

Н.Д. Агеева, Н.Г. Винаковская, В.Н. Лифанов

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие

Владивосток

2006

Федеральное агентство по высшему образованию Российской Федерации
Дальневосточный государственный технический университет

(ДВПИ им. В.В. Куйбышева)

Н.Д. Агеева, Н.Г. Винаковская, В.Н. Лифанов

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

Рекомендовано Дальневосточным
региональным учебно-методическим
центром (УМО) в качестве учебного
пособия для студентов электротехнических
специальностей

Владивосток

2006

УДК 621. 3. 002 3 (035. 5)

Агеева Н. Д., Винаковская Н.Г , Лифанов В. Н Электротехническое материаловедение: Учеб. пособие.- Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006.-76 с.

Рассматриваются основы физических явлений, происходящих в диэлектриках и проводниках, а также наиболее распространенные в электротехнике типы проводников. Приводятся способы разрушающих и не разрушающих электрических испытаний изоляционных материалов.

Ответственный редактор канд. техн. наук Н.Г. Старовойтов
Рецензенты: д.-р. техн. наук П.С. Гордиенко (ДВО РАН),
канд. техн. наук Е. В. Король

ISBN 5-7596-0095-8

© Издательство ДВГТУ, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время новые электротехнические материалы создаются в результате как глубокого изучения физико-технических характеристик, так и совершенствования технологии изготовления и широкого использования новых, ранее не применяемых в технике видов сырья. На первое место в отечественной электротехнике ставится быстрое усовершенствование качества материалов, правильный их выбор, когда они используются как проводники, диэлектрики, полупроводники или магнитные материалы. Поэтому для понимания электрических, химических и механических свойств материалов, а также других особенностей надо исследовать их структуру и состав. Сочетание основных требований с реальными возможностями производства обеспечивают качество материалов, их технологичность и высокие параметры. Дальнейшая разработка нужных промышленности электротехнических материалов возможна после изучения программы курс «Электротехническое материаловедение».

В учебное пособие включены разделы, разработанные по различным источникам: основным учебникам, справочникам и некоторым научно-исследовательским разработкам. В пособии обращено внимание на физические процессы и явления, протекающие в электротехнических материалах, дается большой перечень номенклатуры проводниковых, а также приведен раздел «Испытания диэлектриков», который позволяет познакомиться с контролем изоляции за ее качеством в эксплуатации с помощью высоковольтных установок.

Авторы благодарны сотрудникам, принимавшим участие в составлении и редакции учебного пособия.

ВВЕДЕНИЕ

Цивилизация и материаловедение по определению американского ученого Хиппеля – это каменный век 10^6 лет до нашей эры (палеолит, мезолит, неолит), медный век 1800 лет до нашей эры, бронзовый век 700 лет до нашей эры, железный век наша эра, XX век, век бумаги и пластмасс.

Наука об электроматериалах изучает свойства, состав и структуру, чтобы влиять на различные факторы материала и прогнозировать материалы с учетом качества и срока службы для надежности оборудования. Электротехнический материал в широком смысле – любой материал в производстве электротехнических изделий, в узком смысле – имеющий специальные свойства в отношении электромагнитного поля.

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА. Все известные вещества состоят из элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов. Из протонов и нейтронов состоят атомные ядра, электроны заполняют оболочки атома, комплектуя + заряд ядра. В квантовой механике движение электрона описывается волновой функцией, обладающей в изолированном атоме сферической симметрией, так что заряд электрона диффузно распределен, образуя радиальное облако.

В веществах объединение нескольких атомов в молекулу достигается за счет электронов, становящихся общими для всех атомов. При этом плотность электронного облака между положительно заряженными ядрами становится наибольшей, что связывает их молекулу – это **ковалентная связь**. В соответствии с симметричным и асимметричным строением молекулы с ковалентной связью могут быть нейтральные рисунок 0.1 и полярные (дипольными) рисунок 0.2. Если центры положительных и отрицательных зарядов в электрическом поле совпадают по направлению силовых линий, то молекулы нейтральные. Если центры зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга, то такие молекулы называются полярными или дипольными. Эти молекулы характеризуются величиной дипольного момента равного произведению заряда на расстояние между центрами + и – зарядов.

