреты применяют для изготовления микрофонов и телефонов, измерения механических вибраций, в качестве пылеуловителей, дозиметров радиации, измерителей атмосферного давления и влажности, электрометров, в клавишных вычислительных машинах, в электрофотографии и во многих других случаях.

Жидкими кристаллами (ЖК) называют такие вещества, которые находятся в промежуточном (мезоморфном) состоянии между изотропной жидкостью и твердым кристаллическим телом. С одной стороны, ЖК обладают текучестью, способностью находиться в каплевидном состоянии, а с другой - для ЖК характерна анизотропия свойств и, прежде всего, оптическая анизотропия. Небольшая величина межмолекулярных сил, обеспечивающих упорядо-

ченную структуру ЖК, является принципиальной основой сильной зависимости свойств от внешних факторов (температуры, давления, электрического поля и др.). Эта зависимость открывает возможности разработки ЖК индикаторных устройств различного назначения.

Широкое применение ЖК нашли сравнительно недавно. Специфика ЖК заключается в ограниченном температурном интервале существования мезофазы - ЖК состояния, которое образуют органические соединения с удлинённой палочкообразной формой молекул (соединения ароматического ряда). Известно более 3000 органических соединений, способных существовать в мезоморфном состоянии. Среди них есть ЖК, у которых температурный интервал существования мезофазы включает комнатную температуру.

По признаку общей симметрии ЖК делят на три вида: смектические, нематические и холестерические (рисунок 4.37).

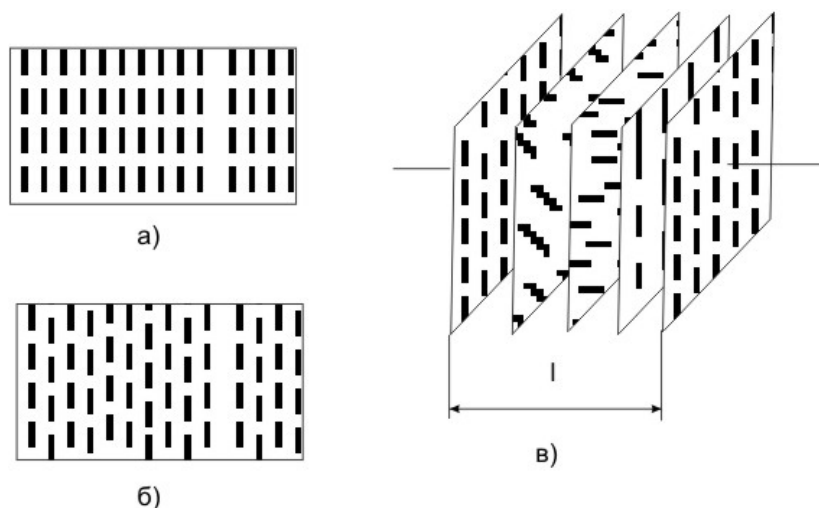


Рисунок 4.37 – Схемы строения различных жидких кристаллов:
a – смектические; *б* – нематические; *в* – холестерические

Смектическая фаза (рисунок 4.37,*a*) характеризуется слоистым строением. Центры тяжести удлинённых молекул находятся в плоскостях, равноудалённых друг от друга. В каждом слое молекулы ориентированы параллельно за счёт упругого дисперсионного взаимодействия. Текучесть обеспечивается лишь взаимным скольжением слоев, т.к. вязкость среды достаточно велика. Из-за высокой вязкости смектические ЖК не получили широкого применения в электронной технике.

В нематической фазе длинные оси молекул ориентированы вдоль одного общего направления, называемого нематическим директором. Однако центры тяжести молекул расположены беспорядочно, так что возникает симметрия более низкого порядка, чем у смектических кристаллов (рисунок 4.37,*б*). При таком строении ЖК возможно взаимное скольжение молекул вдоль нематического директора.

Холестерическая фаза на молекулярном уровне похожа на нематическую. Однако вся ее структура дополнительно закручена вокруг оси, перпендикулярной молекулярным осям. В результате получается слоистая винтовая структура с шагом спирали L порядка 300нм (рисунок 4.37,в).

По электрическим свойствам нематические ЖК относятся к группе полярных диэлектриков с невысоким удельным сопротивлением, значение которого можно регулировать растворением ионных соединений. Рассмотренные свойства нематических ЖК используют в электрооптических ячейках для управления световым потоком. Для получения цветных изображений в ЖК вводят молекулы красителя с удлинённой палочкообразной формой, которые ориентируются параллельно молекулам мезофазы.

Область применения нематических ЖК ограничивается индикаторными устройствами (дисплеи, крупноформатные табло, цифровые индикаторы для микрокомпьютеров, циферблаты электронных часов и цифровых измерительных приборов).

Основными преимуществами нематических ЖК-индикаторов являются: хороший контраст при ярком освещении; низкая потребляемая мощность; совместимость с интегральными схемами по рабочим параметрам и конструктивному исполнению; сравнительная простота изготовления и низкая стоимость.

В ЖК для индикации используется окружающий свет, благодаря чему их потребляемая мощность значительно меньше, чем в других индикаторных устройствах. Недостатками устройств являются невысокое быстродействие и подверженность процессам электрического старения.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называют поляризацией диэлектрика?
2. Какие виды поляризации диэлектрика можно считать мгновенными?
3. Какие виды поляризации диэлектрика можно считать замедленными?
4. В чем различие между ионной и ионно-релаксационной поляризациями? Что понимают под линейными и полярными диэлектриками?
5. В каких единицах измеряют удельное объемное поверхностное сопротивления диэлектриков?
6. В каких единицах измеряют удельное поверхностное сопротивления диэлектриков?
7. Каков механизм электропроводности твердых диэлектриков?
8. Как влияет температура на удельную проводимость твердых диэлектриков?
9. Что называют диэлектрическими потерями?
10. Какие механизмы диэлектрических потерь вам известны?
11. Как влияет температура на положение частотного максимума параметра

- $\operatorname{tg}\delta$ релаксационных потерь?
12. В каких диэлектриках важную роль играют потери на ионизацию?
 13. При каких условиях в диэлектриках важную роль играют потери на ионизацию?
 14. Почему ударная ионизация молекул газа в сильном электрическом поле производится главным образом электронами, а не ионами?
 15. Чем отличается пробоём газов в однородном и неоднородном электрических полях?
 16. Как влияет давление газа на его электрическую прочность?
 17. Какие механизмы пробоя твёрдых диэлектриков вам известны?
 18. Каковы условия проявления пробоя твёрдых диэлектриков?
 19. Каким образом можно классифицировать диэлектрики по свойствам?
 20. Чем отличается реакция полимеризации от реакции поликонденсации?
 21. Чем различаются свойства линейных и пространственных полимеров?
 22. Какие полимеры используются в качестве высокочастотных диэлектриков?
 23. Для каких целей производят изделия из композиционных пластмасс?
 24. Назовите основные преимущества эпоксидных компаундов.
 25. Какие виды стекол нашли широкое применение в электротехнике?
 26. В чем сходство между ситаллом и стеклом?
 27. В чем различие между ситаллом и стеклом?
 28. Назовите наиболее характерные области применения установочных высокочастотных керамических диэлектриков.
 29. Какие диэлектрики называют активными?
 30. В чем различие требований к активным и пассивным диэлектрикам?
 31. Какая электрическая упорядоченность свойственна сегнетоэлектрикам?
 32. Как объяснить диэлектрический гистерезис у сегнетоэлектриков?
 33. Что такое начальная диэлектрическая проницаемость?
 34. Что такое реверсивная диэлектрическая проницаемость?
 35. Что такое эффективная диэлектрическая проницаемость?
 36. Назовите наиболее важные области применения сегнетоэлектриков.
 37. На каких свойствах материалов основано применение сегнетоэлектриков?
 38. Что такое прямой пьезоэффект?
 39. Что такое обратный пьезоэффект?
 40. В каких диэлектриках можно наблюдать явления пьезоэффекта?
 41. От каких факторов зависят пьезоэлектрические свойства сегнетоэлектрической керамики?
 42. В чем преимущества пьезокерамики перед монокристаллическими пьезоэлектриками?
 43. Что такое пироэлектрический эффект?
 44. Какие применения пироэлектриков вам известны?
 45. Какова природа электретного состояния в диэлектриках?
 46. Что такое гомозаряд и гетерозаряд?
 47. В чем различие между жидким состоянием вещества и «жидким кристаллом»?

5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. Магнитные свойства веществ

Все тела при внесении их во внешнее магнитное поле намагничиваются, т.е. создают собственное магнитное поле, которое накладывается на внешнее поле. Магнитные свойства вещества определяются свойствами электронов и атомов. Любое тело, помещенное в магнитное поле, приобретает магнитный момент M .

Магнитный момент единицы объема (V) вещества называют намагниченностью:

$$J_M = dM/dV. \quad (5.1)$$

В изотропных телах намагниченность J_M (А/м) направлена параллельно (антипараллельно) напряженности магнитного поля (H). Намагниченность J_M связана с напряженностью H соотношением:

$$J_M = k_M H, \quad (5.2)$$

где k_M - магнитная восприимчивость, характеризующая способность вещества намагничиваться в магнитном поле.

Намагниченное тело, находящееся во внешнем поле, создает собственное магнитное поле, которое в изотропных материалах направлено параллельно внешнему полю. Поэтому его суммарная магнитная индукция (B) определяется алгебраической суммой индукции внешнего (B_0) и собственного (B_C) полей:

$$B = B_0 + B_C = \mu_0 H + \mu_0 J_M, \quad (5.3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Из выражений (5.2) и (5.3) следует, что:

$$B = \mu_0 H(1 + k_M) = \mu_0 \mu_r H, \quad (5.4)$$

где $\mu_r = 1 + k_M$ - относительная магнитная проницаемость.

Первопричиной магнитных свойств материала являются внутренние скрытые формы движения электрических зарядов, представляющие собой элементарные круговые токи, обладающие магнитными моментами. Такими токами являются электронные спины и орбитальное вращение электронов в атомах, а магнитные свойства атома определяются целиком электронами.

5.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе делят на пять групп: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Этим видам магнетиков соответствуют пять типов магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

Диамагнетики (ДМ) – вещества с магнитными моментами атомов $M_A = 0$ (при отсутствии внешнего магнитного поля) и отрицательной восприимчивостью ($k_M < 0$), не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. Диамагнетизм обусловлен небольшим изменением угловой скорости орбитального вращения электронов при внесении атома в магнитное поле.

Диамагнитный эффект является проявлением закона электромагнитной индукции на атомном уровне (универсален и присущ всем веществам), но маскируется более сильными магнитными эффектами. Диамагнетизм электронных оболочек выступает на первый план, когда собственный магнитный момент атомов равен нулю.

К ДМ относятся инертные газы (водород, азот и др.) и жидкости (вода, нефть и ее производные). Диамагнетики - ряд проводников (медь, серебро, золото, цинк, ртуть и др.) и полупроводников (кремний, германий и др.), а также органические соединения и неорганические стекла.

ДМ являются вещества с ковалентной химической связью и в сверхпроводящем состоянии.

Восприимчивость $k_M = 10^{-7}$, т.к. ДМ намагничиваются против направления поля, для них проницаемость $\mu_r < 1$. Восприимчивость k_M слабо изменяется с температурой (исключение – сверхпроводники), т.к. диамагнитный эффект обусловлен внутриатомными процессами, на которые тепловое движение частиц не оказывает влияния. Внешним проявлением диамагнетизма является выталкивание диамагнетиков из неоднородного магнитного поля.

Парамагнетики (ПМ) - вещества с моментом $M_A \neq 0$ (при отсутствии внешнего магнитного поля) и положительной восприимчивостью $k_M > 0$, не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля.

В ПМ атомы обладают элементарным магнитным моментом даже в отсутствие внешнего поля, однако из-за теплового движения эти магнитные моменты распределены хаотично так, что намагниченность вещества в целом равна нулю.

Внешнее магнитное поле вызывает преимущественную ориентацию магнитных моментов атомов в одном направлении. Тепловая энергия противодействует созданию магнитной упорядоченности, поэтому восприимчивость k_M

сильно зависит от температуры.

Благодаря положительной намагниченности ПМ, помещенные в неоднородное магнитное поле, втягиваются в него. В сильных полях и при низких температурах в ПМ наступает состояние магнитного насыщения, при котором все элементарные магнитные моменты ориентируются параллельно силовым линиям магнитного поля.

К числу ПМ относятся кислород, окись азота, щелочные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов. Парамагнитный эффект по физической природе аналогичен дипольно-релаксационной поляризации диэлектриков.

Ферромагнетики (ФМ) – твердые вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью и большой положительной магнитной восприимчивостью ($k_M \gg 0$), которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

ФМ присуща внутренняя магнитная упорядоченность, выражающаяся в существовании макроскопических областей с параллельно ориентированными магнитными моментами атомов.

Особенность ФМ - способность намагничиваться до насыщения в относительно слабых магнитных полях, при этом внутренне поле может в тысячи раз превосходить внешнее поле.

Антиферромагнетики (АФМ)- вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов (ионов) кристаллической решетки.

Для АФМ характерна небольшая положительная магнитная восприимчивость ($k_M > 0$), которая сильно зависит от температуры. При нагревании АФМ испытывает фазовый переход в парамагнитное состояние.

Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов. Типичными АФМ являются простейшие химические соединения на основе металлов переходной группы типа окислов. Известно около 1000 соединений со свойствами АФМ.

Ферримагнетики (ФМг) - вещества, магнитные свойства которых обусловлены некомпенсированным антиферромагнетизмом. ФМг обладают высокой магнитной восприимчивостью ($k_M \gg 0$), которая зависит от напряженности магнитного поля и температуры. ФМг характеризуются рядом существенных отличий от ферромагнитных материалов.

Свойствами ФМг обладают упорядоченные металлические сплавы - различные оксидные соединения (интерес представляют ферриты).

Таким образом, диа-, пара- и антиферромагнетики объединяют в группу слабомагнитных, а ферро- и ферримагнетики в класс сильномагнитных материалов используемых в электроустановках.

5.3. Природа ферромагнитного состояния материалов

Особые свойства ферромагнетиков (ФМ) обусловлены их доменным строением. Домены представляют собой макроскопические области, намагниченные до насыщения даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Согласно теории ферромагнетизма, решающую роль в создании спонтанной намагниченности играют силы обменного взаимодействия, которые носят квантовый характер.

Для двух близко расположенных атомов в молекуле водорода энергия обменного взаимодействия:

$$\mathcal{E}_A = -A(s_1 s_2), \quad (5.5)$$

где A - обменный интеграл, имеющий размерность энергии;

s_1 и s_2 - векторы, характеризующие направления спиновых моментов взаимодействующих электронов.

Рассмотрим схему взаимодействия электронов и ядер ферромагнетика (рисунок 5.1).

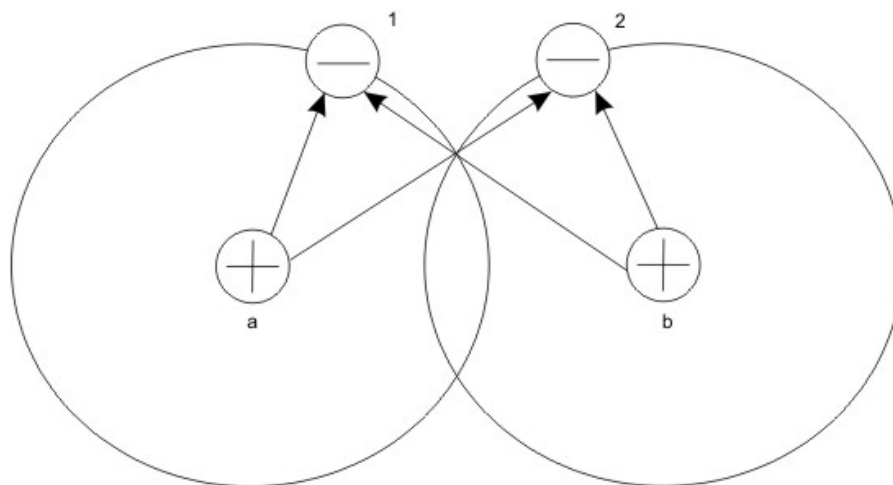


Рисунок 5.1 – Схема электростатического взаимодействия электронов и ядер в двухатомной молекуле

Электрон 1 находится в кулоновском поле ядра a и одновременно притягивается ядром b , а электрон 2 испытывает кулоновское притяжение со стороны ядра b и частично - ядра a . Из-за перекрытия электронных оболочек электроны 1 и 2 могут поменяться местами.

Вследствие неразличимости электронов 1 и 2 энергетическое состояние молекулы не изменится и происходит обобществление электронов молекулы (каждый из них будет одинаково притягиваться атомами a и b). Благодаря

обмену электронами и электростатическому взаимодействию электронов с ядрами, между атомами возникают силы притяжения (ковалентная связь).

Электростатическая энергия молекулы минимальна при определенной ориентации спинов электронов. При положительном знаке обменного интеграла ($A > 0$) минимуму электростатической энергии отвечает параллельная ориентация спинов ($s_1 \cdot s_2 = 1$), а когда интеграл отрицателен ($A < 0$), то энергетически выгодно антипараллельное расположение спинов ($s_1 \cdot s_2 = -1$).

Таким образом, интеграл A характеризует влияние магнитной упорядоченности на энергию системы, а численное значение и знак определяются степенью перекрытия электронных оболочек (зависят от расстояния между атомами a и b) (рисунок 5.2).

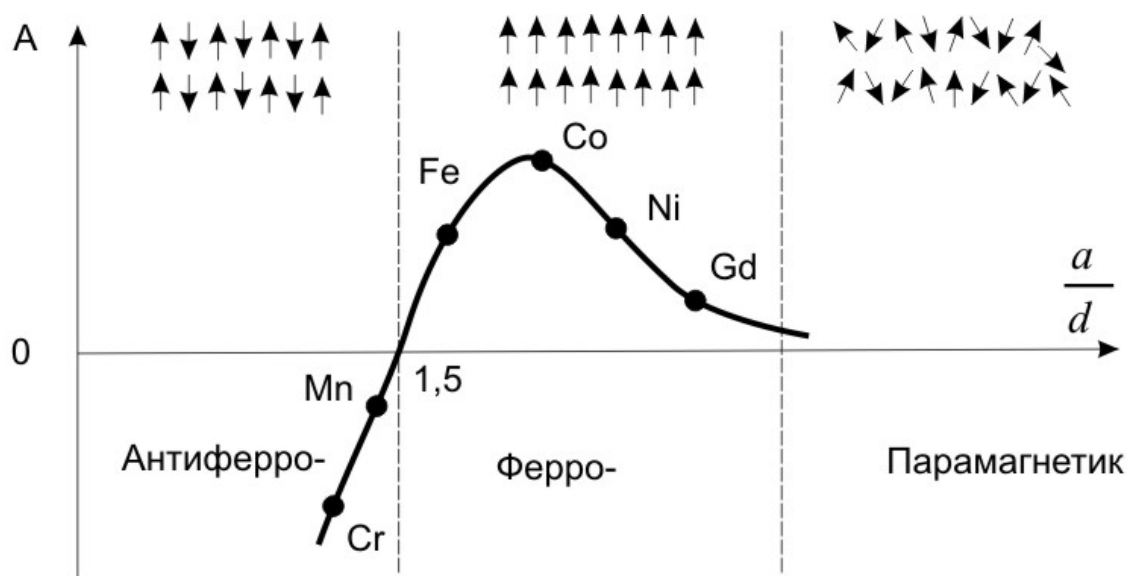


Рисунок 5.2 - Зависимость интеграла A от степени перекрытия электронных оболочек соседних атомов (отношения a/d):

a - расстояние между атомами; d - диаметр оболочки, содержащей некомпенсированные спины.