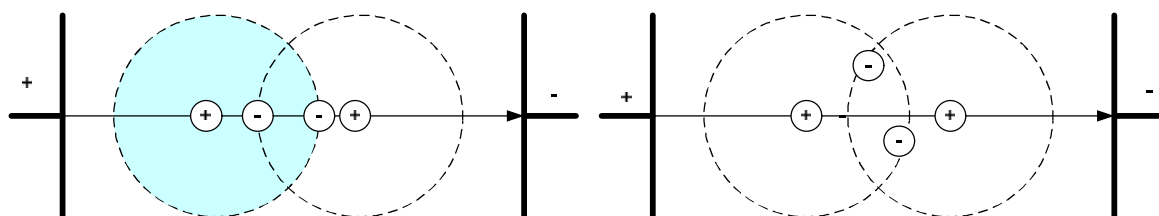


Рис. 0.1. Нейтральная ковалентная связь

Рис. 0.2. Полярная ковалентная связь

С ковалентной связью, например, молекула хлора Cl_2 , наблюдается эта связь и у кристаллических веществ неорганического происхождения, решетки которых построены из атомов, например алмаз.

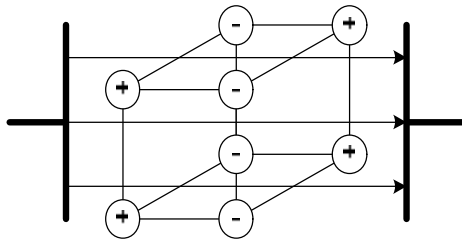


Рис.0.3. Плотная упаковка ионной связи

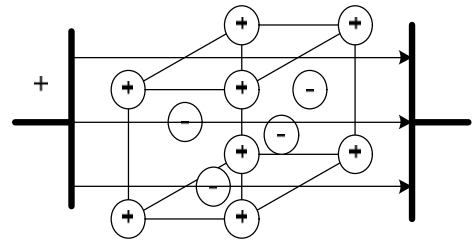


Рис.0.4. Не плотная упаковка ионной связи

Ионная связь – определяется силами притяжения между \oplus и \ominus ионами. Твердые тела ионной структуры характеризуются повышенной механической прочностью и относительно высокой температурой плавления. Такими являются коллоидные соли щелочных металлов. В структуре хлорного натрия плотная упаковка ионов рисунок 0.3, а у хлорного цезия – не плотная упаковка рисунок 0.4

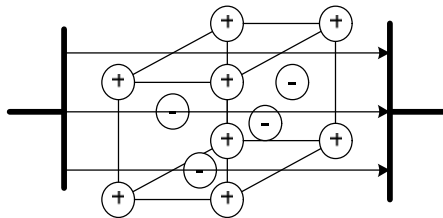


Рис.0.5. Металлическая связь

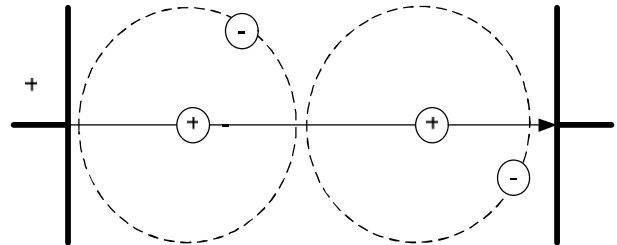


Рис.0.6.Связь Ван-дер-Ваальса

Металлическая связь, приводящая также к образованию твердых кристаллических тел. Металлы рассматриваются как системы, построенные из \oplus ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки и удерживающие среду свободных электронов рисунок 0.5. Наличие свободных электронов приводит к высокой электропроводности и теплопроводности металла, а также является причиной блеска металла при срезе. Ковкость металла объясняется перемещением и скольжением отдельных слоев ионов. Некоторые одновалентные металлы кристаллизуются в гексагональной и кубической решетках.

Наиболее слабой связью является **остаточная связь** или **связь Ван-дер-Ваальса** рисунок 0.6. Это вещества, как парафин, имеющий низкую температуру плавления, с непрочной кристаллической молекулярной решеткой.

По **зонной теории** строения вещества все тела, в зависимости от их электрических свойств, могут быть отнесены к группе диэлектриков, полупроводников и проводников. Энергетическая диаграмма зонной теории твердых тел наглядно показывает различие между ними по рисункам 0.7 - 0.9. Если отсутствует электрическое поле, то нет наклона уровней энергетических зон: зоны проводимости 1, нормальной зоны 2 и широкий потенциальный барьер, что характерно для диэлектриков рисунок 0.7. Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то чем выше напряженность поля, тем выше

наклон уровней зон и уже потенциальный барьер рисунок 0.8, причем минимальна энергия электрона, когда он находится на нижнем уровне зоны проводимости или на верхнем уровне нормальной зоны. Свободным электроном (способным возбудить нейтральную молекулу до акта ионизации) считают тот электрон, который в результате столкновений в электрическом поле достиг верхнего уровня зоны проводимости 1 или нижнего уровня нормальной зоны 3. Для полупроводников характерен узкий потенциальный барьер рисунок 0.9, а для проводников – нет потенциального барьера, поэтому электроны в металле свободны и могут переходить с уровня нормальной (заполненной) зоны на незанятые уровни зоны проводимости (свободной) под влиянием слабых напряженностей приложенного к проводнику электрического поля.

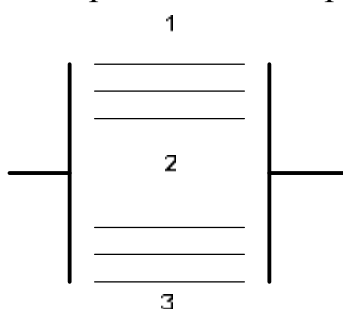


Рис.0.7. Диэлектрик без электрического поля

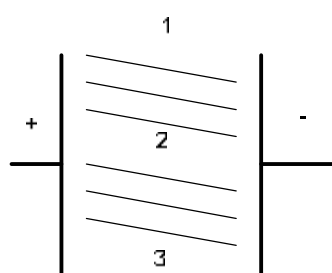


Рис.0.8. Диэлектрик в электрическом поле

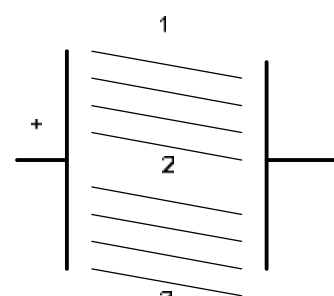


Рис.0.9. Полупроводник в электрическом поле

КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛА. Диэлектрики различают на газообразные, жидкие и твердые, которые могут быть природными и синтетическими, а также органическими и неорганическими. По размерам молекулы делятся на низкомолекулярные и высокомолекулярные, по форме молекул и поведению при температуре – на термопластические и термореактивные, по электрическим свойствам классифицируются на полярные и неполярные, из-за широкой запрещенной зоны нет электронной электропроводности. **Проводники** могут быть классическими, криопроводниками и сверхпроводниками, в которых система кристаллической решетки состоит из узлов с \oplus ионом, находящихся в среде свободных электронов, последние определяют высокую электропроводность и теплопроводность проводников. **Полупроводники** классифицируются на химические элементы (простые) и химические соединения (сложные), причем последние по количеству составляющих могут быть: двухэлементные (бинарные), трехэлементные и многоэлементные; по типу электропроводности: типа n – электронная проводимость, типа p – «дырочная» проводимость; различают органические и неорганические, а по характеру электропроводности – электронные и ионные; по структуре - кристаллические и аморфные. **Магнитные материалы** по своим физическим свойствам делятся на ферромагниты и ферримагниты (ферриты), по применению – магнитотвердые и магнитомягкие, последние выделяются с прямоугольной петлей гистерезиса и с постоянной магнитной проницаемостью; слабомагнитные материалы – это диамагнетики $\mu \leq 1$ и парамагнетики $\mu \geq 1$, сильномагнитные $\mu \gg 1$, которые зависят от напряженности магнитного по-

ля (железо, никель, кобальт, сплавы (хром-марганец ит.п.)) и с $\mu \ll 1$, не зависящие от магнитного поля (медь, цинк, серебро, золото, висмут, ртуть)

ГЛАВА 1. ДИЭЛЕКТРИКИ

1.1 Общие положения

Согласно ГОСТ-19880-74 диэлектрик – вещество, основным свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле. Диэлектрические материалы по ГОСТ 21515 -76 – это материалы, предназначенные для использования их диэлектрических свойств. Процесс поляризации заключается в изменении расположения в пространстве частиц диэлектрика, имеющих электрические заряды, при приложении к диэлектрику электрического поля. После снятия поля частицы возвращаются в исходное состояние. При приложении электрического поля диэлектрик приобретает наведенный электрический момент, и в конденсаторе, образованном диэлектриком и электродами, образуется электрический заряд

$$Q = C U,$$

где Q - электрический заряд, Кл; C - электрическая емкость конденсатора, Ф; U - приложенное напряжение, В.

Энергия электрического поля, Дж, запасенная на участке изоляции, определяется как

$$W = Q U / 2 = C U^2 / 2.$$

При приложении к диэлектрику переменного синусоидального напряжения через участок изоляции, емкостью C (Ф) проходит емкостной ток

$$I = U \omega C = 2 \pi f C,$$

где U - действующее значение приложенного напряжения, В; f - частота, Гц; ω - угловая частота, рад/с.

При параллельном включении n конденсаторов их результирующая емкость C_p равна сумме емкостей каждого отдельного конденсатора, а при последовательном их соединении результирующая емкость C_s определится как

$$1/C_s = \sum (1/C_s).$$

При последовательном соединении емкость C_s меньше, чем емкость каждого отдельного конденсатора, а при параллельном включении C_p будет больше, чем емкость каждого отдельного конденсатора или равна их сумме.