Энергия обменного взаимодействия оказывается незначительной, если расстояние $a = (3...4) \cdot d$. В этом случае обменные силы не могут противодействовать тепловому движению и вызывать упорядоченное расположение спинов (вещество проявляет свойства парамагнетика). При уменьшении расстояния между атомами интеграл A возрастает, усиливается обменное взаимодействие и происходит параллельная ориентация спинов, характерная для ФМ.

При дальнейшем сближении атомов обменный интеграл изменяет знак, т.е. в случае близкого действия энергетически выгодно антипараллельное расположение спиновых моментов соседних атомов (вещество проявляет свойства АФМ).

Критерий перехода от антиферромагнитного состояния вещества к ферромагнитному состоянию:

$$a/d > 1,5. \quad (5.6)$$

Из всех материалов критерию (5.6) удовлетворяют железо, кобальт, никель.

Геометрия доменной структуры ФМ (характер разбиения на домены) определяется из условия минимума свободной энергии системы (рисунок 5.3).

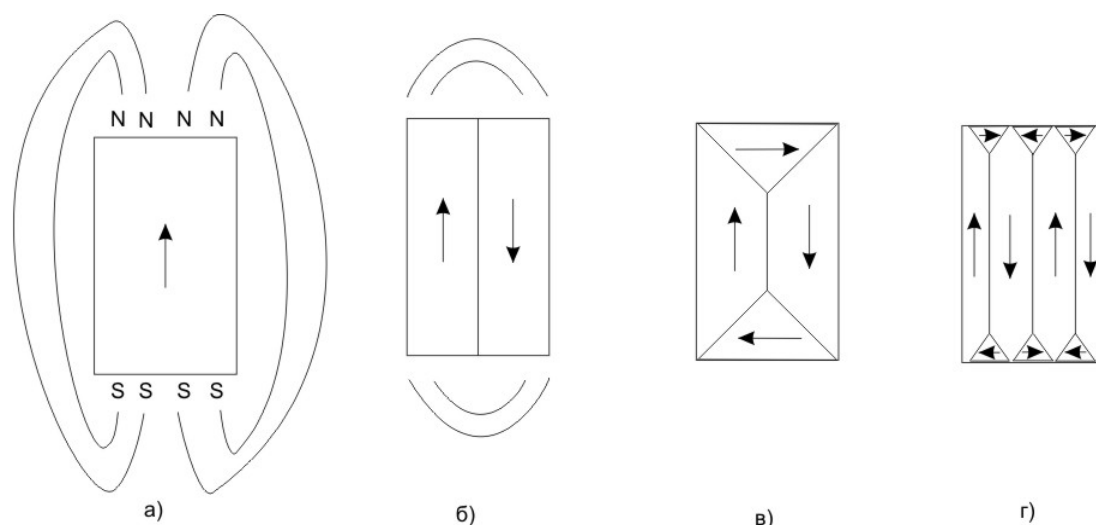


Рисунок 5.3 – Схемы доменных структур ферромагнетиков

Однодоменное состояние энергетически невыгодно, т.к. на концах ФМ возникают магнитные полюса, создающие внешнее магнитное поле, которое обладает потенциальной энергией (рисунок 5.3, *а*). Однодоменную структуру рассматривают как совокупность магнитов, соприкасающихся одноименными полюсами.

Если кристалл состоит из двух доменов с противоположной ориентацией магнитных моментов, то он обладает меньшей магнитостатической энергией (рисунок 5.3, *б*).

Еще более выгодной является структура с боковыми, замыкающими доменами (рисунки 5.3, *в* и *г*), когда магнитный поток замыкается внутри образца (за пределами поле равно нулю).

Деление на домены ФМ ограничивается увеличением энергии доменных границ, т.к. для её образования необходимо совершить работу против обменных сил и сил магнитной кристаллографической анизотропии. Наиболее устойчивым является такое состояние ФМ, в котором уменьшение магнитостатической энергии, из-за разбиения на домены,

компенсируется увеличением энергии доменных границ.

Кристаллы ФМ малых размеров могут состоять из одного домена (образование границы энергетически невыгодно). Иллюстрацией этому служит намагничивание опилок при обработке ферромагнетика.

5.4. Процессы при намагничивании ферромагнетиков

Магнитная анизотропия. В монокристаллах ФМ существуют направления легкого и трудного намагничивания. Число таких направлений определяется симметрией кристаллической решетки. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты доменов самопроизвольно ориентируются вдоль одной из осей легкого намагничивания.

Рассмотрим образование направлений легкого, среднего и трудного намагничивания в монокристаллах ФМ (рисунок 5.4).

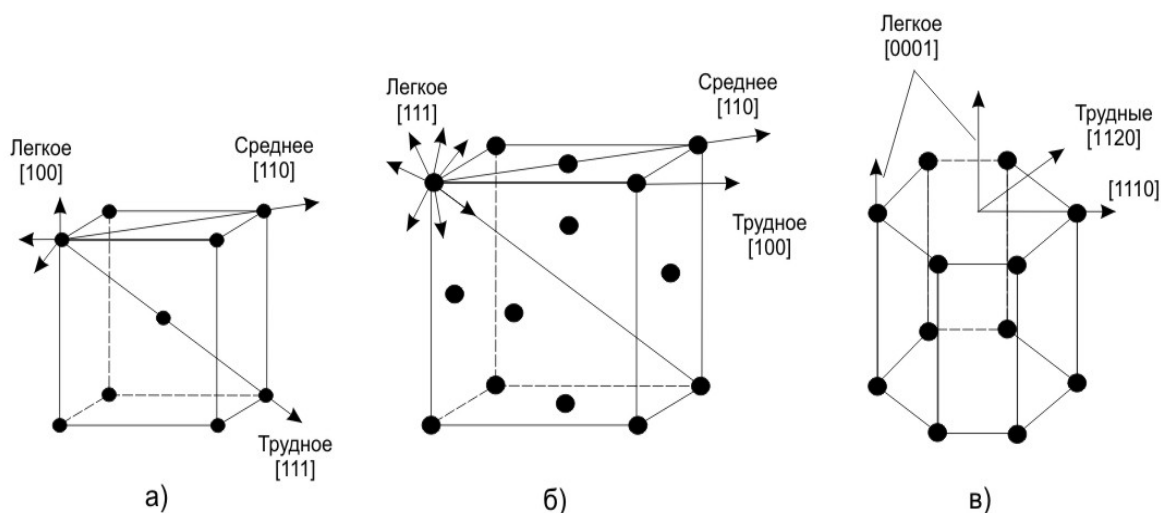


Рисунок 5.4 – Схемы монокристаллов железа (а), никеля (б) и кобальта (в) с направлениями легкого, среднего и трудного намагничивания

Элементарная ячейка железа (Fe) является объемно-центрированным кубом (ОЦК), где направление легкого намагничивания совпадает с ребром куба (рисунок 5.4,а).

В монокристалле Fe можно выделить шесть эквивалентных направлений легкого намагничивания, где направление пространственной диагонали куба - направление трудного намагничивания.

У никеля (Ni) имеющего структуру гранцентрированного куба (ГЦК), наоборот, является направлением легкого намагничивания (рисунок 5.4,б), а симметрия решетки определяет восемь эквивалентных направлений.

Кобальт (Co) (гексагональная структура) имеет два направления

легкого намагничивания, совпадающих с осью призмы (одноосная магнитная анизотропия).

Для намагничивания ФМ до насыщения вдоль оси легкого намагничивания нужно затратить значительно меньшую энергию, чем для такого же намагничивания вдоль оси трудного намагничивания (рисунок 5.4,в).

Энергию, затрачиваемую внешним магнитным полем на поворот вектора намагниченности ФМ из направления легкого намагничивания в направление трудного намагничивания, называют энергией естественной магнитной кристаллографической анизотропии.

Кривая намагничивания - зависимость магнитной индукции макроскопического объема ФМ от напряженности внешнего магнитного поля. Размагничивание ФМ выполняют переменным магнитным полем (амплитуду напряженности уменьшают до нуля).

Рассмотрим кривую намагничивания ФМ (рисунок 5.5).

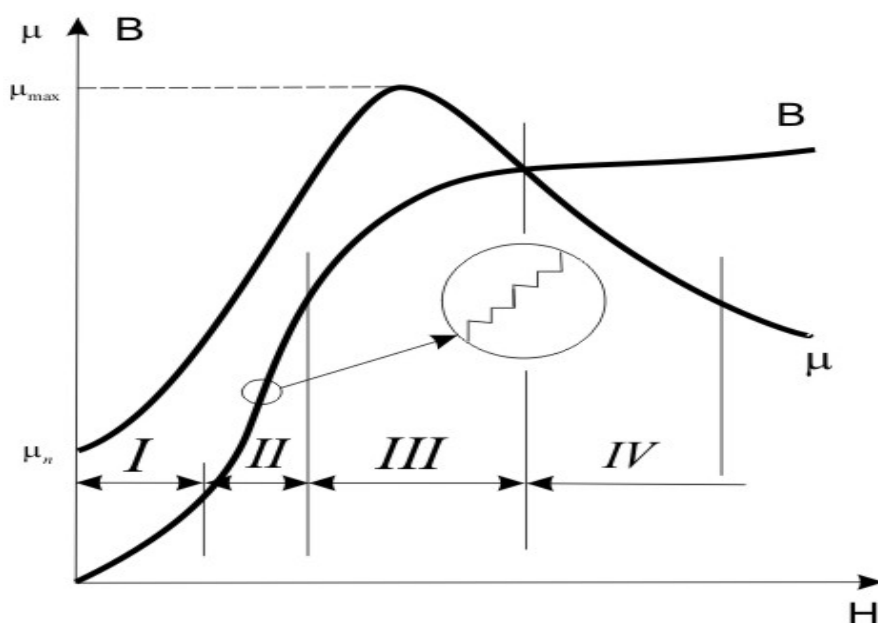


Рисунок 5.5 – Зависимости магнитной индукции и проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля

Возрастание индукции ФМ под действием внешнего поля обусловлено двумя основными процессами: смещением доменных границ и поворотом магнитных моментов доменов. Начальному участку кривой (*область I*) соответствует обратимое (упругое) смещение доменных границ с увеличением объема тех доменов, магнитные моменты которых образуют наименьший угол с направлением внешнего поля.

После снятия поля доменные границы возвращаются в прежнее положение; остаточная намагниченность в ФМ не возникает. В области

сильных полей (*область II*) смещение доменных границ носит необратимый (скачкообразный) характер. На этом участке кривая намагничивания имеет наибольшую крутизну.

По мере дальнейшего увеличения напряженности H возрастает роль второго механизма намагничивания - механизма вращения. Магнитные моменты доменов из направления легкого намагничивания, поворачиваются в направлении более трудного намагничивания (*область III*). Когда все магнитные моменты доменов ориентируются вдоль поля, наступает техническое насыщение намагниченности (*область IV*).

Рассмотрим условные схемы стадий технического намагничивания ФМ (рисунок 5.6).

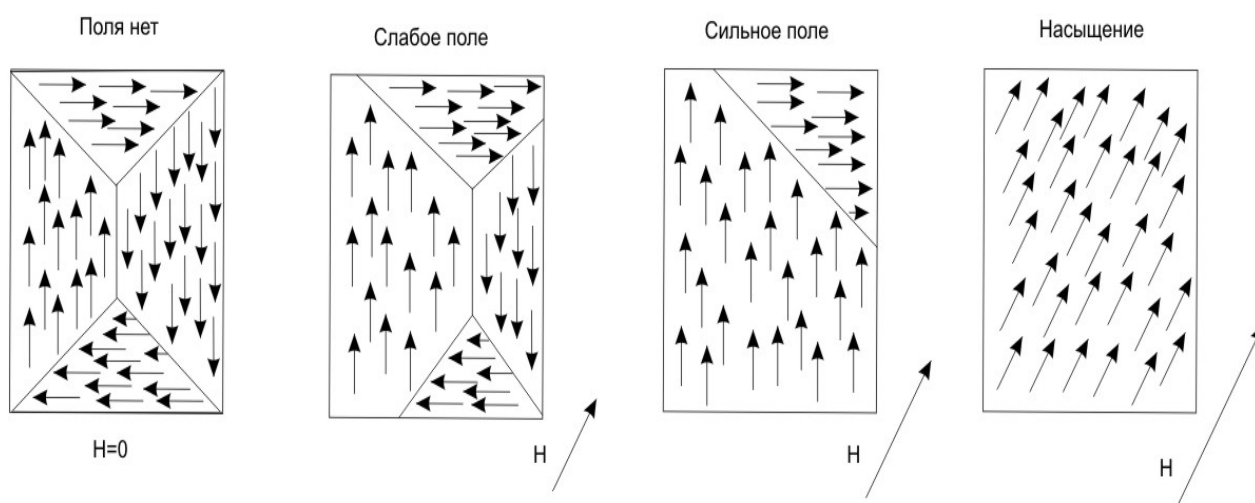


Рисунок 5.6 – Схемы ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика

Техническое намагничивание ФМ - возрастание индукции за счет процессов смещения доменных границ и вращения магнитных моментов. Зависимость магнитной индукции предварительно размагниченого ФМ от напряженности магнитного поля называют начальной (нулевой) кривой намагничивания.

Магнитный гистерезис. Если ФМ намагнитить до индукции насыщения (B_s), а затем отключить внешнее поле ($H = 0$), то индукция в нуль не обратится, а примет значение остаточной индукции (B_r) (рисунок 5.7).

Напряженность размагничивающего поля ($-H_c$), при которой индукция ФМ, предварительно намагниченом до насыщения, обращается в нуль, называют коэрцитивной силой (B_r). Увеличение напряженности H до значений, больше чем ($-H_c$), приводит к перемагничиванию и насыщению ФМ при индукции ($-B_s$).

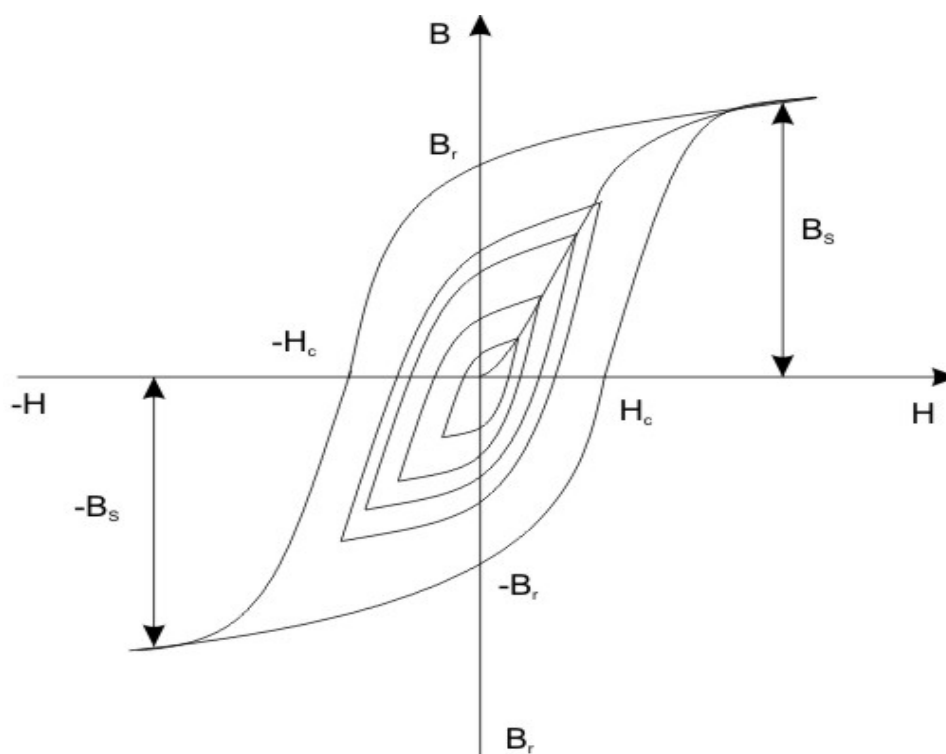


Рисунок 5.7 – Основная кривая намагничивания и петли гистерезиса ферромагнетика при различных значениях амплитуды магнитного поля

Таким образом, изменение магнитного состояния ФМ при его циклическом перемагничивании характеризуется явлением *гистерезиса* (отставание индукции от напряженности поля). Магнитный гистерезис обусловлен необратимыми процессами намагничивания ФМ.

Для различных амплитудных значений напряженности H можно получить семейство петель гистерезиса (при индукции насыщения B_s – предельная), когда при дальнейшем возрастании напряженности H площадь петли постоянна.

Остаточная индукция (B_r) и коэрцитивная сила (H_c), являются параметрами предельной петли гистерезиса, а совокупность вершин петель гистерезиса образует основную кривую намагничивания ФМ (для магнитомягких материалов не отличается от начальной кривой).

Магнитная проницаемость. Из кривой намагничивания ФМ можно построить зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Статическая магнитная проницаемость:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5.7)$$

пропорциональна тангенсу угла наклона секущей, проведенной из начала координат через точку на основной кривой намагничивания.

Зависимость $\mu(H)$ показана на рисунке 5.5. Восходящий участок этой кривой обусловлен сильными изменениями намагниченности J_M при небольшом увеличении напряженности H за счет необратимых процессов намагничивания ФМ. Дальнейшее уменьшение проницаемости μ в области более сильных магнитных полей объясняется насыщением намагниченности J_M .

Характеристика $\mu(H)$ имеет важное значение для применения магнитных материалов в электроустановках. В области обратимого намагничивания ФМ проницаемость:

$$\mu = \mu_H + \beta H, \quad (5.8)$$

где μ_H - начальная магнитная проницаемость; β - постоянная, зависящая от природы материала.

ФМ часто используется при одновременном воздействии сильного постоянного и слабого переменного магнитных полей. Изменение магнитного состояния ФМ в этих условиях характеризуется небольшой частной петлей гистерезиса (рисунок 5.7).

Магнитострикция (МС). При намагничивании наблюдается явление изменения линейных размеров и формы ФМ (явление МС). Различают спонтанную и линейную МС. Спонтанная МС возникает при переходе вещества из парамагнитного в ферромагнитное состояние (при охлаждении до температуры ниже точки Кюри). Линейная (индуцированная) МС связана с искажением кристаллической решетки под действием внешнего магнитного поля.