1.2. Поляризация диэлектриков

Поляризация – это ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул в электрическом поле. Под влиянием силовых линий электрического поля заряды диэлектрика смещаются по направлению действующих сил в зависимости величины напряженности. При отсутствии электрического поля заряды возвращаются в прежнее состояние.

Различают два вида поляризации: поляризация мгновенная, вполне упругая, без выделения энергии рассеяния, т.е. без выделения тепла, за время $10^{-15} - 10^{-13}$ с; поляризация не совершается мгновенно, а нарастает или убывает замедленно и сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике, т.е. его нагревает - это релаксационная поляризация за время от 10^{-8} до 10^2 с.

К первому виду относятся электронная и ионная поляризации.

Электронная поляризация (C_e, Q_e) – упругое смещение и деформация электронных оболочек атомов и ионов за время 10^{-15} с. Наблюдается такая поляризация для всех видов диэлектриков и не связана с потерей энергии, а диэлектрическая проницаемость вещества численно равна квадрату показателя преломления света n^2 .

Ионная поляризация ($C_{и}, Q_{и}$) характерна для твердых тел с ионным строением и обуславливается смещением (колебанием) упруго связанных ионов в узлах кристаллической решетки за время 10^{-13} с. С повышением температуры смещение усиливается и в результате ослабления упругих сил между ионами, а температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ионных диэлектриков оказывается положительным.

Ко второму виду относят все релаксационные поляризации.

Дипольно-релаксационная поляризация ($C_{др}, r_{др}, Q_{др}$) связана с тепловым движением диполей при полярной связи между молекулами. Поворот диполей в направлении электрического поля требует преодоления некоторого сопротивления, выделения энергии в виде тепла ($r_{др}$). Время релаксации здесь порядка $10^{-8} - 10^{-6}$ с – это промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных электрическим полем диполей после снятия поля уменьшится вследствие наличия тепловых движений в 2,7 раза от первоначального значения.

Ионно-релаксационная поляризация ($C_{ир}, r_{ир}, Q_{ир}$) наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых веществах с неплотной упаковкой ионов. Слабосвязанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотических тепловых движений получают избыточные набросы в направлении поля и смещаются по силовой линии его. После снятия электрического поля ориентация ионов ослабевает по экспоненциальному закону. Время релаксации, энергия активации и частота собственных колебаний происходит в течение $10^{-6} - 10^{-4}$ с и связано законом

$$\tau_0 = \frac{1}{2f} e^{\frac{\omega}{kT}}, \text{ с,}$$

где f – частота собственных колебаний частиц; ω - энергия активации; k – постоянная Больцмана ($8,63 \cdot 10^{-5}$ ЭВ/град); T – абсолютная температура по К⁰.

Электронно - релаксационная поляризация ($C_{эп}$, $r_{эп}$, $Q_{эп}$) возникает за счет возбужденных тепловых энергий избыточных, дефектных электронов или «дырок» за время $10^{-8} - 10^{-6}$ с. Она характерна для диэлектриков с высокими показателями преломления, большим внутренним полем и электронной электропроводностью: двуокись титана с примесями, Са+2, Ва+2, ряда соединений на основе окислов металлов переменной валентности – титана, ниобия, висмута. При этой поляризации имеет место высокая диэлектрическая проницаемость и при отрицательных температурах наличие максимума в температурной зависимости ϵ (диэлектрической проницаемости). ϵ для титаносодержащей керамики уменьшается с возрастанием частоты.

Структурные поляризации различают:

Миграционная поляризация (C_m , r_m , Q_m) протекает в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях, слоях, границ раздела или наличии примесей за время порядка 10^2 с. Эта поляризация проявляется при низких частотах и связана со значительным рассеянием энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических, сложных диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т.д. На границах раздела между слоями в диэлектрике и в при электродных слоях идет накопление зарядов медленно движущихся ионов – это эффект межслоевой или структурной высоковольтной поляризации. Для сегнетоэлектриков различают **спонтанную или самопроизвольную поляризацию**, ($C_{сп}$, $r_{сп}$, $Q_{сп}$), когда идет значительное рассеяние энергии или выделение тепла за счет доменов (отдельные области, вращающихся электронных оболочек), смещающихся в электрическом поле, т. е. еще в отсутствии электрического поля в веществе есть электрические моменты, а при некоторой напряженности внешнего поля наступает насыщение и наблюдается возрастание поляризации.

Классификация диэлектриков по виду поляризации.

Первая группа – диэлектрики, обладающие электронной и ионной мгновенной поляризациями. Структура таких материалов состоит из нейтральных молекул, может быть слабополярной и характерна для твердых кристаллических и аморфных материалов таких, как парафин, сера, полистирол, а также жидкие и газообразные материалы как бензол водород и др.

Вторая группа – диэлектрики, обладающие электронной и дипольно-релаксационной поляризациями – это полярные органические жидкие, полужидкие, твердые вещества как маслоканифольные компаунды, эпоксидные смолы, целлюлоза, хлорированные углеводороды и т.п. материалы.

Третья группа – диэлектрики твердые неорганические, которые делятся на две подгруппы, отличающиеся по электрическим характеристикам – а) диэлектрики, обладающие электронной и дипольно-релаксационной поляризациями, такие как кварц, слюда, каменная соль, корунд, рутил; б) диэлектрики с электронной и ионной релаксационными поляризациями – это стекла, мате-

риалы со стекловидной фазой (фарфор, микалекс и т.п.) и кристаллические диэлектрики с неплотной упаковкой ионов.

Четвертая группа – это диэлектрики, обладающие электронной и ионной мгновенными и структурной поляризациями, что свойственно многокомпозиционным, сложным, слоистым и сегтоэлектрикам материалам.

1.3. Диэлектрическая проницаемость

О явлении поляризации судят по значению диэлектрической проницаемости ϵ . Параметр ϵ , характеризующий способность материала образовывать емкость, называется относительной диэлектрической проницаемостью. Слово “относительная” обычно опускается. Надо учесть, что электрическая емкость участка изоляции с электродами, т.е. конденсатора, зависит от геометрических размеров, конфигурации электродов и от структуры материала, образующего диэлектрик этого конденсатора.

В вакууме $\epsilon = 1$, а любого диэлектрика всегда больше 1. Если C_0 - емкость, между обкладками которого находится вакуум, произвольной формы и размеров, а C - емкость конденсатора таких же размеров и формы, но заполненного диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ , то

$$C = \epsilon C_0.$$

Обозначив через C_0 электрическую постоянную (Ф/м), равную

$$C_0 = 8,854 \cdot 10^{-12},$$

найдем абсолютную диэлектрическую проницаемость

$$\epsilon' = \epsilon_0 \cdot \epsilon.$$

Определим величины емкостей для некоторых форм диэлектриков.

Для плоского конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon S/h = 8,854 \cdot 10^{-12} \epsilon S/h.$$

где S - площадь поперечного сечения электрода, m^2 ; h - расстояние между электродами, m .

Для цилиндрического конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon 2 \pi l / \ln(d_2 / d_1) = \epsilon_0 \epsilon 2 \pi l / \ln(r_2 / r_1) = 2,42 \cdot 10^{-11} \epsilon l / \lg(r_2 / r_1),$$

где l - осевая длина, m ; d_1, r_1 - соответственно диаметр и радиус внутреннего электрода, m ; d_2, r_2 - диаметр и радиус внешнего электрода, m .

С некоторыми допущениями при $d_2 - d_1 \ll d_1$ имеем

$$C = \epsilon_0 \epsilon \pi l (d_2 + d_1) / (d_2 - d_1) = \epsilon_0 \epsilon \pi l (r_2 + r_1) / (r_2 - r_1) \\ = 2,78 \cdot 10^{-11} \epsilon l (r_2 + r_1) / (r_2 - r_1).$$

Для изоляции кабелей - системы параллельных проводов вводят понятие удельной или погонной емкости

$$K = C / l,$$

где C емкость изоляции кабеля длиной l , $мкФ$; l - длина, $км$. Размерности в этом случае другие: K - $мкФ/км = НФ/м$.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ - это оказывается отношение заряда Q , полученного при напряжении на конденсаторе, к заряду

Q_0 , который можно получить на том же конденсаторе при том же напряжении, если между электродами находится вакуум.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_g}{Q_0} = 1 + \frac{Q_g}{Q_0} = 1 + \frac{Q_{\text{э}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{др}} + Q_{\text{ир}} + Q_{\text{эр}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{сп}}}{Q_0},$$

где Q_g – заряд, который обусловлен поляризацией вещества фактически разделяющего электроды, поэтому в общем виде, структура материала определяет суммарное Q_g . ε всегда больше 1, а для вакуума равна 1

Практическое значение диэлектрической проницаемости очень велико, Она определяет не только способность материала образовывать емкость, но и входит в ряд основных уравнений, которые характеризуют физические процессы, протекающие в диэлектрике.

Диэлектрическая проницаемость газов, вследствие их малой плотности (из-за больших расстояний между молекулами) незначительна и близка к единице. Обычно поляризация газа электронная или дипольная, если молекулы полярные. ε газа тем выше, чем больше радиус молекулы. Изменение числа молекул газа в единице объема газа (n) при изменении температуры и давления вызывает изменение диэлектрической проницаемости газа. Число молекул N пропорционально давлению и обратно пропорционально абсолютной температуре.