Линейную МС оценивают значением относительной деформации ФМ в направлении магнитного поля:

$$\lambda = \Delta l / l. \quad (5.9)$$

Относительную МС деформацию, возникающую при магнитном насыщении ФМ, называют константой магнитострикции (λ_s). Изменение размеров ФМ при намагничивании сопровождается появлением в нем внутренних напряжений и деформаций, которые препятствуют смещению доменных границ.

Таким образом, МС затрудняет процесс намагничивания ФМ в слабых полях. Высокой проницаемостью μ обладают те магнитные материалы, у которых малы константы анизотропии и магнитострикции. Константа МС уменьшается при нагревании ФМ и обращается в нуль при температуре перехода вещества в парамагнитное состояние (точка Кюри).

5.5. Влияние температуры на магнитные свойства ферромагнетиков

При нагревании ФМ ослабляется обменное взаимодействие, что приводит к постепенной тепловой дезориентации спиновых магнитных моментов и уменьшению спонтанной намагниченности. Выше некоторой температуры происходит распад доменной структуры, т.е. спонтанная намагниченность исчезает и ФМ переходит в парамагнитное состояние.

Температуру такого фазового перехода называют магнитной точкой Кюри (T_K). Вблизи точки Кюри наблюдается изменения немагнитных свойств ФМ: удельного сопротивления, удельной теплоемкости, температурного коэффициента линейного расширения и др.

Рассмотрим температурные зависимости намагниченности насыщения (J_{MS}) и магнитной восприимчивости (k_M) ФМ (рисунок 5.8).

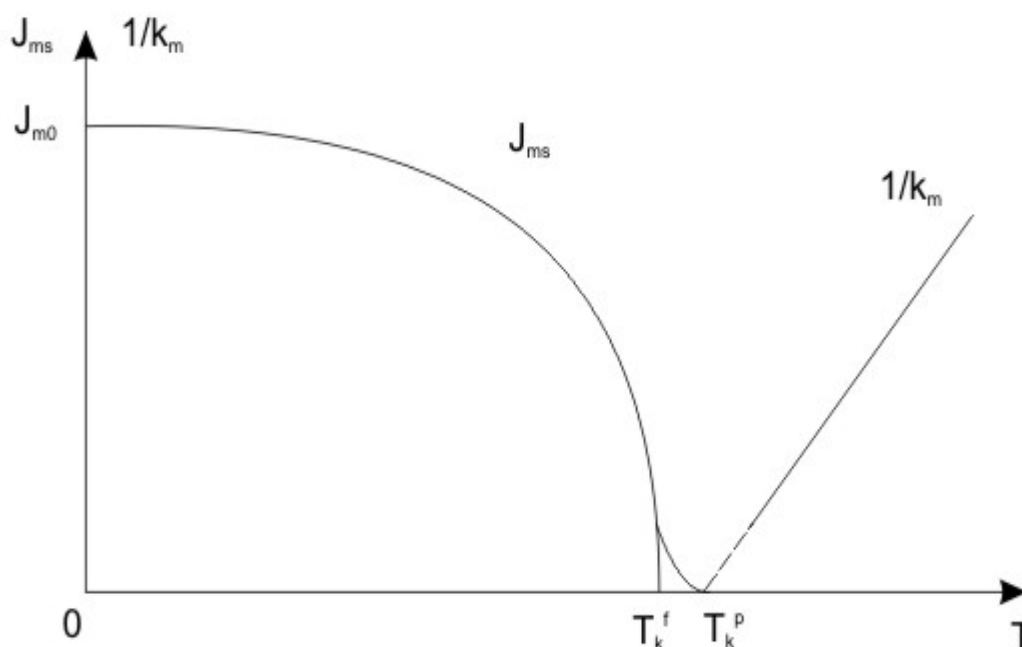


Рисунок 5.8 – Зависимость намагниченности насыщения и магнитной восприимчивости ферромагнетиков от температуры

Точку Кюри определяют на участке пересечения линейного продолжения наиболее крутого спада кривой намагниченности с осью температур. При температуре T_K проницаемость $k_M \approx 1,0$, а выше подчиняется закону Кюри:

$$k_M = \frac{C}{T - T_K}, \quad (5.10)$$

где C - постоянная Кюри.

Температурная зависимость магнитной проницаемости ФМ неодинакова для проницаемости μ , измеренной в слабых и сильных полях. Так для проницаемости μ_H наблюдается отчетливый максимум при температуре ниже точки Кюри, а температурная зависимость проницаемости μ , соответствующая области насыщения, повторяет температурное изменение намагниченности насыщения (J_{MS}).

5.6. Поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях

Магнитные потери. Перемагничивание ФМ в переменных полях сопровождается потерями энергии, вызывающими нагрев материала. Потери на перемагничивание складываются из потерь на гистерезис, на вихревые токи и магнитное последствие.

Потери на гистерезис (\mathcal{E}_H) за один цикл перемагничивания, отнесенные к единице объема ФМ, определяются площадью статической петли гистерезиса. Потери, обусловленные необратимыми процессами перемагничивания, определяют по формуле (Дж/м³):

$$\mathcal{E}_H = \eta \cdot B_m^n, \quad (5.11)$$

где η - коэффициент, зависящий от свойств ФМ; B_m - максимальная индукция; n - показатель степени (значения 1,6...2,0 в зависимости от индукции B_m).

Вихревые токи возникают за счет э.д.с. самоиндукции, пропорциональной скорости изменения магнитного потока. Рассмотрим отличие статических петель гистерезиса от динамических. Если статические петли характеризуют лишь потери на гистерезис, то динамические включают суммарные потери на гистерезис и вихревые токи.

При этом потери \mathcal{E}_H за один период изменения внешнего поля остаются постоянными в широком диапазоне частот, а потери на вихревые токи (\mathcal{E}_T) возрастают пропорционально частоте (рисунок 5.9).

Оценим вклад каждого механизма в общую сумму потерь на перемагничивание (\mathcal{E}_H) за один период. Важной характеристикой является активная мощность, выделяющаяся в ФМ при его перемагничивании.

Активная мощность, обусловленная потерями на вихревые токи в материале:

$$P_T = \mathcal{E}_T \cdot f \cdot V = \xi \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot V, \quad (5.12)$$

где V - объем; ξ - коэффициент, пропорциональный удельной проводимости и зависящий от формы и размеров поперечного сечения ФМ.

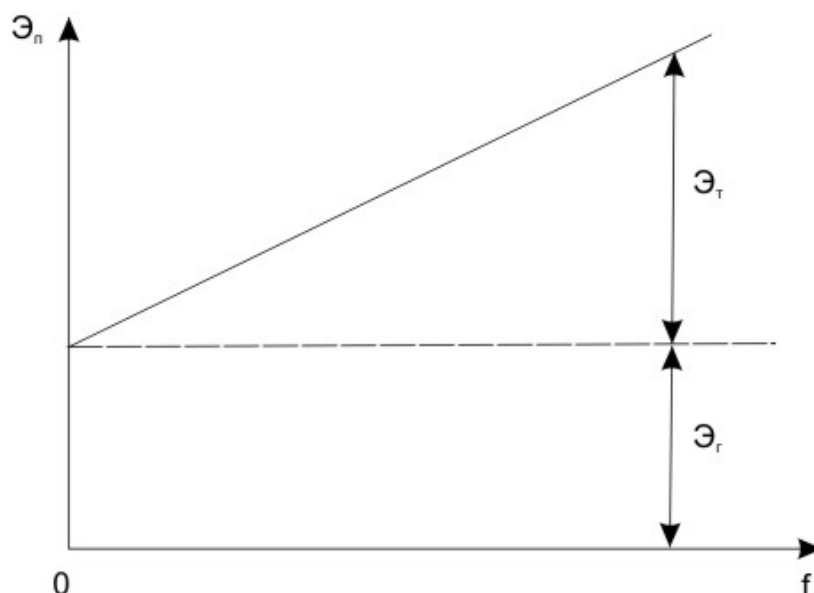


Рисунок 5.9 – Зависимость потерь на перемагничивание ферромагнетика от частоты за один период изменения поля

Активная мощность потерь на гистерезис:

$$P_{\Gamma} = \eta \cdot B_m^n \cdot f \cdot V. \quad (5.13)$$

Вихревые токи всегда возникают в плоскости, расположенной перпендикулярно магнитному полю (рисунок 5.10, *a*).

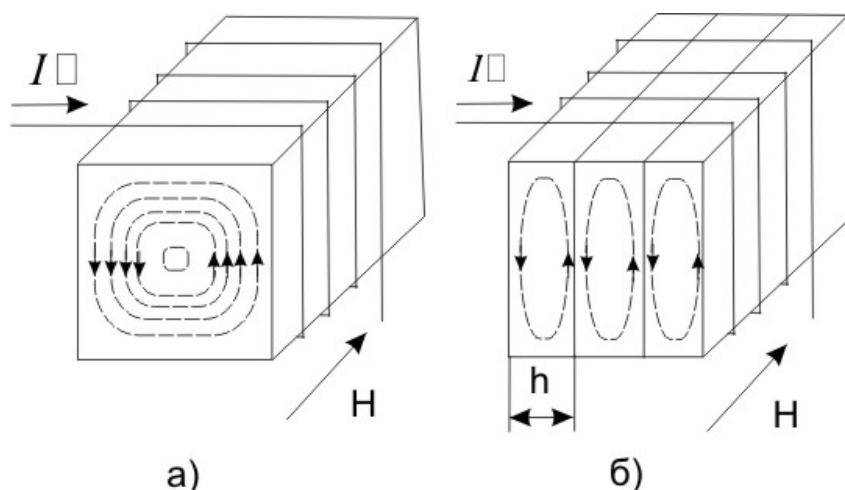


Рисунок 5.10 – Схемы распределения вихревых токов в поперечных сечениях сплошного (*a*) и сборного (*б*) сердечника ферромагнетика

Для уменьшения потерь на вихревые токи необходимо использовать магнитный материал с повышенным удельным сопротивлением, либо собирать сердечник из тонких листов, изолированных друг от друга. В случае сборного сердечника плоскости листов направляют вдоль линий магнитной индукции (рисунок 5.10, *б*).

Потери на магнитное последствие ($\mathcal{E}_{МП}$) обусловлены отставанием магнитной индукции от изменения напряженности магнитного поля. Одной из основных причин магнитного последствия является тепловая энергия, которая помогает слабо закрепленным доменным границам преодолевать энергетические барьеры, мешающие их свободному смещению при изменении поля. Рассмотренное явление называют магнитной вязкостью. Физическая природа потерь $\mathcal{E}_{МП}$ аналогична релаксационной поляризации диэлектриков.

Поверхностный эффект. В соответствии с законом Ленца вихревые токи, индуцируемые в ФМ, стремятся воспрепятствовать тем изменениям, которые их вызывают. Поэтому собственное поле вихревых токов всегда стремится ослабить изменение основного магнитного потока (оказывают размагничивающее действие на ФМ), что проявляется в уменьшении индукции и эффективной магнитной проницаемости.

Из распределения вихревых токов в поперечном сечении сердечника (рисунок 67,а) вытекает, что размагничивающее действие вихревых токов неодинаково в различных частях сечения ФМ и наиболее резко выражено в центральных его частях, т.к. тело охватывается наибольшим числом контуров вихревых токов.

В центре сечения ФМ магнитодвижущая сила (м.д.с.), обусловленная вихревыми токами, равна сумме м.д.с., создаваемых всеми контурами вихревых токов, а на поверхности сердечника м.д.с. равна нулю. Поэтому переменный магнитный поток (Φ) неравномерно распределяется по сечению магнитопровода, а индукция B имеет наименьшее значение в центральных частях сечения, т. е. вихревые токи экранируют центральный объем сердечника от проникновения в него магнитного тока.

Вытеснение магнитного поля на поверхность проявляется тем сильнее, чем больше частота его изменения. Затухание электромагнитной волны при ее распространении в проводящей среде используется при создании защитных электромагнитных экранов (служат для защиты схем автоматики электроэнергетического оборудования от внешних наводок).

Для эффективной защиты толщина стенок экрана должна превышать глубину проникновения электромагнитного поля в вещество. На высоких частотах непроницаемыми являются экраны из хорошо проводящих металлов (медь, латунь, алюминий).

Однако на низких частотах такие экраны неэффективны, поскольку необходимы очень толстые стенки (у меди при частоте поля 50 Гц глубина проникновения около 1 см) и лучше использовать экраны из ФМ (из пермаллоя обладающего высокой магнитной проницаемостью).

5.7. Магнитные материалы электроэнергетического оборудования

Применяемые в электроэнергетическом оборудовании магнитные материалы подразделяют на две основные группы: магнитомягкие и магнитотвердые. В отдельную группу выделяют материалы специализированного назначения.

Магнитомягкие (ММ) - материалы с малой коэрцитивной силой (H_C) и высокой магнитной проницаемостью (μ_r). ММ вещества характеризуются способностью намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях, узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание.

ММ материалы используются как магнитопроводы: сердечников дросселей, трансформаторов, электрических машин, магнитных систем электроизмерительных приборов и т.п.

Магнитотвердыми (МТ) называют материалы с большой силой H_C , которые перемагничиваются в сильных магнитных полях и служат для изготовления постоянных магнитов. Магнитомягкими считают материалы, у которых сила $H_C < 800 \text{ А/м}$, а магнитотвердыми - с силой $H_C > 4 \text{ кА/м}$.

У лучших ММ материалов сила H_C может составлять менее 1 А/м , а у МТ материалов - превышать 500 кА/м .

Из специализированных, выделим материалы с прямоугольной петлей гистерезиса и магнитострикционные.

Магнитомягкие материалы. Кроме высокой проницаемости μ_r и малой силы H_C ММ материалы должны обладать большой индукцией насыщения (пропускать максимальный магнитный поток через единицу площади поперечного сечения магнитопровода), что позволяет минимизировать габаритные размеры и массу магнитной системы электроэнергетического оборудования.

ММ материалы, используемые в переменных полях, должны иметь минимальные потери на перемагничивание (складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи).

Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах применяют ММ материалы с повышенным удельным сопротивлением. Магнитопроводы собирают из отдельных изолированных друг от друга тонких листов, а также из ленточных сердечников.

Листовые и ленточные ММ материалы должны обладать пластичностью и стабильностью свойств, как во времени, так и по отношению к внешним воздействиям, таким как температура и механические напряжения. Наибольшим изменениям, в процессе эксплуатации ММ материалов, подвержены магнитная проницаемость (особенно в слабых полях) и коэрцитивная сила.

Железо и низкоуглеродистые стали. Основным компонентом ММ материалов является железо (магнитные свойства зависят от содержания примесей). Среди элементарных ферромагнетиков железо обладает индукцией $B_S \approx 2,2$ Тл. Особо чистое железо (электролитическое, карбонильное) содержит примесей менее 0,05%.

Карбонильное железо является мелким порошком (удобно для изготовления прессованных сердечников), в нём отсутствуют кремний, фосфор и сера, но содержится углерод. Примеси слабо влияют на магнитные свойства железа, если их концентрация ниже предела растворимости. Низким пределом растворимости в железе обладают углерод, кислород, азот и сера (наиболее вредные). Свойства железа зависят не только от содержания примесей, но и от структуры материала, размера зерен, наличия механических напряжений.

Технически чистое железо содержит небольшое количество примесей (углерод, сера, марганец, кремний и др.), ухудшающих его магнитные свойства, но из-за низкого удельного сопротивления его используют редко (изготовление магнитопроводов постоянного магнитного потока).

Магнитные свойства различных видов железа электроэнергетического оборудования приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Свойства ферромагнитных материалов

№	Материал	Проницаемость $\mu_{r_{НАЧ}} / \mu_{r_{МАКС}}$	Сила H_C , А/м	Индукция B_S , Тл	Сопротивление ρ , мкОм·м
1	Технически чистое железо	400/4500	100	2,18	0,1
2	Электролитическое железо	600/15000	30	2,18	0,1
3	Карбонильное железо	3000/22000	6,4	2,18	0,1
4	Электротехническая сталь	600/8000	65	2,02	0,6
5	Низконикелевый пермаллой	4000/60000	32	1,61	0,9
6	Высоконикелевые пермаллои	100000/300000	5,0	1,05	0,85
7	Суперпермаллой	100000/1500000	0,3	0,81	0,6

Электротехническая тонколистовая сталь (ЭТС) является основным ММ материалом. Введением в состав стали кремния, достигается повышение удельного сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи. Промышленные марки ЭТС содержат не более 5% кремния, т.к. он ухудшает механические свойства, придает, стали хрупкость и ломкость (непригодна для штамповки).

Кроме того, при введении кремния в сталь уменьшается индукция насыщения (немагнитный компонент), но легирование кремнием повышает стабильность её магнитных свойств.

Свойства ЭТС улучшаются за счет образования магнитной текстуры при холодной прокатке и последующего отжига в водороде. Текстурированная сталь анизотропна по свойствам, т.к. вдоль направления прокатки более высокая магнитная проницаемость и меньшие потери на гистерезис. Объясняется это тем, что намагничивание ЭТС вдоль направления прокатки происходит за счет смещения доменных границ, а вращение магнитных моментов выражено слабо.

Рассмотрим кривые намагничивания текстурированной ЭТС под различными углами относительно направления прокатки (рисунок 5.11).

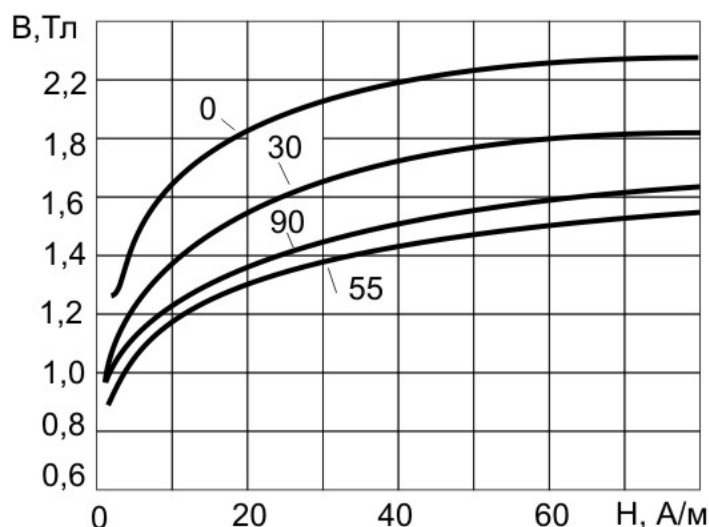


Рисунок 5.11 – Кривые намагничивания холоднокатаной кремнистой стали под различными углами к направлению прокатки

Наихудшие свойства ЭТС при намагничивании под углом 55° к направлению прокатки. В случае ребровой текстуры угол 55° соответствует направлению наиболее трудного намагничивания.

Эффективное использование текстурированных ЭТС возможно в таком магнитопроводе, когда поток целиком проходит вдоль направления легкого намагничивания (ленточные сердечники).

Сталь выпускается в виде рулонов, листов и ленты (без электроизоляционного покрытия и с ним), где толщина листов (0,05...1,0)мм и предназначена для изготовления магнитных цепей ЭУ (аппаратов, трансформаторов, приборов, машин и др.).

Использование ленточных сердечников (текстурированная сталь) в трансформаторах (50Гц) позволяет уменьшить их массогабаритные показатели на (30...35)%, а листы тонкого проката предназначены для использования при повышенной частоте (до 1кГц).

С уменьшением толщины листов ЭТС сердечника трансформатора уменьшаются потери на вихревые токи (рисунок 5.12).

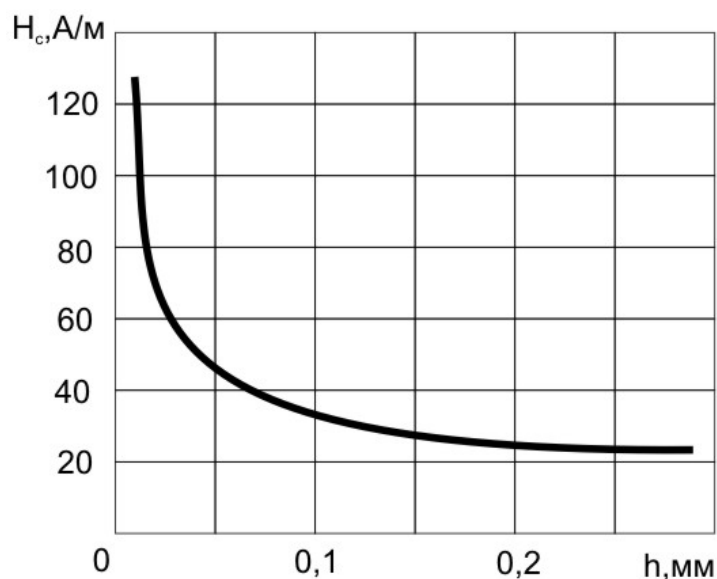


Рисунок 5.12 – Зависимость коэрцитивной силы от толщины листов электротехнической стали

В тонких листах происходит резкое возрастание коэрцитивной силы и потерь на гистерезис (параметры ЭТС даны в таблице 5.1). Применение в ЭУ листовых и ленточных сердечников из ЭТС на частотах выше 1кГц возможно при ограничении магнитной индукции (суммарные потери не должны превышать допустимого предела).

Низкокоэрцитивные сплавы. Пермаллои - железоникелевые сплавы (ЖНС), обладающие большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и маленькой коэрцитивной силой. ЖНС подразделяют на высоконикелевые (72...80 Ni)% никеля) и низконикелевые (40...50 Ni)%.

Рассмотрим изменение магнитных свойств и удельного сопротивления нелегированных ЖНС в зависимости от состава сплава (рисунок 70). Наибольшие начальная и максимальная магнитная проницаемость у ЖНС, содержащего 78,5% Ni. Легкое намагничивание ЖНС в слабых полях объяс-

няется отсутствием в сплаве магнитной анизотропии и явления магнитострикции. Из-за слабой анизотропии ЖНС облегчается поворот магнитных моментов из направления легкого намагничивания в направление поля, а благодаря отсутствию магнитострикции при намагничивании не возникает механических напряжений в сплаве, затрудняющих смещение доменных границ под действием слабого поля. Магнитные свойства ЖНС чувствительны к внешним механическим напряжениям, зависят от химического состава и наличия инородных примесей.

Индукция насыщения высоконикелевых ЖНС почти в 2 раза ниже, чем ЭТС, и в 1,5 раза ниже, чем у низконикелевых пермаллоев. Магнитные проницаемости высоконикелевых ЖНС в несколько раз выше, чем у низконикелевых пермаллоев, и намного превосходит проницаемости ЭТС.

Удельное сопротивление высоконикелевые ЖНС в 3 раза меньше, чем у низконикелевых пермаллоев. Магнитная проницаемость ЖНС снижается с увеличением частоты (тем резче, чем больше ее первоначальное значение).

Это объясняется возникновением в ЖНС вихревых токов из-за их небольшого удельного сопротивления (рисунок 5.13).

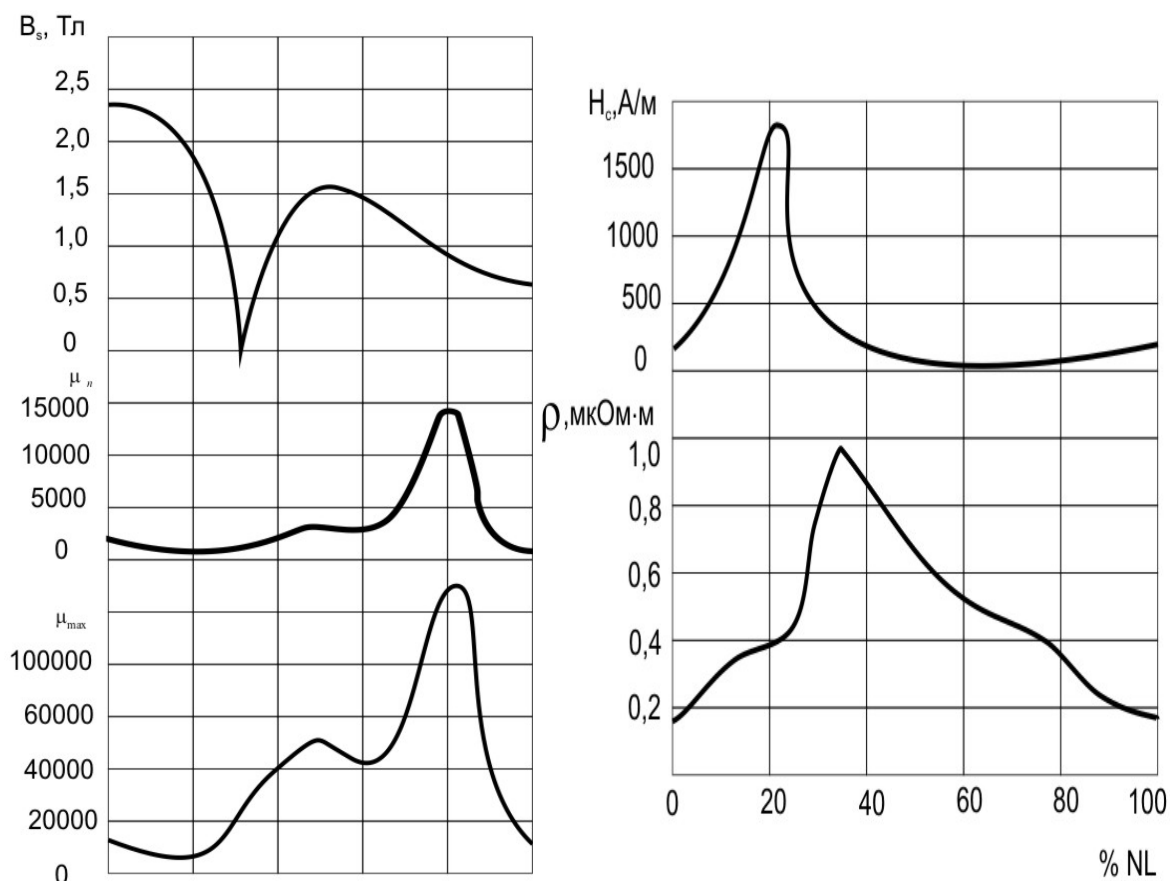


Рисунок 5.13 – Зависимости магнитных и электрических параметров ЖНС от содержания никеля

Стоимость пермаллоев определяется содержанием в их составе никеля. Для придания сплавам необходимых свойств в состав ЖНС вводят ряд добавок. Медь увеличивает постоянство магнитной проницаемости в узких интервалах напряженности магнитного поля, повышает температурную стабильность и удельное сопротивление, а также делает сплавы легко поддающимися механической обработке. Кремний и марганец только увеличивают удельное сопротивление пермаллоев.

Низконикелевые сплавы 45Н и 50Н применяют для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле и деталей магнитных цепей. Из сплава 50НХС выполняют сердечники импульсных трансформаторов.

Сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД используют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов и реле, а при толщине 0,02мм - сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей и бесконтактных реле. В марках пермаллоев буква Н означает никель, М - марганец, Х - хром, С - кремний, Д – медь. Цифра в марке указывает процентное содержание никеля. Кроме перечисленных ЖНС применяют сплав - супермаллой с очень высокими магнитными свойствами в слабых полях (таблица 5.1).

Альсиферы - тройные сплавы железа (Fe) с кремнием (Si) и алюминием (Al), его состав $Al\ 5,6\%;\ 9,5\%\ Si$ и $84,9\%\ Fe$. Альсифер отличается твердостью и хрупкостью, а свойства не уступают свойствам высоконикелевых пермаллоев.

Магнитомягкие высокочастотные (МВ) материалы – вещества электроустановок, которые выполняют функции магнетиков при частотах выше нескольких сотен герц. По физической природе и строению МВ материалы подразделяют на ферриты и магнитоэлектрики.

Ферриты представляют собой оксидные МВ материалы, у которых спонтанная намагниченность доменов обусловлена некомпенсированным антиферромагнетизмом. Большое удельное сопротивление и малые потери энергии в области повышенных частот наряду с хорошими магнитными свойствами обеспечивают МВ применение в схемах автоматики электроэнергетического оборудования.

При изготовлении ферритовой керамики в качестве исходного сырья используют окислы соответствующих металлов. В отличие от керамики ферритовая керамика не содержит стекловидной фазы. Формование изделий осуществляют методом прессования в стальных пресс-формах.

Высокой производительностью формовки отличается также метод горячего литья под давлением. За счет процесса рекристаллизации МВ материал приобретает определенную зерновую структуру, которая существенно влияет на магнитные свойства керамики. Ферриты являются твердыми и хрупкими материалами, не позволяющими производить обработку резанием и допускающими только шлифовку и полировку.

Высокопроницаемые ферриты. В качестве МВ материалов применяют никель-цинковые и марганец-цинковые ферриты. Для ферритов, используемых в переменных полях, кроме начальной магнитной проницаемости важной характеристикой является тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$). Из-за низкой проводимости составляющая потерь на вихревые токи в ферритах отсутствует.

В слабых магнитных полях малы и потери на гистерезис. Поэтому значение параметра $tg\delta$ в ферритах на высоких частотах определяют магнитные потери, обусловленные релаксационными и резонансными явлениями. Магнитные свойства ферритов зависят от механических напряжений, которые возникают при установке обмоток, креплении изделий (надо оберегать от механических нагрузок).

По электрическим свойствам ферриты относятся к классу полупроводников, а их электропроводность обусловлена процессами электронного обмена между ионами переменной валентности. Электроны, участвующие в обмене, рассматривают как носители заряда, концентрация которых практически не зависит от температуры. Однако при повышении температуры увеличивается вероятность перескока электронов между ионами переменной валентности (возрастает подвижность носителей заряда).

Установлено, что присутствие в ферритах заданного количества ионов двухвалентного железа приводит к ослаблению анизотропии и магнитоstriction (хорошо отражается на значении начальной магнитной проницаемости). Отсюда вытекает закономерность: ферриты с высокой магнитной проницаемостью обладают невысоким удельным сопротивлением.

Для ферритов характерна большая диэлектрическая проницаемость, которая зависит от частоты и состава МВ материала. С повышением частоты диэлектрическая проницаемость ферритов падает.

Большое влияние на поляризационные свойства ферритов оказывают ионы переменной валентности (с ростом концентрации растет диэлектрическая проницаемость).

В слабых полях ферриты с начальной магнитной проницаемостью (400...20000) заменяют пермаллой и электротехническую сталь. В средних и сильных магнитных полях замена листовых ферромагнетиков ферритами нецелесообразна, поскольку у них меньше индукция насыщения.

Ферриты применяют в качестве сердечников контурных катушек постоянной и переменной индуктивностей, сердечников импульсных трансформаторов, магнитных модуляторов и усилителей.

Монокристаллы ферритов используют при изготовлении магнитных головок записи и воспроизведении сигналов в магнитофонах, т.к. они обладают высоким удельным сопротивлением (важно для уменьшения потерь) и большой твердостью.

Магнитодиэлектрики (МД) должны иметь малые потери и отличаться стабильностью магнитной проницаемости во времени и при колебаниях температуры.

Суммарные потери мощности в МД определяются потерями на гистерезис (P_H), последствие (P_{II}), вихревые токи (P_B) и диэлектрическими потерями (P_D):

$$P_A = P_H + P_{II} + P_B + P_D. \quad (5.14)$$

Потери P_A вызывают увеличение активного сопротивления индуктивной катушки с сердечником из МД и зависят от размеров частиц порошка ферромагнетика и характера изоляции между зёрнами. Для уменьшения потерь P_B необходимо применять более мелкий порошок ферромагнетика с тщательной изоляцией отдельных зёрен.

МД характеризуются невысокой магнитной проницаемостью (меньше магнитной проницаемости монолитных ферромагнетиков), что объясняется двумя причинами: разобщенностью ферромагнитных частиц на концах (при намагничивании возникают свободные полюсы, создающие внутреннее поле, направленное навстречу внешнему полю) и тем, что в пределах малой частицы энергетически невыгодно образование много доменной структуры (слабо выражен механизм намагничивания за счет смещения доменных границ).

МД имеют близкую к линейной зависимость индукции от напряженности внешнего магнитного поля, из-за сильного влияния внутреннего размагничивающего фактора (рисунок 5.14). Магнитная проницаемость МД неуправляема внешним магнитным полем.

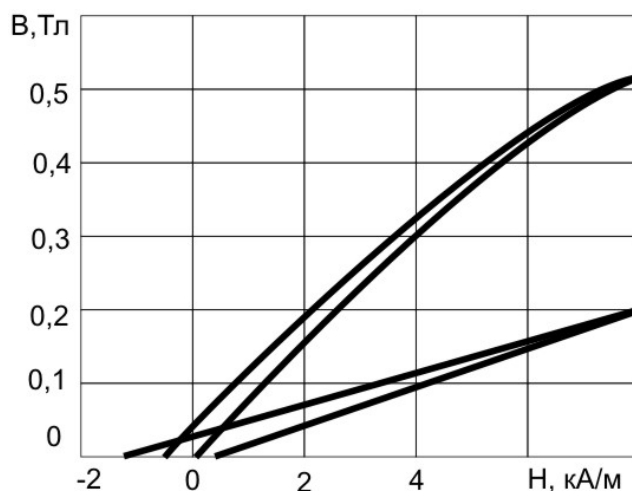


Рисунок 5.14 – Кривые намагничивания и размагничивания альсифера (1) и молибденового пермаллоя (2)

Прессованные МД сердечники применяют в индуктивных катушках фильтров, генераторов и т. д. Катушки имеют малый объем при высокой индуктивности и обладают большой добротностью. Введение сердечника в катушку увеличивает ее индуктивность быстрее, чем растет активное сопротивление и добротность изделия повышается.

Наглядное представление о различии в магнитных свойствах МД и высокочастотных ферритов дает рисунок 5.15.

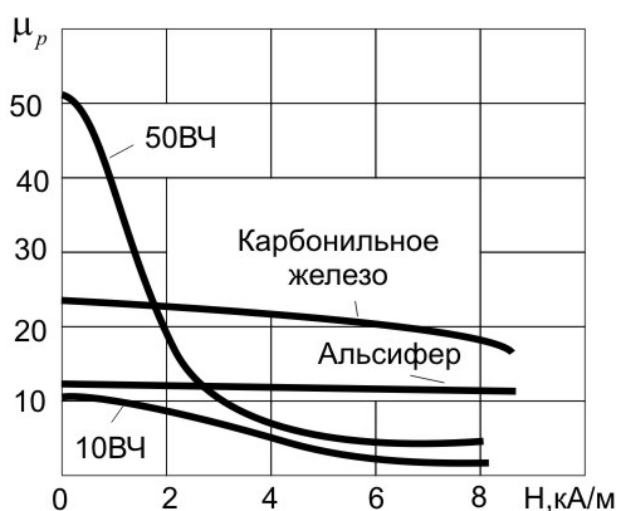


Рисунок 5.15 – Зависимость магнитной проницаемости от напряженности подмагничивающего поля для МД и ферритов

Сердечники на основе карбонильного железа отличаются высокой стабильностью, малыми потерями, положительным температурным коэффициентом магнитной проницаемости и используются в широком диапазоне частот. Материал на основе альсифера, помимо хороших магнитных свойств, отличается от других сплавов невысокой стоимостью и не дефицитностью сырья.

Особенность ЖНС в том, что в зависимости от содержания кремния и алюминия его температурный коэффициент магнитной проницаемости может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Меняя компоненты можно создать сердечники с термостабильными свойствами.

МД на основе молибденового пермаллоя имеют большую начальную магнитную проницаемость. Потери на гистерезис и вихревые токи у ЖНС меньше, чем у сердечников из альсифера, а стабильность параметров выше. Пермаллои пластичны и плохо размалываются в порошок.

Верхний предел рабочих температур ЖНС достигает $(100 \dots 120)^\circ\text{C}$, а временное изменение начальной магнитной проницаемости $(0,1 \dots 2,0)\%$ в год. Высокая стабильность магнитных свойств является преимуществом МД перед другими магнитомягкими материалами.

Магнитотвердые материалы (МТ) - материалы с высокой коэрцитивной силой и большой площадью петли гистерезиса. По применению их делят на материалы для постоянных магнитов и записи.

Рассмотрим схему и характеристики магнита (рисунок 5.16).