При изменении влажности диэлектрическая проницаемость воздуха незначительно меняется прямо пропорционально изменению влажности (при комнатной температуре). При повышенной температуре влияние влажности значительно усиливается. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости характеризуется выражением

$$TK\varepsilon = 1/\varepsilon(d\varepsilon/dT).$$

По этому выражению можно вычислить относительное изменение диэлектрической проницаемости при изменении температуры на 1^0 K - так называемый температурный коэффициент ТК диэлектрической проницаемости.

Значение ТК неполярного газа находится по формуле

$$TK\varepsilon = (\varepsilon - 1)/dT.$$

где T - температура. K .

Диэлектрическая проницаемость жидкостей сильно зависит от их структуры. Значения ε неполярных жидкостей невелики и близки к квадрату показателя преломления света n^2 . Диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей, которые используются в качестве технических диэлектриков, лежит в пределах от 3,5 до 5, что заметно выше, чем у неполярных жидкостей. Так поляризация жидкостей, содержащих дипольные молекулы, определяется одновременно электронной и дипольно-релаксационной поляризациями. Сильнополярные жидкости, характеризуются высоким значением ε из-за их большой проводимости рисунок 1.1. Температурная зависимость ε в дипольных жидкостях имеет более сложный характер, чем нейтральные жидкости. Поэтому ε на частоте 50 Гц для хлорированного дифенила (савол) рисунок 1.2 быстро возрастает из-за резкого падения вязкости жидкости, а дипольные

молекулы успевают ориентироваться вслед за изменением температуры. Уменьшение ϵ происходит вследствие усиления теплового движения молекул, препятствующего их ориентации в направлении электрического поля

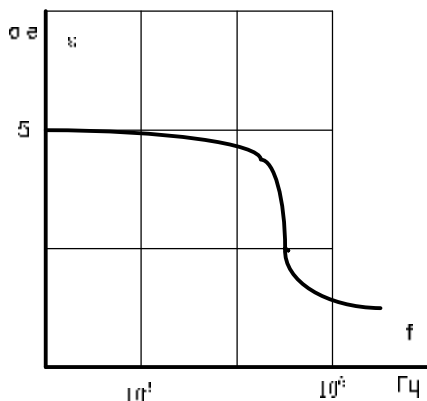


Рис.1.1. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для совола

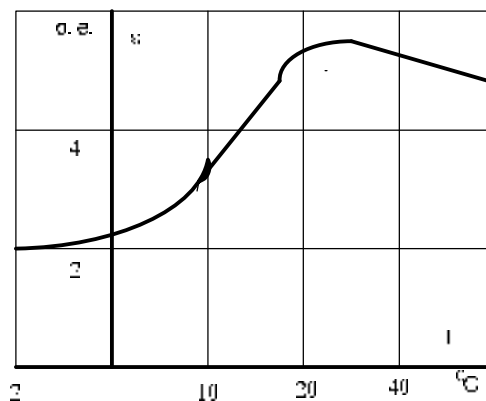


Рис.1.2. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для совола

Частота, при которой ϵ снижается находится

$$f_0 = \frac{kT}{8\pi^2\eta r^3},$$

где η -вязкость; r – радиус молекулы.

Время релаксации молекул τ_0 связано с частотой f_0 выражением

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_0}.$$

Таблица 1.1. Диэлектрической проницаемости при 20 °С и 50 Гц для полярных жидкостей

Наименование жидкости	ϵ
Касторовое масло	4,5
Совол	5
Совтол	3.2

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков, в которых возможны все виды поляризаций, имеет наименьшее значение, если структура материала построена из нейтральных молекул и обладает электронной поляризацией, тогда $\epsilon = n^2$. Температурная зависимость ϵ определяется изменением числа молекул в единице объема. Для нейтральной молекулы, неполярного парафина, снижение ϵ ожидается при температуре плавления рисунок 1.3. Для ионных кристаллов с плотной упаковкой ионов, электронной и ионной мгновенными поляризациями некоторое повышение ϵ при значительном повышении температуры, т. к. $T\kappa\epsilon > 0$ рисунок 1.4. Для ионных

кристаллов с неплотной упаковкой и электронной и ионной релаксационными поляризациями характерно небольшое изменение ϵ и положительное $T_{ке}$. При высоких температурах значительное увеличение ϵ сказывается из-за проявления релаксационных поляризаций рисунок 1.5. Для целлюлозы или полярных органических диэлектриков увеличение ϵ характерно из-за как бы отслеживания изменения температуры дипольно – релаксационной поляризацией рисунок 1.6.