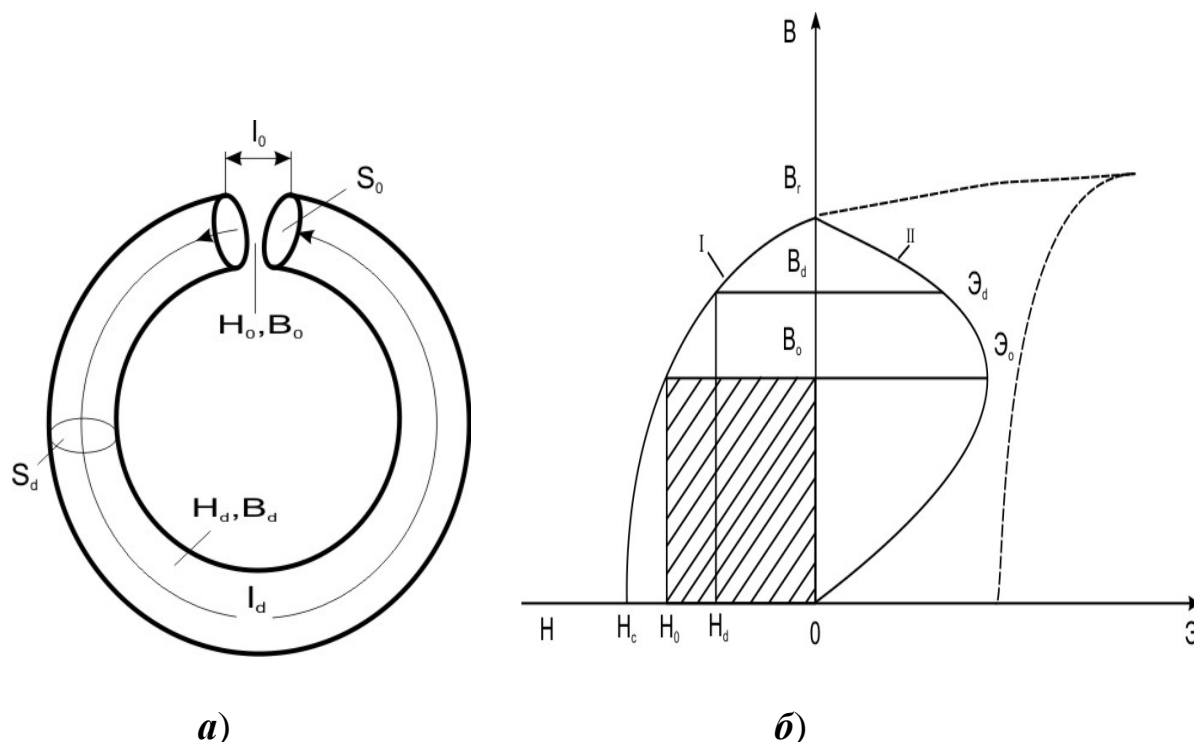


Рисунок 5.16 – Схема магнита (а) и зависимость магнитной индукции от коэрцитивной силы магнитной энергии в воздушном зазоре (б)

Магнитные цепи с постоянными магнитами разомкнутые, т.е. имеют рабочий воздушный зазор (рисунок 5.16, а). Магнитный поток в зазоре возникает после предварительного намагничивания МТ материала в сильном магнитном поле.

Свойства МТ материалов характеризует кривая размагничивания (рисунок 5.16, б). При наличии зазора (l_0) за счет свободных полюсов создается внутреннее размагничивающее поле с коэрцитивной силой (H_d), которое уменьшает индукцию внутри магнита до значения B_d . Положение рабочей точки на зависимости $B = f(H)$, характеризующей состояние МТ материала, зависит от величины зазора.

При отсутствии внешнего поля макроскопические токи отсутствуют и в соответствии с законом полного тока:

$$\oint H dl = 0, \quad (5.15)$$

что справедливо для любого контура интегрирования, например, вдоль

пути по оси магнита.

В результате:

$$H_d l_d - H_0 l_0 = 0, \quad (5.16)$$

где l_d и l_0 - длины магнита и воздушного зазора соответственно; H_0 - напряженность магнитного поля в зазоре.

Максимальная магнитная энергия в рабочем зазоре магнита:

$$\mathcal{E}_0 = (B_0 H_0 / 2) V_0, \quad (5.17)$$

где V_0 - объем зазора.

При индукции B_D и силе H_D энергия в зазоре максимальна:

$$\mathcal{E}_D = (B_D H_D) / 2 = \mathcal{E}_{d_{\text{МАКС}}}. \quad (5.18)$$

Значение энергии \mathcal{E}_D определяет оптимальное использование магнита и тем самым является важной характеристикой качества МТ материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов.

Графически энергию \mathcal{E}_d в заданном масштабе представляют как площадь прямоугольника со сторонами B_d и H_d .

Форму кривой размагничивания характеризуют коэффициентом выпуклости:

$$\eta_B = B_{\text{МАКС}} H_{\text{МАКС}} / B_r H_C. \quad (5.19)$$

С усилением прямоугольности петли $B = f(H)$ коэффициент η_B приближается к единице. Чем больше индукция B_r , сила H_C и коэффициент η_B , тем больше максимальная энергия постоянного магнита.

Литые высококоэрцитивные сплавы. К этой группе относятся сплавы систем $Fe - Ni - Al$ и $Fe - Ni - Co - Al$ модифицированные различными добавками. Сплавы являются активными элементами многих приборов и характеризуются благоприятным соотношением между магнитными свойствами и стоимостью производства.

Магнитные свойства МТ материалов зависят от кристаллографической и магнитной текстур. Магнитную текстуру высококоэрцитивных сплавов создают путем охлаждения в сильном магнитном поле (эффективно для сплавов с высоким содержанием кобальта).

Недостаток сплавов $Fe - Ni - Al$ и $Fe - Ni - Co - Al$ - хрупкость и высокая твердость (допускают только шлифовку).

Рассмотрим кривые размагничивания магнитной энергии в воздушном зазоре сплавов (рисунок 5.17).

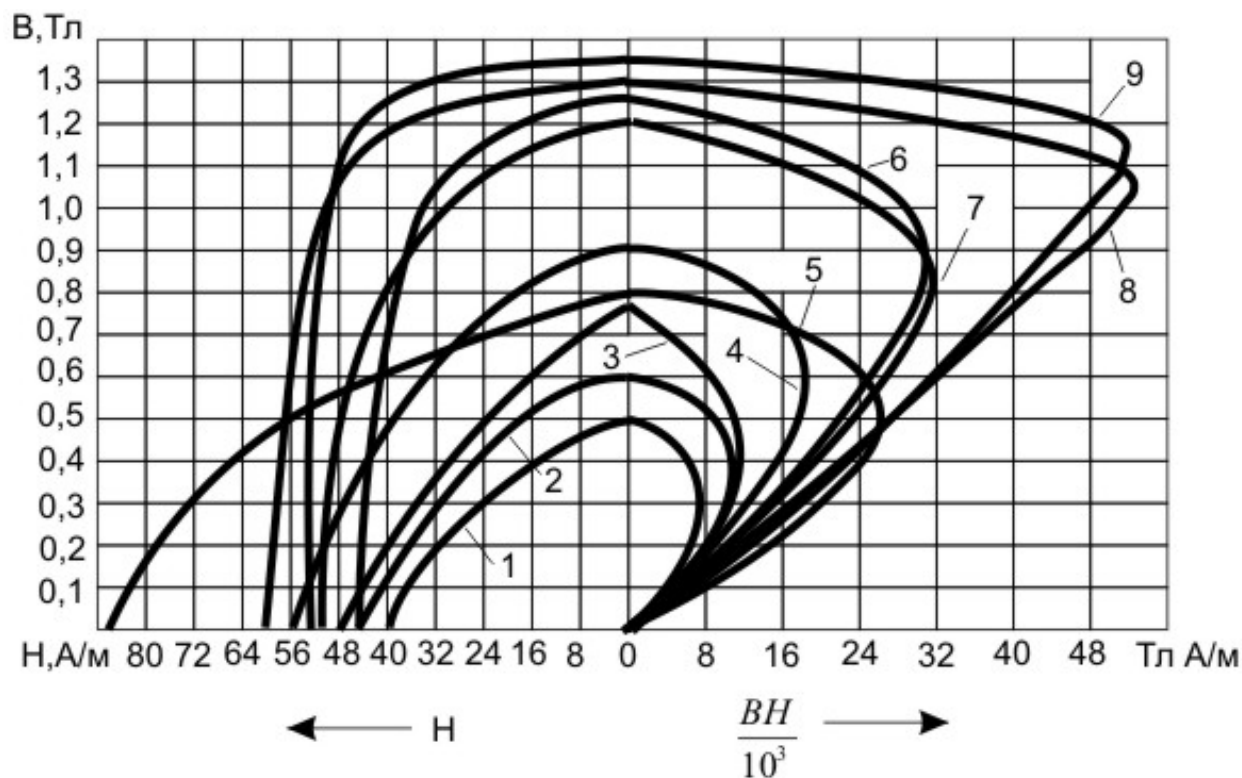


Рисунок 5.17 - Кривые размагничивания и магнитной энергии в воздушном зазоре сплавов:

1 - ЮНД4; 2 - ЮНД8; 3 - ЮНДК15; 4 - ЮНДК18; 5 - ЮНДК34Т5; 6 - ЮШЗДК24; 7 - ЮНДК24Б; 8 - ЮН15ДК25БА; 9 - ЮН14ДК25А (Ю - алюминий, Н - никель, Д - медь, К - кобальт, Т - титан, Б - ниобий, А - столбчатая кристаллическая текстура)

Бесбальтовые сплавы (ЮНД) наиболее дешевые. Сплавы, содержащие кобальт (ЮНДК15, ЮНДК18 и др.), применяют, когда требуются повышенные магнитные свойства и изотропный магнитный материал.

Сплавы с 24% кобальта, обладающие высокими магнитными свойствами в направлении магнитной текстуры, используют при направленном магнитном потоке.

Сплавы с направленной кристаллизацией, например ЮН13ДК25БА, ЮНДК35Т5БА, имеют большой запас магнитной энергии $\mathcal{E}_{МАКС} = (35...40)кДж/м^3$. При большом воздушном зазоре применяют сплавы с наибольшей коэрцитивной силой, например, ЮНДК40Т8 ($H_C = 145кА/м$).

Высокими магнитными свойствами обладают монокристаллические материалы марок ЮНДК35Т5АА, ЮНДК40Т8АА (символ АА означает

монокристаллическую структуру). Однако они достаточно дороги, поэтому промышленностью производятся в ограниченных масштабах.

Сплавы, содержащие кобальт (ЮНДК), применяют, когда требуются повышенные магнитные свойства.

Магниты из порошков. Сложности в изготовлении мелких магнитных изделий из литых железоникельалюминиевых сплавов обусловили использование методов порошковой металлургии для производства постоянных магнитов.

Различают металлокерамические и металлопластические магниты. Металлокерамические магниты имеют пористость (3...5)%, а запасенная магнитная энергия и остаточная индукция у них на (10...20)% ниже, чем у литых магнитов, зато по механической прочности они превосходят литые магниты в (3...6) раз.

Магнитные свойства *металлопластических магнитов* низкие. Коэрцитивная сила по сравнению с литыми магнитами ниже на: (10...15)%, остаточная индукция (35..50)%, запасенная магнитная энергия (40...60)%.

Понижение магнитных свойств объясняется большим содержанием (до 30%) немагнитного связующего вещества.

Магнитотвердые ферриты. Из МТ ферритов применяют бариевый феррит. В отличие от ММ ферритов он имеет не кубическую, а гексагональную кристаллическую решетку. Выпускают бариевые магниты марок: БИ (бариевые изотропные) и БА (бариевые анизотропные).

Высокая коэрцитивная сила у них обусловлена малым размером кристаллических зерен и сильной магнитной кристаллографической анизотропией.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как классифицируют вещества по магнитным свойствам?
2. Чем отличается обменное взаимодействие в ферромагнетиках от взаимодействия в антиферромагнетиках?
3. Могут ли обладать ферромагнитными свойствами сплавы, состоящие из неферромагнитных элементов?
4. Чем обусловлены направления намагниченностей в доменах и расположение их границ в отсутствие внешнего магнитного поля?
5. Что понимают под энергией естественной магнитной кристаллографической анизотропии?
6. Какие процессы происходят в ферромагнетике при его намагничивании внешним полем?
7. Что называют основной кривой намагничивания магнитного материала?
8. Как изменяется статическая магнитная проницаемость ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля?
9. В чем заключается явление магнитострикции?
10. Какое влияние магнитострикция оказывает на процесс намагничивания ферромагнетика?
11. Как изменяется индукция насыщения ферромагнетика при увеличении температуры?
12. Каковы причины появления магнитных потерь при циклическом перемагничивании ферромагнетиков?
13. Какие способы уменьшения магнитных потерь Вам известны?
14. Почему переменный магнитный поток неравномерно распределяется по сечению сплошного магнитопровода?
15. Как неравномерное распределение переменного магнитного потока сказывается на значении магнитной проницаемости сердечника?
16. Какие материалы называются ферритами?
17. Какова природа магнитного упорядочения в ферритах?
18. Что такое точка компенсации феррита?
19. В каких магнитных материалах наблюдается точка компенсации?
20. Как классифицируют магнитные материалы по свойствам?
21. Классификация магнитных материалов по техническому назначению?
22. Какие магнитомягкие материалы имеют высокое значение магнитной проницаемости в слабых магнитных полях?
23. Каково влияние кремния на свойства электротехнической стали?
24. Чем отличаются свойства высоко- и низконикелевого пермаллоев?
25. В чем сходство магнитных свойств ферритов и ферромагнетиков?
26. Какие материалы обладают прямоугольной петлей гистерезиса?
27. Применение материалов с прямоугольной петлей гистерезиса?
28. Какие материалы обладают сильно выраженной магнитострикцией?
29. Назовите важнейшие характеристики магнитотвердых материалов.

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Требования к электротехническим материалам.
2. Кристаллическое строение металлов и их сплавов.
3. Дефекты кристаллического строения металлов.
4. Механические свойства конструкционных материалов на основе цветных металлов и их сплавов.
5. Испытания на растяжение. Диаграмма растяжения пластичных материалов.
6. Показатели прочности цветных металлов и их сплавов.
7. Показатели пластичности конструкционных материалов из цветных металлов.
8. Механические испытания цветных металлов на твердость методами Бринелля, Виккерса и Роквелла.
9. Назначение, классификация и технические характеристики сплавов алюминия.
10. Назначение, технические характеристики латуни и бронзы в электротехнике.
11. Основные способы обработки цветных сплавов.
12. Физико-механические свойства цветных сплавов после обработки давлением.
13. Назначение, классификация и электрические характеристики проводников.
14. Электрические характеристики проводниковых материалов. Удельная проводимость цветных металлов.
15. Удельное сопротивление цветных металлов и методы его определения.
16. Факторы, влияющие на удельное сопротивление проводниковых материалов.
17. Зависимость удельного сопротивления цветных металлов от температуры.
18. Характеристика термодвижущей силы и схема термопары.
19. Назначение и свойства проводниковых материалов и высокой проводимостью.
20. Назначение, состав и области применения серебра в технике.
21. Технические свойства и электрические характеристики (графические и аналитические зависимости удельного сопротивления от температуры) меди.
22. Зависимость удельного сопротивления меди от температуры в области криогенных температур. Марки меди.
23. Назначение, свойства и области применения алюминия.

24. Явление сверхпроводимости в металлах. Современная теория сверхпроводимости. Образование электронных пар.
25. Сверхпроводники первого, второго и третьего порядка.
26. Свойства высокотемпературные сверхпроводники.
27. Криопроводниковые материалы на основе меди и алюминия.
28. Назначение, классификация и область применения контактных материалов.
29. Состав, свойства и величина термодвижущей силы сплавов для термопар.
30. Назначение, состав, классификация и области применения материалов с большим удельным сопротивлением.
31. Электропроводимость полупроводников и её зависимость от ряда факторов.
32. Свойства простых полупроводников (германий и кремний).
33. Термоэлектрические явления (эффекты Зеебека и Томпсона).
34. Гальваномагнитные эффекты в полупроводниках (ЭДС Холла).
35. Назначение, классификация и области применения диэлектрических материалов.
36. Характеристика электрофизических свойств диэлектрических материалов.
37. Требования к изоляционным материалам и их свойствам.
38. Образование энергетических зон и построение энергетической диаграммы твердых диэлектриков.
39. Особенности газообразного, жидкого и твердого состояния диэлектриков.
40. Свойства электрической изоляции в электроустановках.
41. Образование сквозного тока утечки на участке твердой изоляции и его электрическая проводимость.
42. Удельная электропроводимость диэлектриков.
43. Виды электропроводимости диэлектрических материалов.
44. Электронная проводимость диэлектриков в полях.
45. Факторы, влияющие на электропроводимость газообразных диэлектриков в слабых электрических полях.
46. Зависимость плотности тока от напряженности в газообразных диэлектриках.
47. Природа электропроводимости жидких диэлектриках.
48. Зависимость удельной электропроводимости от температуры в диэлектриках.
49. Зависимость электропроводимости от температуры в твердых диэлектриках.
50. Поверхностная электропроводимость твердых диэлектриков.

51. Механизм изменения напряженности электрического поля плоского конденсатора заполненного диэлектриком.
52. Понятие о диэлектрической проницаемости. Образование диполей в диэлектрике, помещенном в электрическое поле.
53. Понятие о поляризованности диэлектрика. Электрический момент поляризованной частицы.
54. Физическая природа поляризации диэлектриков. Виды микроскопических процессов приводящих к поляризации.
55. Электронная упругая поляризация диэлектриков.
56. Ионная упругая поляризация в кристаллических диэлектриках.
57. Неупругие поляризации диэлектриков. Время релаксации диполя.
58. Характерные электрические свойства сегнетоэлектриков.
59. Виды поляризации сегнетоэлектриков.
60. Зависимость диэлектрического гистерезиса и проницаемости от напряженности электрического поля и температуры.
61. Виды потерь мощности в диэлектрических материалах.
62. Токи через диэлектрик при постоянном напряжении.
63. Векторная диаграмма токов, протекающих через конденсатор диэлектриком при переменном напряжении.
64. Угол диэлектрических потерь и удельные диэлектрические потери.
65. Диэлектрические потери в газообразных диэлектриках.
66. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках.
67. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках.
68. Пробой диэлектриков и его физическая природа.
69. Пробой газообразных, жидких и твердых диэлектриков.
70. Изменение электрической прочности диэлектриков при облучении.
71. Поверхностный пробой электроизоляционных материалов.
72. Механические свойства диэлектриков.
73. Термические свойства диэлектриков.
74. Физико-химические свойства диэлектриков.
75. Основные свойства газообразных диэлектриков.
76. Жидкие диэлектрики на основе нефтяных масел.
77. Синтетические жидкие диэлектрики.
78. Диэлектрики из кремнийорганических и фторорганических соединений.
79. Свойства линейных полярных и неполярных полимеров.
80. Свойства полимеров получаемых поликонденсацией (смолы).
81. Свойства композиционных материалов (гетинакс, текстолит).
82. Свойства резины применяемой при производстве кабельных изделий.
83. Свойства изоляционных лаков, эмалей, компаундов и клеев.
84. Свойства волокнистых материалов (дерево, бумага, картон).

85. Свойства слюды и слюдяных материалов.
86. Свойства стекла и электротехнической керамики.
87. Характеристики магнитных материалов.
88. Процессы технического намагничивания и перемагничивания материалов.
89. Свойства технически чистого железа.
90. Магнитные свойства пермаллоев (железоникелевые сплавы).
91. Магнитные сплавы с особыми свойствами.
92. Свойства аморфных магнитных материалов.
93. Свойства магнитодиэлектриков и магнитомягких ферритов.
94. Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса.
95. Свойства магнитотвердых материалов.
96. Свойства литых высококоэрцитивных сплавов.
97. Свойства металлокерамических магнитов.
98. Свойства магнитотвердых ферритов на основе бария и кобальта.
99. Свойства магнитов на основе редкоземельных металлов (кобальта и цезия, кобальта и самария).

ТЕСТЫ

Тема 1 Электротехнические материалы на основе металлов

1. Виды химической связи в электротехнических материалах:

- А. Гомеополярная и гетерополярная.
- Б. Гетерополярная, металлическая и молекулярная.
- В. Гомеополярная и гетерополярная, металлическая.
- Г. Гомеополярная, гетерополярная, металлическая и молекулярная.

2. За счет электронов, которые становятся общими для пар атомов, достигается _____ связь.