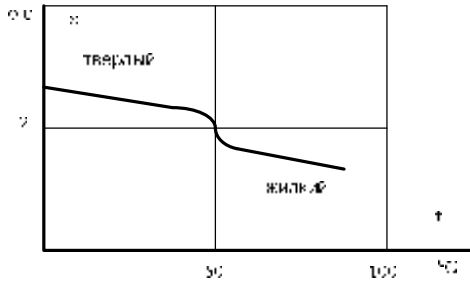


Рис.1.3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости парафина

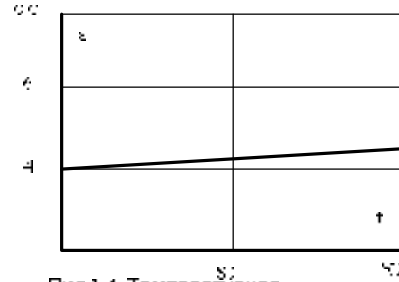


Рис.1.4. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ионного кристалла

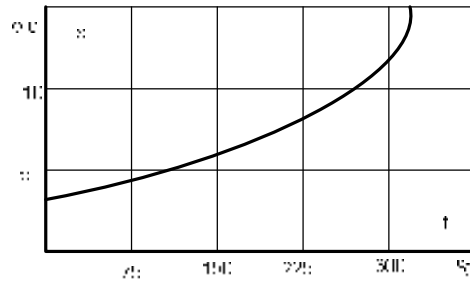


Рис. 1.5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости фарфора

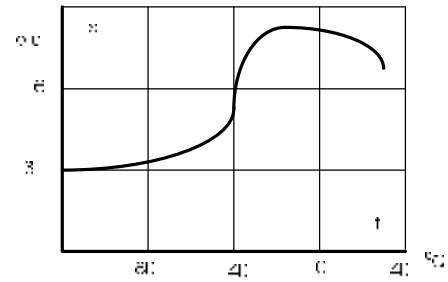


Рис.1.6. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости целлюлозы

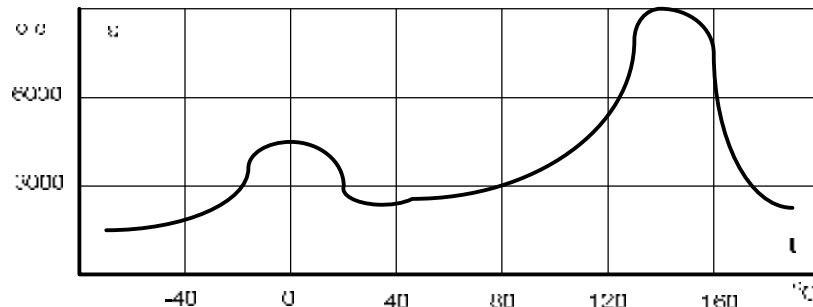


Рис.1.7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика

Для сегнетоэлектриков ϵ оказывается в прямопропорциональной зависимости от напряженности электрического поля. Падение ϵ от времени воздействия напряженности – это старение диэлектрика. Причиной старения является перегруппировка доменов, которая происходит при температурах выше точки Кюри и растет ϵ с ростом напряженности или повышении температуры до точки Кюри рисунок 1.7. Это нелинейные диэлектрики. Значение диэлектрической проницаемости важно знать для расчетов многослойных диэлектриков. Напряженность электрического поля в слоях E и напряжение на них U определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
E_1 &= \varepsilon_2 U / (h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1); \\
E_2 &= \varepsilon_1 U / (h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1); \\
U_1 &= \varepsilon_2 h_1 U / (h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1); \\
U_2 &= \varepsilon_1 h_2 U / (h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1),
\end{aligned}$$

где h_1, h_2 - толщина слоев диэлектрика; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; E_1, E_2 - напряженность поля в слоях; U_1, U_2 - напряжение, приложенное к слоям; U - полное напряжение между обкладками конденсатора.

В случае многослойного конденсатора (плоский, n слоев) будем иметь для i -го слоя

$$E = U / (\varepsilon_i \sum h_i / \varepsilon_i); \quad U_i = E_i h_i,$$

где U - полное напряжение на конденсаторе, В; $U_i, E_i, h_i, \varepsilon_i$ - соответственно напряжение, напряженность электрического поля, толщина и диэлектрическая проницаемость каждого слоя.

То есть слои диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью стремятся “разгрузиться” и переложить часть электрического напряжения на слои с меньшей проницаемостью. Особенно в тяжелых условиях оказывается воздушная прослойка между двумя слоями изоляции. Благодаря малой проницаемости и малой электрической прочности газов в них возникают частичные разряды. Кроме того, для многослойного цилиндрического конденсатора поле оказывается резко неоднородным, и напряженность в i -м слое на расстоянии x от оси конденсатора ($r_{1i} < X < r_{2i}$) зависит от значений ε_i материалов слоев:

$$E = U / (\varepsilon_i \sum L n(r_{2i} / r_{1i}) / \varepsilon_i),$$

где r_1, r_2 - соответственно внутренний и внешний радиусы i -го слоя.