- А. Гомеополярная.
- Б. Гетерополярная.
- В. Металлическая.
- Г. Молекулярная.

3. Молекулы с гомеополярной связью бывают:

- А. Полярными.
- Б. неполярными.
- В. неполярными или полярными.

4. неполярными называют молекулы, у которых центры:

- А. Положительных зарядов совпадают.

- Б. Отрицательных зарядов совпадают.
- В. Положительных и отрицательных зарядов совпадают.

5. Полярными называют молекулы, у которых центры:

- А. Противоположных по знаку зарядов совпадают.
- Б. Противоположных по знаку зарядов не совпадают.
- В. Одинаковых по знаку зарядов не совпадают.

6. Полярная молекула характеризуется:

- А. Электронным моментом.
- Б. Ионным моментом.
- В. Молекулярным моментом
- Г. Дипольным моментом.

7. Ковалентная связь характеризуется:

- А. Высокой прочностью.
- Б. Высокой пластичностью.
- В. Высокой прочностью и пластичностью.
- Г. Высокой ковкостью.

8. Ковалентной связью обладают вещества:

- А. Германий и кремний.
- Б. Кремний и карбид кремния.
- В. Алмаз и карбид кремния.
- Г. Германий и алмаз.

9. Переход валентных электронов от металлического атома к металлоидному есть причина возникновения _____ связи.

- А. Гомеополярной.
- Б. Молекулярной.
- В. Металлической.
- Г. Гетерополярной.

10. Гетерополярная связь реализуется в:

- А. Электронных кристаллах.
- Б. Ионных кристаллах.
- В. Молекулярных кристаллах.
- Г. Дипольных кристаллах.

11. Способность атомов захватывать электрон при образовании химической связи характеризуется:

- А. Электроположительностью.

- Б. Электроотрицательностью.
- В. Электроположительностью и электроотрицательностью.
- Г. Положительностью и отрицательностью.

12. Небольшой электроотрицательностью обладают атомы:

- А. Щелочных растворов.
- Б. Щелочных металлов.
- В. Щелочных металлов и растворов.
- Г. Металлов и растворов.

13. Большой электроотрицательностью обладают атомы:

- А. Галогенов и растворов.
- Б. Галогенов и негалогенов.
- В. Растворов.
- Г. Галогенов.

14. В системах, построенных из положительных атомных остовов, находящихся в среде свободных коллективизированных электронов существует _____ связь.

- А. Гомеополярная.
- Б. Молекулярная.
- В. Гетерополярная.
- Г. Металлическая.

15. Целостность металла обуславливает притяжение между:

- А. Положительными ионами и электронами.
- Б. Ионами и электронами.
- В. Положительными атомными остовами и электронами.
- Г. Отрицательными атомными остовами и электронами

16. Специфика металлической связи состоит в:

- А. Обобществлении ионов, которые свободно перемещаются, образуя «ионный газ».
- Б. Обобществлении электронов, которые свободно перемещаются, образуя «электронный газ».
- В. Обобществлении ионов и электронов, которые свободно перемещаются, образуя «электронный газ».
- Г. Обобществлении молекул, которые свободно перемещаются, образуя «электронный газ».

17. Металлическим кристаллам свойственна пластичность при деформациях потому что они:

А. Не имеют локализованных связей и не разрушаются при изменении положений атомов.

Б. Имеют локализованные связи и не разрушаются при изменении положений атомов.

В. Не имеют связей и не разрушаются при изменении положений атомов.

Г. Не имеют локализованных связей и разрушаются при изменении положений атомов.

18. Молекулярная связь наблюдается у веществ с:

А. Валентным характером взаимодействия.

Б. Ионным характером взаимодействия.

В. Ковалентным характером взаимодействия.

Г. Молекулярным характером взаимодействия.

19. Тела называют твердыми которые обладают постоянством:

А. Формы и высоты.

Б. Формы и поверхности.

В. Формы и длины.

Г. Формы и объема.

20. Твердые тела бывают:

А. Кристаллические и полиморфные.

Б. Кристаллические и нестекловидные.

В. Кристаллические и аморфные.

Г. Полиморфные и аморфные.

21. У кристаллов наиболее характерным является:

А. Не периодичность структуры и правильная геометрическая форма.

Б. Периодичность структуры и правильная геометрическая форма.

В. Периодичность структуры и неправильная геометрическая форма.

Г. Не периодичность структуры и неправильная геометрическая форма.

22. Основные кристаллические системы твердых тел являются:

А. Триклинная, моноклинная, ромбическая, тетрагексагональная.

Б. Клинная, моноклинная, ромбическая, гексагональная.

В. Триклинная, клинная, ромбическая, гексагональная.

Г. Триклинная, моноклинная, ромбическая, гексагональная.

23. Дефекты кристаллической структуры подразделяются на:

А. Динамические (временные) и статические (постоянные).

- Б. Статические и постоянные.
- В. Динамические и временные.
- Г. Статические и нестатические.

24. Наиболее распространенным видом динамических дефектов являются:

- А. Электроны.
- Б. Мюоны.
- В. Фононы.
- Г. Элементарные частицы.

25. Статические дефекты кристаллической структуры делятся на:

- А. Атомные и точечные.
- Б. Атомные и протяженные дефекты структуры.
- В. Атомные и непротяженные дефекты структуры.
- Г. Атомные и другие дефекты структуры.

26. Атомные дефекты проявляются в видах:

- А. Вакансий, смещений иона из узла в междоузлие и внедрения в решетку чужеродного атома.
- Б. Вакансий, смещений электрона из узла в междоузлие и внедрения в решетку чужеродного атома.
- В. Вакансий, смещений атома из узла в междоузлие и внедрения в решетку чужеродного атома.

27. К протяженным относятся дефекты:

- А. Дислокации, поры, трещины и границы материала.
- Б. Дислокации, поры, трещины и границы молекул.
- В. Вакансии, поры, трещины и границы зерен.
- Г. Дислокации, поры, трещины и границы зерен.

28. Простейшими являются _____ дислокации.

- А. Краевая и невинтовая.
- Б. Краевая и винтовая.
- В. Общая и винтовая.
- Г. Краевая и общая.

29. Состояние сильно переохлажденной жидкости можно рассматривать как:

- А. Не стеклообразное.
- Б. Аморфное.
- В. Стеклообразное.
- Г. Не аморфное.

30. Свойства, которые выявляются испытаниями при воздействии внешних нагрузок называются:

- А. Электрическими.
- Б. Химическими.
- В. Физическими.
- Г. Механическими.

31. Основными механическими свойствами твердых электротехнических материалов являются:

- А. Упругость, хрупкость, прочность, твердость и усталость.
- Б. Упругость, пластичность, прочность, твердость и текучесть.
- В. Упругость, пластичность, прочность, твердость и усталость.
- Г. Упругость, ломкость, прочность, твердость и усталость.

32. Прочностью твердого материала называют:

- А. Свойство материала сопротивляться деформации и разрушению.
- Б. Свойство материала сопротивляться деформации или разрушению.
- В. Свойство материала сопротивляться деформации или старению.
- Г. Качество материала сопротивляться деформации и разрушению.

33. Пределом текучести твердого материала называют:

- А. Наибольшее напряжение, при котором материал пластически деформируется с изменением нагрузки.
- Б. Наименьшее напряжение, при котором материал не деформируется без заметного изменения нагрузки.
- В. Наименьшее напряжение, при котором материал пластически деформируется без изменения нагрузки.
- Г. Наименьшее напряжение, при котором материал пластически деформируется с изменением нагрузки.

34. Условным пределом текучести твердого материала называют:

- А. Перенапряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % начальной расчетной длины образца.
- Б. Напряжение, при котором начальное удлинение достигает 0,2 % начальной расчетной длины образца.
- В. Напряжение, при котором удлинение достигает 0,2 % начальной расчетной длины образца.
- Г. Напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % начальной расчетной длины образца.

35. Пределом прочности твердого материала называют:
А. Перенапряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрыву образца
Б. Напряжение, соответствующее наименьшей нагрузке, предшествующей разрыву образца.
В. Напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрыву образца.
Г. Напряжение, соответствующее средней нагрузке, предшествующей разрыву образца.

36. Пластичностью твердого материала называют:
А. Свойство материала обратимо изменять свою форму и размеры под действием внешней нагрузки
Б. Свойство материала необратимо изменять свою форму и размеры под действием внешней нагрузки.
В. Свойство материала необратимо изменять свою форму и размеры под действием внутренней нагрузки.

37. Относительным удлинением после разрыва твердого материала называют:
А. Отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к ее первоначальной длине.
Б. Отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к ее конечной длине.
В. Отношение приращения расчетной ширины образца после разрыва к ее первоначальной длине
Г. Отношение приращения расчетной длины образца до разрыва к ее первоначальной длине.

38. Относительным сужением после разрыва твердого материала называют:
А. Отношение уменьшения площади продольного сечения образца в месте разрыва к начальной площади продольного сечения.
Б. Отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к конечной площади поперечного сечения.
В. Отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к средней площади поперечного сечения.
Г. Отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения.

39. Твердостью материала называют:
А. Свойство материала оказывать сопротивление деформации при удалении индентора из его поверхности.

Б. Свойство материала не оказывать сопротивление деформации при внедрении индентора в его поверхность.

В. Свойство материала оказывать сопротивление деформации при внедрении индентора в его поверхность.

40. Для измерения твердости тонких слоев электротехнических материалов применяется метод:

А. Милитвердости

Б. Микротвердости.

В. Микрожесткости.

Г. Твердости

41. Зонной теорией твердого тела называют:

А. Теорию ковалентных электронов, движущихся в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки.

Б. Теорию валентных электронов, движущихся в периодическом кинетическом поле кристаллической решетки.

В. Теорию валентных ионов, движущихся в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки.

Г. Теорию валентных электронов, движущихся в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки.

42. Зонная теория твердого тела применима к телам с:

А. Валентными и металлическими связями.

Б. Ковалентными и металлическими связями.

В. Ковалентными и неметаллическими связями.

Г. Валентными и неметаллическими связями.

43. Энергетическими зонами твердого электротехнического материала являются зоны:

А. Проводимости, ковалентная, запрещенная.

Б. Проводимости, валентная, разрешенная.

В. Проводимости, валентная, запрещенная.

Г. Полу проводимости, валентная, запрещенная.

44. Зона, соответствующая энергетическим уровням электронов внешней оболочки в изолированных атомах тела называется:

А. Ковалентной.

Б. Валентной.

В. Запрещенной.

Г. Проводимости.

45. Ближайшую к валентной зоне свободную, незаполненную электронами, называют зоной:

- А. Ковалентной.
- Б. Запрещенной.
- В. Валентной.
- Г. Проводимости.

46. Зона проводимости и валентная зона разделены некоторым энергетическим зазором, называемым:

- А. Незапрещенной зоной.
- Б. Запрещенной зоной.
- В. Ковалентной зоной.

47. Из-за изменения амплитуды тепловых колебаний атомов решетки и из-за изменения межуатомных расстояний ширина запрещенной зоны меняется с изменением:

- А. Давления.
- Б. Влажности.
- В. Температуры.
- Г. Излучения.

Тема 2 Проводниковые материалы

48. Проводниковые материалы по составу классифицируются как:

- А. Металлы, неметаллические сплавы, неметаллические проводящие материалы.
- Б. Металлы, металлические сплавы, неметаллические проводящие материалы.
- В. Металлы, металлические сплавы, неметаллические полупроводящие материалы.
- Г. Металлы, неметаллические сплавы, металлические проводящие материалы.

49. К жидким проводникам относятся:

- А. Расплавленные неметаллы и электролиты.
- Б. Частично расплавленные металлы и электролиты.
- В. Не расплавленные металлы и электролиты.
- Г. Расплавленные металлы и электролиты.

50. Механизм прохождения тока по металлам в твердом и жидком состояниях обусловлен:

- А. Движением свободных ионов.

- Б. Движением свободных электронов.
- В. Движением свободных ионов и электронов.
- Г. Движением электронов.

51. Проводниками с электронной электропроводностью называют проводниками:

- А. Общего рода.
- Б. Второго рода.
- В. Первого и второго рода.
- Г. Первого рода.

52. Проводниками с ионной электропроводностью называют:

- А. Жидкости.
- Б. Электролиты и жидкости.
- В. Электролиты.
- Г. Газы.

53. К проводникам второго рода относятся:

- А. Кислоты, щелочи и соли.
- Б. Водные растворы кислот, щелочей и солей.
- В. Растворы кислот, щелочей и солей.

54. Газы и пары могут стать проводниками, если напряженность электрического поля:

- А. Выше критического значения, обеспечивающего окончание ударной ионизации.
- Б. Ниже критического значения, обеспечивающего начало ударной ионизации.
- В. Выше критического значения, обеспечивающего начало ударной ионизации.

55. Сформулируйте аналитическое выражение закона Ома.

- А. Плотность тока в проводнике пропорциональна напряженности электрического поля, где коэффициент пропорциональности - удельная электропроводимость проводника.
- Б. Ток в проводнике пропорциональна напряженности электрического поля, где коэффициент пропорциональности - удельная электропроводимость проводника.
- В. Плотность тока в проводнике обратно пропорциональна напряженности электрического поля, где коэффициент пропорциональности - удельная электропроводимость проводника.

56. Числом Лоренца называют:

А. Отношение удельной теплопроводности к удельному электрическому сопротивлению металла при данной температуре.

Б. Отношение удельной электропроводности к удельной теплопроводности металла при данной температуре.

В. Отношение удельной теплопроводности к удельной электропроводности металла при данной температуре.

57. Электропроводимость проводника в основном определяется:

А. Средней длиной свободного пробега электронов, которая не зависит от строения проводника.

Б. Средней длиной свободного пробега ионов, которая зависит от строения проводника.

В. Длиной пробега электронов, которая зависит от строения проводника.

Г. Средней длиной свободного пробега электронов, которая зависит от строения проводника.

58. Тепловое колебание атомов в узлах кристаллической решетки ограничивает:

А. Длину пробега электронов в чистых металлах.

Б. Длину свободного пробега электронов в чистых металлах.

В. Время свободного пробега электронов в чистых металлах.

Г. Длину свободного пробега ионов в чистых металлах.

59. Температура Дебая в твердом теле зависит от:

А. Сил связи между ионами кристаллической решетки металла.

Б. Сил связи между электронами кристаллической решетки металла.

В. Сил связи между узлами кристаллической решетки металла.

Г. Сил связи между молекулами кристаллической решетки металла.

60. Температура Дебая в металле не превышает:

А. 400 - 450 К.

Б. 300 - 350 К.

В. 350 - 400 К.

Г. 450 - 500 К.

61. Температурным коэффициентом удельного сопротивления проводника называют:

А. Изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один Кельвин (градус).

Б. Относительное изменение удельной проводимости при изменении температуры на один Кельвин (градус).

В. Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один Цельсий (градус).

Г. Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один Кельвин (градус).

62. Правилom Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления металла называется:

А. Полное сопротивление металла есть сумма теплового и остаточного сопротивлений, обусловленных рассеянием ионов на тепловых колебаниях решетки и статических дефектах структуры

Б. Полное сопротивление металла есть сумма теплового и остаточного сопротивлений, обусловленных рассеянием электронов и ионов на тепловых колебаниях решетки и статических дефектах структуры.

В. Полное сопротивление металла есть сумма теплового и остаточного сопротивлений, обусловленных рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки и статических дефектах структуры.

63. Исключение из правила Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления металла составляют:

А. Сверхпроводящие металлы и электролиты.

Б. Полупроводящие металлы и магниты.

В. Сверхпроводящие металлы и магниты.

Г. Сверхпроводящие металлы.

64. Причиной электрического сопротивления твердых тел является:

А. Рассеяние свободных ионов на дефектах структуры.

Б. Рассеяние свободных электронов и ионов на дефектах структуры

В. Рассеяние свободных электронов на дефектах структуры.

Г. Рассеяние электронов на дефектах структуры.

65. Поверхностным эффектом (скин-эффектом) называется:

А. Неравномерное распределение электрического тока по сечению проводников.

Б. Равномерное распределение электрического тока по сечению проводников.

В. Неравномерное распределение электрического тока по сечению полупроводников.

Г. Равномерное распределение электрического тока по сечению полупроводников.

66. В качестве межэлементных соединений, контактных площадок, обкладок конденсаторов применяют:

- А. Неметаллические пленки.
- Б. Полуметаллические пленки.
- В. Металлоидные пленки.
- Г. Металлические пленки.

67. Размерным эффектом называется:

- А. Сокращение длины свободного пробега ионов вследствие их отражения от поверхности образца.
- Б. Сокращение длины свободного пробега электронов и ионов вследствие их отражения от поверхности образца.
- В. Сокращение длины свободного пробега электронов вследствие их отражения от поверхности образца.
- Г. Сокращение длины пробега электронов вследствие их отражения от поверхности образца.

68. Причина изменения свойств материала в пленочном состоянии в:

- А. Усилении размерных эффектов за счет поверхностных процессов.
- Б. Ослаблении размерных эффектов за счет поверхностных процессов.
- В. Усилении размерных эффектов за счет объемных процессов.
- Г. Усилении размерных эффектов за счет поверхностных и объемных процессов.

69. Внутренней контактной разностью потенциалов называется разность энергий Ферми, отсчитываемых от:

- А. Поверхности зоны проводимости.
- Б. Дна зоны проводимости.
- В. Дна и поверхности зоны проводимости.
- Г. Дна или поверхности зоны проводимости.

70. Термопарой называется:

- А. Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих разомкнутую цепь.
- Б. Термоэлемент, составленный из двух различных диэлектриков, образующих замкнутую цепь.
- В. Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь.
- Г. Термоэлемент, составленный из двух различных магнитов, образующих замкнутую цепь.

71. Термоэлектродвижущая сила в заданном интервале температур пропорциональна:

- А. Разности температур контактов спаев термопары.

- Б. Разности температур спаев термопары.
- В. Разности температур контактов спаев электрической пары.
- Г. Разности температур контактов термопары.

72. Достоинствами проводниковой меди являются:

- А. Большое удельное сопротивление, высокая механическая прочность, хорошая обрабатываемость, легкость пайки и сварки.
- Б. Малое удельное сопротивление, высокая механическая прочность, хорошая обрабатываемость, легкость пайки и сварки.
- В. Малое удельное сопротивление, низкая механическая прочность, хорошая обрабатываемость, легкость пайки и сварки.
- Г. Малое удельное сопротивление, высокая механическая прочность, хорошая обрабатываемость, трудность пайки и сварки.

73. Основными недостатками проводниковой меди являются:

- А. Высокая стоимость, влияние кислорода на механические свойства, подверженность атмосферной коррозии.
- Б. Высокая стоимость, влияние водорода на механические свойства, неподверженность атмосферной коррозии.
- В. Высокая стоимость, влияние водорода на механические свойства, подверженность атмосферной коррозии.
- Г. Низкая стоимость, влияние водорода на механические свойства, подверженность атмосферной коррозии.

74. На поверхности меди при атмосферной коррозии образуются:

- А Сульфидные пленки.
- Б. Окисные или сульфидные пленки
- В. Окисные пленки.
- Г. Окисные и сульфидные пленки.

75. Медь марки М 1 содержит:

- А. Меди 99,90%, а в общем количестве примесей (0,10%) кислорода должно быть не более 0,05%.
- Б. Меди 99,90%, а в общем количестве примесей (0,10%) кислорода должно быть не более 0,08%.
- В. Меди 99,90%, а в общем количестве примесей (0,10%) кислорода должно быть не более 0,03%.
- Г. Меди 99,90%, а в общем количестве примесей (0,10%) кислорода должно быть не более 0,01%.

76. Основными свойствами твердой меди являются:

А. Низкая механическая прочность, твердость и сопротивляемость поверхности истиранию.

Б. Высокая механическая прочность, твердость и плохая сопротивляемость поверхности истиранию.

В. Высокая механическая прочность, твердость и сопротивляемость поверхности истиранию.

77. Основными свойствами мягкой меди являются:

А. Хорошая гибкость и пластичность.

Б. Плохая гибкость и пластичность.

В. Хорошая твердость и пластичность.

Г. Хорошая гибкость и твердость.

78. Алюминий превосходит медь, так как:

А. Алюминий 3,5 раза тяжелее меди и значительно дешевле

Б. Алюминий 3,5 раза легче меди и значительно дешевле.

В. Алюминий 3,5 раза легче меди и значительно дороже.

79. Алюминий уступает меди, так как:

А. Удельное сопротивление алюминия в 1,2 раза больше удельного сопротивления меди.

Б. Удельное сопротивление алюминия в 1,1 раза больше удельного сопротивления меди.

В. Удельное сопротивление алюминия в 1,9 раза больше удельного сопротивления меди.

Г. Удельное сопротивление алюминия в 1,6 раза больше удельного сопротивления меди.

80. Отожженный алюминий в ____ менее прочен на разрыв, чем отоженная медь.

А. Три раза.

Б. Два раза.

В. Четыре раза.

Г. Полтора раза.

81. Для электротехнических целей используют алюминий технической чистоты марки АЕ, в котором не более ____ примесей.

А. 0,3%.

Б. 0,5%.

В. 0,7%.

Г. 0,9%.

82. На поверхности алюминия под воздействием атмосферы образовывается тонкая пленка окиси с:

- А. Малым электрическим сопротивлением.
- Б. Электрическим сопротивлением.
- В. Большим электрическим сопротивлением.
- Г. Большим электрическим сопротивлением.

83. Недостатком алюминия является:

- А. Незначительная подверженность электрической миграции.
- Б. Незначительная подверженность электрическохимической миграции.
- В. Значительная подверженность электрическохимической миграции.
- Г. Значительная подверженность электрической миграции.

84. Достоинство пленки окиси алюминия в том, что:

- А. Предохраняет алюминий от коррозии.
- Б. Не предохраняет алюминий от коррозии.
- В. Предохраняет алюминий от коррозии.

85. Недостаток пленки окиси алюминия в том, что:

- А. Создает небольшое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов.
- Б. Создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов.
- В. Создает большое общее сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов.

86. Для пайки алюминия применяют:

- А. Специальные пасты-припой и звуковые паяльники.
- Б. Специальные пасты-припой и паяльники.
- В. Специальные пасты-припой и ультразвуковые паяльники.
- Г. Припой и ультразвуковые паяльники.

87. Явлением сверхпроводимости металлов называют:

- А. Резкое уменьшение удельного электрического сопротивления металла при температурах близких к абсолютному нулю.
- Б. Резкое уменьшение удельного электрического сопротивления металла при температурах далеких от абсолютного нуля.
- В. Резкое уменьшение удельного электрического сопротивления металла при нулевых температурах.

88. Внешнее магнитное поле в _____ толщю сверхпроводника, затухая в тончайшем поверхностном слое.

- А. Частично проникает.
- Б. Слабо проникает.
- В. Не проникает.
- Г. Совершенно не проникает.

89. В поверхностном слое сверхпроводника при его внесении в магнитное поле возникает:

- А. Круговой незатухающий ток.
- Б. Круговой затухающий ток.
- В. Незатухающий ток.
- Г. Круговой ток.

90. Сверхпроводимость проводника может быть разрушена:

- А. Внутренним магнитным полем и током, проходящим по сверхпроводнику.
- Б. Внешним магнитным полем и током, проходящим по сверхпроводнику.
- В. Магнитным полем и током, проходящим по сверхпроводнику.
- Г. Внешним магнитным полем, проходящим по сверхпроводнику.

91. Сверхпроводимость никогда не наблюдается в _____ системах.

- А. Ферромагнитных или антиферромагнитных.
- Б. Ферромагнитных и антиферромагнитных.
- В. Ферромагнитных и ферромагнитных.
- Г. Ферромагнитных и антиферромагнитных.

92. Применением сверхпроводников в электрических машинах можно исключить:

- А. Сердечники из электротехнической стали.
- Б. Сердечники из электротехнической меди.
- В. Сердечники из электротехнической стали и обмотки.
- Г. Сердечники из технической стали.

93. В основу создания сверхскоростного железнодорожного транспорта на «магнитной подушке» положен принцип:

- А. Динамического выталкивания сверхпроводника из магнитного поля.
- Б. Механического выталкивания сверхпроводника из магнитного поля.
- В. Механического выталкивания сверхпроводника из электрического поля.
- Г. Механического выталкивания проводника из электрического поля.

94. Сплавами высокого сопротивления называют:

А. Проводниковые материалы, у которых значения удельного сопротивления составляют не менее $0,3 \text{ Ом м}$.

Б. Полупроводниковые материалы, у которых значения удельного сопротивления составляют не менее $0,3 \text{ мкОм м}$.

В. Проводниковые материалы, у которых значения удельного сопротивления составляют не менее $0,3 \text{ мкОм м}$.

Г. Проводниковые материалы, у которых значения удельного сопротивления составляют не менее $0,1 \text{ мкОм м}$.

95. В качестве сплавов высокого сопротивления используется:

А. Манганин, молибден, нихром.

Б. Манганин, вольфрам, нихром.

В. Манганин, константан, вольфрам.

Г. Манганин, константан, нихром.

96. В состав манганина и константана входят:

А. Медь, никель, алюминий.

Б. Медь, никель, кремний.

В. Медь, никель, марганец.

Г. Медь, никель, молибден.

97. В состав нихрома входят:

А. Хром, никель, марганец.

Б. Хром, никель, алюминий.

В. Хром, никель, медь.

Г. Хром, никель, молибден.

98. В качестве сплавов для термопар используется:

А. Топель, алюмель, хромель.

Б. Копель, алюмель, хромель.

В. Мопель, алюмель, хромель.

Г. Хопель, алюмель, хромель.

99. В качестве тугоплавких металлов используются:

А. Вольфрам, молибден, тантал, сталь.

Б. Вольфрам, молибден, тантал, медь.

В. Вольфрам, молибден, тантал, ниобий.

Г. Вольфрам, молибден, тантал, кобальт.

100. В полное удельное сопротивление железа (стали) входят составляющие, обусловленные:

- А. Рассеянием электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки и на примесях в железе, а также магнитная составляющая.
- Б. Рассеянием электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки и на примесях в железе.
- В. Рассеянием ионов на тепловых колебаниях кристаллической решетки и на примесях в железе, а также магнитная составляющая.
- Г. Рассеянием электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки, а также магнитная составляющая.

101. Железо не применяют в качестве проводникового материала потому, что:

- А. Железо имеет высокое удельное сопротивление (0,3 мкОм·м).
- Б. Железо имеет высокое удельное сопротивление (0,5 мкОм·м).
- В. Железо имеет высокое удельное сопротивление (0,7 мкОм·м).
- Г. Железо имеет высокое удельное сопротивление (0,1 мкОм·м).

102. Наиболее сильное влияние на электрические свойства железа оказывает примесь:

- А. Кремния.
- Б. Германия.
- В. Марганца.
- Г. Никеля.

103. В железе и сталях заметно сказывается поверхностный эффект по причине:

- А. Низкой магнитной проницаемости металлов.
- Б. Средней магнитной проницаемости металлов.
- В. Высокой магнитной непроницаемости металлов.
- Г. Высокой магнитной проницаемости металлов.

104. Припой выбирают с учетом необходимой:

- А. Механической прочности спая, его антикоррозионной устойчивости и стоимости.
- Б. Механической вязкости спая, его коррозионной устойчивости и стоимости.
- В. Механической прочности спая, его коррозионной устойчивости и стоимости.

105. При пайке металлов токоведущих частей электрооборудования необходимо учитывать:

- А. Удельную электропроводимость припоя.
- Б. Удельную объемную электропроводимость припоя.

В. Удельную поверхностную электропроводимость припоя.

106. В качестве твердого неметаллического проводника применяется:

- А. Уголь.
- Б. Стекло углерод.
- В. Антрацит.
- Г. Графит.

107. Ценные свойства графита:

- А. Большое удельное сопротивление, высокие теплопроводность и нагревостойкость.
- Б. Малое удельное сопротивление, высокие теплопроводность и нагревостойкость.
- В. Малое удельное сопротивление, низкие теплопроводность и нагревостойкость.
- Г. Большое удельное сопротивление, низкие теплопроводность и нагревостойкость.

108. В состав композиционных проводящих материалов входит:

- А. Простая смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой.
- Б. Механическая смесь проводящего наполнителя с электрической связкой.
- В. Механическая смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой.
- Г. Механическая смесь непроводящего наполнителя с электрической связкой.

109. В качестве комбинированных проводящих материалов применяют:

- А. Контакттолы и керметы.
- Б. Неоконтакттолы и неокерметы.
- В. Неоконтакттолы и керметы.
- Г. Контакттолы и неокерметы.

110. Контакттолы применяют в качестве:

- А. Токопроводящих клеев, красок, изоляционных покрытий и эмалей.
- Б. Токопроводящих клеев, красок, покрытий и изоляционных эмалей.
- В. Токопроводящих клеев, красок, покрытий и эмалей.
- Г. Изоляционных клеев, красок, покрытий и эмалей.

Тема 3 Полупроводниковые материалы

111. Основной особенностью полупроводников является способность изменять свои свойства под влиянием внешних воздействий:

- А. Температуры или освещения.
- Б. Температуры или давления.
- В. Температуры и давления.
- Г. Температуры и освещения.

112. Свойства полупроводников сильно зависят от:

- А. Содержания примесей.
- Б. Содержания примесей ионов.
- В. Содержания примесей молекул.
- Г. Содержания крупных примесей.

113. Полупроводники в зависимости от степени чистоты делят на:

- А. Не примесные и примесные.
- Б. Собственные и примесные.
- В. Собственные и несобственные.
- Г. Собственные и не примесные.

114. Примесным полупроводником называют:

- А. Полупроводник, электрофизические свойства которого в основном определяются ионами.
- Б. Полупроводник, электрофизические свойства которого в основном определяются примесями.
- В. Полупроводник, электрофизические свойства которого в основном определяются молекулами.
- Г. Полупроводник, электрофизические свойства которого в основном определяются молекулами и ионами.

115. Собственным полупроводником называют:

- А. Полупроводник, в котором нельзя пренебречь влиянием примесей при данной температуре.
- Б. Полупроводник, в котором можно пренебречь влиянием примесей при любой температуре.
- В. Полупроводник, в котором можно пренебречь влиянием примесей при данной температуре.
- Г. Полупроводник, в котором можно пренебречь влиянием молекул при данной температуре.

116. В примесном полупроводнике роль примесей играют:

- А. Вакансии и междоузельные частицы.
- Б. Вакансии и междоузельные ионы.
- В. Вакансии и междоузельные молекулы.
- Г. Вакансии и междоузельные атомы.

117. Фоторезистивным эффектом называют:

- А. Изменение электрической проводимости вещества под воздействием электромагнитного поля.
- Б. Изменение электрической проводимости вещества под воздействием электромагнитного излучения.
- В. Изменение электрической проводимости вещества под воздействием рентгеновского излучения.
- Г. Изменение электрической проводимости вещества под воздействием электрического поля.

118. Люминесценцией называют:

- А. Электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, незначительно превышающей период световых колебаний.
- Б. Электромагнитное тепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний.
- В. Электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний.
- Г. Электромагнитное тепловое излучение, обладающее длительностью, незначительно превышающей период световых колебаний.

119. Ведущее место среди материалов занимают полупроводники:

- А. Кремний, селен, карбид кремния.
- Б. Селен, германий, карбид кремния.
- В. Кремний, германий, селен.
- Г. Кремний, германий, карбид кремния.

120. Существенным недостатком германия является:

- А. Невысокий верхний предел рабочей температуры + 70°C.
- Б. Невысокий нижний предел рабочей температуры + 70°C.
- В. Высокий верхний предел рабочей температуры + 70°C.
- Г. Высокий нижний предел рабочей температуры + 70°C.

121. Кремниевые выпрямительные плоскостные диоды могут выдерживать обратное напряжение и ток в прямом направлении:

- А. Прямые напряжения до 1500В и пропускать ток в прямом направлении до 1500А.

- Б. Обратные напряжения до 1500В и пропускать ток в прямом направлении до 1500А.
- В. Обратные напряжения до 1500В и пропускать ток в обратном направлении до 1500А.
- Г. Обратные напряжения до 1000В и пропускать ток в прямом направлении до 1000А.

122. Кремниевые стабилитроны в зависимости от степени легирования материала имеют:

- А. Напряжение стабилизации от 3 до 800В.
- Б. Напряжение стабилизации от 3 до 1000В.
- В. Напряжение стабилизации от 3 до 400В.
- Г. Напряжение стабилизации от 0,3 до 400В.

123. Существенным достоинством германия является:

- А. Высокий верхний предел рабочей температуры + 200°C.
- Б. Высокий верхний предел рабочей температуры + 150°C.
- В. Высокий верхний предел рабочей температуры + 100°C.
- Г. Высокий верхний предел рабочей температуры + 250°C.

124. Для создания светодиодов используется способность карбида кремния к:

- А. Регенерации света.
- Б. Люминесценции.
- В. Фотопроводимости.
- Г. Поглощению света.

125. Светодиоды работают на принципе:

- А. Инжекционной электромагнитной люминесценции.
- Б. Инжекционной магнитной люминесценции.
- В. Инжекционной люминесценции.
- Г. Инжекционной электрической люминесценции.

126. Варисторы, высокотемпературные нагреватели изготавливают на основе:

- А. Твердого карбида кремния.
- Б. Порошкообразного карбида кремния.
- В. Порошкообразного кремния.
- Г. Твердого кремния.

Тема 4 Диэлектрические и электроизоляционные материалы

127. Поляризацией диэлектрика называют:

- А. Состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента в любом его объеме.
- Б. Состояние диэлектрика, характеризующееся наличием магнитного момента в любом его объеме.
- В. Состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента в некотором его объеме.

128. У диэлектриков основными видами поляризации являются:

- А. Электронная, ионная, молекулярная, дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная поляризации.
- Б. Электронная, ионная, дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная поляризации.
- В. Электронная, ионная, дипольная, дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная поляризации.
- Г. Электронная, мюонная, дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная поляризации.

129. У диэлектриков дополнительными видами поляризации являются:

- А. Электронно-релаксационная, ионная, миграционная, резонансная и спонтанная поляризации.
- Б. Электронно-релаксационная, молекулярная, миграционная, резонансная и спонтанная поляризации.
- В. Электронно-релаксационная, миграционная, резонансная и спонтанная поляризации.
- Г. Электронно-релаксационная, молекулярная, миграционная, резонансная поляризации.

130. Электронной поляризацией называют:

- А. Упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов.
- Б. Смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов.
- В. Упругое смещение или деформацию электронных оболочек атомов и ионов.
- Г. Упругую деформацию электронных оболочек атомов и ионов.

131. Ионной поляризацией называют:

- А. Смещение упруго связанных ионов на расстояния, большие, чем период решетки.

- Б. Смещение упруго связанных ионов на расстояния, меньшие, чем период решетки
- В. Смещение упруго связанных электронов на расстояния, меньшие, чем период решетки.
- Г. Смещение упруго связанных молекул на расстояния, меньшие, чем период решетки.

132. Дипольно-релаксационной поляризацией называют:

- А. Частичную ориентацию дипольных молекул, находящихся в хаотическом тепловом движении, под действием поля.
- Б. Частичную ориентацию молекул, находящихся в хаотическом тепловом движении, под действием поля.
- В. Ориентацию дипольных молекул, находящихся в хаотическом тепловом движении, под действием поля.

133. Электронно-релаксационной поляризацией называют:

- А. Возникновение возбужденных тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов и дырок.
- Б. Возникновение возбужденных тепловой энергией электронов или дырок.
- В. Возникновение возбужденных тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок.

134. Сегнетоэлектриками называются:

- А. Полупроводники, обладающие самопроизвольной поляризацией.
- Б. Проводники, обладающие самопроизвольной поляризацией.
- В. Магниты, обладающие самопроизвольной поляризацией.
- Г. Диэлектрики, обладающие самопроизвольной поляризацией.

135. Водород, бензол, парафин, сера, полиэтилен являются:

- А. Полярными диэлектриками.
- Б. неполярными и полярными диэлектриками.
- В. неполярными диэлектриками.

136. Нитробензол, кремнийорганические соединения, эпоксидные компаунды являются:

- А. неполярными диэлектриками.
- Б. Полярными диэлектриками.
- В. неполярными и полярными диэлектриками.

137. Поляризация газов незначительна вследствие:

- А. Больших расстояний между электронами.
- Б. Малых расстояний между молекулами.

- В. Больших расстояний между ионами.
- Г. Больших расстояний между молекулами.

138. Значение относительной диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей определяется:

- А. Ионной поляризацией.
- Б. Электронной поляризацией.
- В. Дипольной поляризацией.
- Г. Резонансной поляризацией.

139. В твердых диэлектриках возможны:

- А. Электронная поляризация.
- Б. Ионная поляризация.
- В. Все виды поляризации.
- Г. Резонансная поляризация.

140. Токами абсорбции называют:

- А. Токи смещения при различных видах замедленной поляризации.
- Б. Токи перемещения при различных видах замедленной поляризации.
- В. Токи утечки при различных видах поляризации.
- Г. Токи смещения при различных видах поляризации.

141. К возникновению токов сквозной электропроводности в диэлектрике приводит наличие:

- А. Большого числа свободных зарядов, и инжекция их из электродов.
- Б. Небольшого числа свободных зарядов, и инжекция их из электродов.
- В. Небольшого числа свободных зарядов, и инжекция их из катодов.
- Г. Большого числа свободных зарядов, и инжекция их из анодов.

142. Полной плотностью тока в диэлектрике называется:

- А. Сумма плотностей абсорбционного и поляризационного токов.
- Б. Сумма плотностей десорбционного и сквозного токов.
- В. Сумма плотностей абсорбционного и сквозного токов.
- Г. Сумма плотностей абсорбционного и сквозного токов.

143. Удельным поверхностным сопротивлением диэлектрика называют:

- А. Сопротивление квадрата поверхности, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата
- Б. Сопротивление круглой поверхности, если ток проходит через две противоположные стороны этого круга.
- В. Сопротивление треугольной поверхности, если ток проходит через две противоположные стороны этого треугольника.

144. Электропроводность диэлектриков зависит от:

- А. Их агрегатного состояния, объема и температуры окружающей среды.
- Б. Их агрегатного состояния, влажности и температуры окружающей среды.
- В. Их агрегатного состояния, влажности и температуры.
- Г. Их агрегатного состояния, воды и температуры окружающей среды.

145. Ионизацию газа вызывают внешние факторы:

- А. Ультрафиолетовые и космические лучи, радиоактивное излучение, а также термическое воздействие.
- Б. Рентгеновские и космические лучи, радиоактивное излучение, а также термическое воздействие.
- В. Рентгеновские, ультрафиолетовые и космические лучи, радиоактивное излучение, а также термическое воздействие.
- Г. Рентгеновские, ультрафиолетовые и космические лучи, радиоактивное излучение.

146. Электропроводность в неполярных жидкостях определяется:

- А. Наличием ассоциированных примесей, в том числе влаги.
- Б. Отсутствием ассоциированных примесей, в том числе влаги.
- В. Отсутствием диссоциированных примесей, в том числе влаги.
- Г. Наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги.

147. Электропроводность в полярных жидкостях зависит от:

- А. Примесей и диссоциации молекул самой жидкости.
- Б. Диссоциации молекул самой жидкости.
- В. Примесей молекул самой жидкости.
- Г. Примесей или диссоциации молекул самой жидкости.

148. Электропроводность диэлектрика обусловлена:

- А. Передвижением ионов самого диэлектрика или ионов случайных примесей.
- Б. Передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов примесей.
- В. Передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей.
- Г. Передвижением электронов самого диэлектрика, так и электронов случайных примесей.

149. Ионная электропроводность в диэлектрике сопровождается:

- А. Переносом электронов на электроды.
- Б. Переносом вещества на электроды.
- В. Переносом примесей на электроды.

Г. Переносом случайных примесей на электроды.

150. Закон Ома для заряда в диэлектрике соблюдается при:

А. Невысоких напряженностях электрического поля, когда концентрация и подвижность заряда не зависят от напряженности

Б. Высоких напряженностях электрического поля, когда концентрация и подвижность заряда не зависят от напряженности

В. Невысоких напряженностях электрического поля, когда концентрация и подвижность заряда зависят от напряженности.

Г. Высоких напряженностях электрического поля, когда концентрация и подвижность заряда зависят от напряженности.

151. Электропроводность в телах кристаллического строения с ионной решеткой связана с:

А. Ковалентностью ионов.

Б. Валентностью электронов.

В. Ковалентностью электронов.

Г. Валентностью ионов.

152. Электропроводность в телах кристаллического строения с молекулярной решеткой связана с:

А. Примесями.

Б. Отсутствием примесей.

В. Валентностью примесей.

Г. Ковалентностью примесей.

153. Наличие у твердых пористых диэлектриков влаги приводит к:

А. Незначительному увеличению удельной электропроводимости.

Б. Значительному увеличению удельной электропроводимости.

В. Значительному увеличению удельного электросопротивления.

Г. Незначительному увеличению удельного электросопротивления.

154. В твердых диэлектриках при больших напряженностях электрического поля происходит:

А. Появление ионного электрического тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, в результате чего наблюдается отступление от закона Ома.

В. Появление электронного электрического тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, в результате чего наблюдается отступление от закона Ома.

В. Появление электронного электрического тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, в результате чего не наблюдается отступление от закона Ома.

Г. Появление ионного электрического тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, в результате чего не наблюдается отступление от закона Ома.

155. Поверхностная электропроводность в твердых диэлектриках обусловлена:

А. Наличием влаги, загрязнениями и различными дефектами поверхности диэлектрика.

Б. Отсутствием влаги, загрязнениями и различными дефектами поверхности диэлектрика.

В. Наличием влаги, отсутствием загрязнений и различными дефектами поверхности диэлектрика.

Г. Наличием влаги, загрязнениями и отсутствием дефектов поверхности диэлектрика.

156. Влага на поверхности диэлектрика приводит к:

А. Значительному электросопротивлению.

Б. Незначительным электропроводимости и электросопротивлению.

В. Незначительной электропроводимости.

Г. Значительной электропроводимости.

157. Относительная влажность окружающей среды является решающим фактором, определяющим значение:

А. Удельного поверхностного электросопротивления твердого и жидкого диэлектрика.

Б. Удельной поверхностной электропроводимости жидкого диэлектрика.

В. Удельной поверхностной электропроводимости твердого диэлектрика.

Г. Удельной поверхностной электропроводимости твердого и жидкого диэлектрика.

158. Величина удельной поверхностной проводимости диэлектрика зависит:

А. От полярности и чистоты поверхности диэлектрика.

Б. От полярности и чистоты поверхности и объема диэлектрика.

В. От поляризованности и чистоты поверхности диэлектрика.

Г. От поляризованности и чистоты объема диэлектрика.

159. Неполлярные диэлектрики относятся к:

А. Гидрофильным.

- Б. Гидрофобным.
- В. Гидрофобным и гидрофильным.
- Г. Гидрофобным и не гидрофильным.

160. К гидрофильным относятся _____ диэлектрики.

- А. неполярные и ионные
- Б. Полярные и электронные.
- В. Полярные и молекулярные.
- Г. Полярные и ионные.

161. Объемно-пористые материалы обладают:

- А. Высокой поверхностной электропроводимостью.
- Б. Высокой поверхностной и объемной электропроводимостью.
- В. Низкой поверхностной электропроводимостью.
- Г. Низкой поверхностной и объемной электропроводимостью.

162. Промывку водой с последующей просушкой применяют с целью:

- А. Уменьшения поверхностной и объемной электропроводимости диэлектрика.
- Б. Уменьшения поверхностной электропроводимости диэлектрика.
- В. Увеличения поверхностной электропроводимости диэлектрика.
- Г. Уменьшения объемной электропроводимости диэлектрика.

163. Продолжительное кипячение в дистиллированной воде является наиболее эффективным для очистки:

Наиболее эффективным для очистки поверхности нагревостойкого изделия является:

- А. Поверхности и объема нагревостойкого электротехнического материала.
- Б. Поверхности электротехнического материала.
- В. Поверхности нагревостойкого электротехнического материала.
- Г. Объемы нагревостойкого электротехнического материала.

164. Активными называют диэлектрики:

- А. Свойствами, которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий.
- Б. Свойствами и характеристиками, которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий
- В. Свойствами, которых можно управлять с помощью внешних и внутренних энергетических воздействий.
- Г. Свойствами, которых можно управлять с помощью внутренних энергетических воздействий.

165. Сегнетоэлектриками называют вещества обладающие:

- А. Поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля.
- Б. Спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля.
- В. Спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего магнитного поля.
- Г. Спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешних электрического и магнитного полей.

166. Домены представляют собой:

- А. Микроскопические области, обладающие самопроизвольной поляризацией.
- Б. Макроскопические области, обладающие не спонтанной поляризацией.
- В. Микроскопические области, обладающие спонтанной и самопроизвольной поляризацией.
- Г. Макроскопические области, обладающие спонтанной поляризацией.

167. Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют явление:

- А. Поляризации диэлектрика под действием механических напряжений.
- Б. Поляризации проводника под действием механических напряжений.
- В. Поляризации магнита под действием механических напряжений.
- Г. Поляризации диэлектрика и магнита под действием механических напряжений.

168. Пироэлектрическим эффектом называют явление:

Явление спонтанной поляризованности диэлектриков при изменении температуры называют:

- А. Спонтанной поляризованности диэлектриков при изменении температуры и давления.
- Б. Спонтанной поляризованности диэлектриков при изменении температуры.
- В. Спонтанной поляризованности диэлектриков при изменении температуры и освещения.
- Г. Спонтанной поляризованности диэлектриков при изменении давления и освещения.

169. Электретом называют тело из диэлектрика:

Тело из диэлектрика, длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле, называют:

- А. Длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое и магнитное поля.

- Б. Долительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве магнитное поле.
- В. Долительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле.
- Г. Кратковременно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле.

170. Жидкими кристаллами называют вещества которые находятся в:

- А. Промежуточном состоянии между изотропной жидкостью и твердым кристаллическим телом.
- Б. Промежуточном состоянии между не изотропной жидкостью и твердым кристаллическим телом.
- В. Промежуточном состоянии между изотропным газом и твердым кристаллическим телом.
- Г. Промежуточном состоянии между изотропным газом и жидкостью.

Тема 5 Магнитные материалы

171. По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на группы:

- А. Диамагнетики, парамагнетики, анти парамагнетики, ферромагнетики, анти-ферромагнетики.
- Б. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферромагнетики.
- В. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, ферромагнетики и анти-ферромагнетики.
- Г. Магнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферромагнетики.

172. К ферромагнетикам относят вещества с:

- А. Большой отрицательной магнитной восприимчивостью, которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.
- Б. Малой положительной магнитной восприимчивостью, которая не зависит от напряженности магнитного поля и температуры.
- В. Малой отрицательной магнитной восприимчивостью, которая не зависит от напряженности магнитного поля и температуры.
- Г. Большой положительной магнитной восприимчивостью, которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

173. Антиферромагнетиками являются вещества у которых:

Вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки являются:

А. Ниже некоторой температуры спонтанно возникает параллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки.

Б. Ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки.

В. Выше некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки.

Г. Выше некоторой температуры спонтанно возникает параллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки.

174. К ферримагнетикам относят вещества:

А. Магнитные свойства, которых обусловлены некомпенсированным антиферромагнетизмом

Б. Магнитные свойства, которых обусловлены некомпенсированным парамагнетизмом.

В. Магнитные свойства, которых обусловлены некомпенсированным диамагнетизмом.

Г. Магнитные свойства, которых обусловлены некомпенсированным ферромагнетизмом.

175. К магнитомягким относят магнитные материалы с:

А. Большой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью.

Б. Большой коэрцитивной силой и невысокой магнитной проницаемостью.

В. Малой коэрцитивной силой и невысокой магнитной проницаемостью.

Г. Малой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью.

176. К магнитотвердым относят магнитные материалы с:

А. Малой коэрцитивной силой.

Б. Очень малой коэрцитивной силой.

В. Большой коэрцитивной силой.

Г. Средней коэрцитивной силой.

177. Пермаллоями называют железоникелевые сплавы, обладающие:

А. Большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и очень маленькой коэрцитивной силой.

- Б. Большой магнитной проницаемостью в области сильных полей и очень маленькой коэрцитивной силой.
- В. Большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и очень большой коэрцитивной силой.
- Г. Большой магнитной проницаемостью в области сильных полей и очень большой коэрцитивной силой.

178. Магнитный материал, используемый в переменных полях, должен иметь как можно меньшие потери на перемагничивание, которые складываются из потерь на:

- А. Гистерезис, вихревые токи и электрическое последствие.
- Б. Гистерезис, вихревые токи и магнитное последствие.
- В. Гистерезис, вихревые токи, магнитное и электрическое последствие.
- Г. Гистерезис, вихревые потоки и магнитное последствие.

179. Среди элементарных ферромагнетиков железо обладает наибольшей _____

180. Примеси слабо влияют на магнитные свойства железа, если их концентрация ниже предела _____

181. Свойства элементарного ферромагнетика - железа зависят от:

- А. Содержания примесей, размера зерен, наличия механических напряжений.
- Б. Содержания примесей, структуры материала, наличия механических напряжений.
- В. Содержания примесей, структуры материала, размера зерен, наличия механических напряжений.
- Г. Содержания примесей, структуры материала, размера зерен, наличия электрических напряжений.

182. Промышленные марки электротехнической стали содержат не более _____% кремния

183. Свойства стали улучшаются за счет образования магнитной _____ при холодной прокатке и последующего отжига в водороде.
текстуры

184. Эффективное использование текстурованных сталей возможно лишь при такой конструкции магнитопровода, при которой магнитный поток целиком проходит вдоль направления _____ намагничивания.

185. Применение ленточных сердечников из текстурованной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на _____ процентов.

186. Использование листовых и ленточных сердечников из электротехнической стали на частотах выше 1кГц возможно лишь при ограничении магнитной _____.

187. Магнитные свойства пермаллоев чувствительны к внешним _____ напряжениям, зависят от химического состава и наличия инородных примесей в сплаве.

188. Стоимость пермаллоев определяется содержанием в их составе _____

189. Тройной сплав железа с кремнием и алюминием называют _____

190. Ферриты представляют собой оксидные магнитные материалы, у которых спонтанная намагниченность доменов обусловлена некомпенсированным _____

191. Чтобы не было ухудшения магнитных характеристик, ферриты следует оберегать от _____ нагрузок.

192. Суммарные потери мощности в магнитодиэлектрике определяются потерями на:

А. Гистерезис, электрическое последствие, вихревые токи и диэлектрическими потерями в электроизоляционной связке.

Б. Гистерезис, магнитное последствие, индукционные токи и диэлектрическими потерями в электроизоляционной связке.

В. Гистерезис, магнитное последствие, вихревые токи и электрическими потерями в изоляционной связке.

Г. Гистерезис, магнитное последствие, вихревые токи и диэлектрическими потерями в электроизоляционной связке.

193. Магнитные свойства магнитотвердых материалов зависят от кристаллографической и магнитной _____

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Проводниковые и магнитные материалы: монография. М.: Изд-во РГОТУПС, 2006. – 140с.
2. Справочник электрика для профи и не только... Современные технологии XXI века / Под редакцией Корякина-Черняка СМ. - СПб: Наука и Техника, 2013. - 576 с.
3. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: учебник. 5-е изд. – СПб: Изд-во Лань, 2003. – 368с.
4. Привалов, Е. Е. Электроматериаловедение: учебное пособие / Е. Е. Привалов. – Ставрополь: СтГАУ АГРУС, 2012. – 196с.
5. Привалов, Е. Е. Электроматериаловедение: лабораторный практикум. Тесты: учебное пособие / Е. Е. Привалов. – Ставрополь: СтГАУ АГРУС, 2012. – 84с.
6. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы: учебное пособие / Е. Е. Привалов, А. В. Гальвас, Л. И. Тимошенко, С. В. Аникуев. – Ставрополь: СтГАУ АГРУС, 2011. – 192с.
7. Привалов, Е. Е. Пути реализации компетенций в модулях дисциплины «Электротехническое материаловедение» / Е. Е. Привалов // Сборник научных трудов Sworld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013» – выпуск 1. Том 14. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – ЦИТ: 113 – 0321. – С.58-60.
8. Хорольский, В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения: учебное пособие. / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. – М: Изд-во Инфра-М, 2013. - 288с.
9. Хорольский, В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения: учебное пособие. / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. – Ставрополь: АГРУС, 2013. - 256с.
10. Хорольский, В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения: учебное пособие. / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. – Ростов-на-Дону: Изд-во Terra Принт, 2010. - 320с.
11. Привалов, Е.Е. Диагностика и тепловизионный контроль электроэнергетического оборудования: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 36с.
12. Привалов, Е.Е. Диагностика внешней изоляции электроэнергетического оборудования: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 40с.
13. Привалов, Е.Е. Диагностика вентильных разрядников электроэнергетического оборудования: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 38с.

14. Привалов, Е.Е. Диагностика масляных выключателей электроэнергетического оборудования: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 38с.
15. Привалов, Е.Е. Диагностика асинхронных двигателей электроэнергетического оборудования: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 38с.
16. Привалов, Е.Е. Диагностика оборудования силовых масляных трансформаторов: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 42с.
17. Привалов, Е.Е. Диагностика оборудования воздушных линий электропередач: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 38с.
18. Привалов, Е.Е. Диагностика оборудования кабельных линий электропередач: учебное пособие. / Е.Е. Привалов. – Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. - 32с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ РЕСУРСОВ СЕТИ ИНТЕРНЕТ

<http://window.edu.ru/>
<http://forca.ru/>
<http://elsit.ru/>
<http://anytech.narod.ru/>
<http://rza.org.ua/>
<http://stgau.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОУДОВАНИЯ	
1.1. Классификация, области применения и требования к материалам электроэнергетического оборудования	5
1.2. Особенности строения твердых тел	8
1.3. Механические свойства электротехнических материалов	12
1.4. Виды химической связи материалов	15
1.5. Энергетические зоны и уровни твердых материалов	22
1.6. Энергетические зоны электротехнических материалов	25
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	29
ГЛАВА 2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
2.1. Классификация проводниковых материалов	30
2.2. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников	30
2.3. Влияние примесей и структурных дефектов на удельное сопротивление металлов	34
2.4. Контактные явления в проводниках	36
2.5. Свойства проводниковых материалов	38
2.6. Сверхпроводящие металлы и сплавы	45
2.7. Сплавы высокого сопротивления	48
2.8. Сплавы для термопар	49
2.9. Металлы со средним значением температуры плавления	50
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	52
ГЛАВА 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
3.1. Классификация полупроводниковых материалов	53
3.2. Физические процессы в полупроводниках	55
3.3. Свойства полупроводников различного типа	60
3.4. Оптические и фотоэлектрические явления	65
3.5. Свойства германия	69
3.6. Свойства кремния	73
3.7. Свойства карбида кремния	76
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	79

4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	
4.1. Классификация диэлектриков	81
4.2. Поляризация диэлектриков	83
4.3. Электропроводимость диэлектриков	95
4.4. Диэлектрические потери	104
4.5. Зависимость диэлектрических потерь от агрегатного состояния материала	112
4.6. Пробой электроизоляционных материалов	116
4.7. Пассивные диэлектрические материалы	127
4.8. Активные диэлектрики	148
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	161
5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
5.1. Магнитные свойства веществ	162
5.2. Классификация веществ по магнитным свойствам	164
5.3. Природа ферромагнитного состояния материалов	166
5.4. Процессы при намагничивании ферромагнетиков	169
5.5. Влияние температуры на магнитные свойства ферромагнетиков	174
5.6. Поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях	175
5.7. Магнитные материалы электроэнергетического оборудования	178
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	191
ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	192
ТЕСТЫ	
Тема 1 Электротехнические материалы на основе металлов	195
Тема 2 Проводниковые материалы	203
Тема 3 Полупроводниковые материалы	215
Тема 4 Диэлектрические и электроизоляционные материалы	218
Тема 5 Магнитные материалы	226
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	230
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ РЕСУРСОВ СЕТИ ИНТЕРНЕТ	231

Привалов Евгений Евграфович

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

Публикуется в авторской редакции

Подписано в печать 15.01.2015. Формат 60/84. Бумага офсетная.
Заказ № 0021. Усл. печ. листы 14,5. Тираж 100. Цена договорная.

Отпечатано в цеху оперативной полиграфии СНИИЖК.
г. Ставрополь, пер. Зоотехнический 15.