В этом случае порядок слоев влияет на значение E в отдельных слоях. Чтобы получить наиболее выгодное распределение напряженностей, нужно помещать во внутренние слои многослойного цилиндрического конденсатора диэлектрики с большими ε (градирование изоляции). В неравномерном поле для уменьшения электрической нагрузки электроизоляционных материалов следует в места с наибольшим электрическим смещением помещать материалы с наибольшей ε .

Диэлектрики по виду поляризации делятся на четыре группы.

Первая группа – однокомпозиционные, однородные, чистые без добавок, диэлектрики, у которых в основном электронная поляризация или плотная упаковка ионов. К ним относятся неполярные и слабополярные твердые диэлектрики в кристаллическом или аморфном состоянии, а также неполярные и слабополярные жидкости и газы для таких материалов

$$\varepsilon < 3,0 = 1 + \frac{Q_{Э} + Q_{И}}{Q_0}.$$

Вторая группа – технические диэлектрики с электронной, ионной и одновременно с дипольно-релаксационной поляризациями. К ним относятся полярные (дипольные) органические полужидкие и твердые вещества, на-

пример маслянокани-фольные компаунды, целлюлоза, эпоксидные смолы и композиционные материалы, составленные из этих веществ, для них

$$3,0 < \epsilon < 4,5 = 1 + \frac{Q_{\text{э}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{др}}}{Q_0} .$$

Третья группа – технические диэлектрики с ионной и электронной поляризациями; диэлектрики с электронной, ионной релаксационными поляризациями делится на две подгруппы. К первой подгруппе относятся в основном кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов $\epsilon < 3,0$. Ко второй подгруппе относятся неорганические стекла и материалы, содержащие стекловидную фазу, а также кристаллические вещества с неплотной упаковкой ионов.

$$3,0 < \epsilon < 4,0 = 1 + \frac{Q_{\text{э}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{ир}} + Q_{\text{эр}}}{Q_0} .$$

Четвертую группу составляют сегнетоэлектрики, имеющие спонтанную, электронную, ионную, электронно-ионно-релаксационные поляризации, а также миграционную или высоковольтную для композиционных, сложных и слоистых материалов, для которых

$$\epsilon > 4,0 = 1 + \frac{Q_{\text{э}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{др}} + Q_{\text{ир}} + Q_{\text{эр}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{сп}}}{Q_0} .$$

1.4. Электропроводность диэлектриков

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в диэлектрике протекают во времени до момента установления равновесия и создают токи смещения. В случае электронной и ионной поляризаций эти токи практически не удается зафиксировать приборами. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые в большинстве технических диэлектриков, называют токами абсорбции. При приложении постоянного напряжения они наблюдаются при включении и выключении, меняя свое направление. Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению малых по величине сквозных токов.

Плотность тока утечки в диэлектриках определяется суммой сквозного тока и тока абсорбции (А/м^2)

$$j_{\text{ут1}} = j_{\text{ск1}} + j_{\text{абс1}} .$$

Этот ток различается как перемещение зарядов по поверхности и выразится

$$i_{\text{ут1}} = i_{\text{ск1}} + i_{\text{абс1}} .$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения

$$j_{\text{см2}} = dD / dt = j_{\text{абс2}} ,$$

где D – вектор электрического смещения, Кл/с; t – время, с.

После окончания процессов поляризации внутри структуры через диэлектрик протекает только сквозной ток. Поэтому ток смещения различается как перемещение зарядов внутри структуры диэлектрика и выразится

$$i_{cm2} = i_{ск2} + i_{абс2}.$$

На практике в случае измерения сопротивления изоляции измерение тока производят после выдержки времени в течение 1 мин, считая, что процесс замедленной поляризации уже закончился. Особенностью электропроводности диэлектриков является ее ионный (не электронный) характер. Таким образом, истинное сопротивление диэлектрика или сопротивление изоляции для электроизоляционных материалов, определяющее сквозной ток, вычисляется по формуле

$$R_{из} = \frac{U}{i_{cm} - \sum i_{абс}} = \frac{U}{i_{ск}}.$$

где U - приложенное постоянное напряжение, В; i - сумма токов абсорбции от разных видов замедленной поляризации, А.

По агрегатному состоянию все диэлектрики, как известно, делятся на твердые, жидкие и газообразные. Для твердых диэлектриков, используемых в качестве электроизоляционных материалов, различают объемную проводимость изоляции G_v , определяемую как отношение сквозного тока смещения или утечки к приложенному напряжению и поверхностную проводимость G_s , изоляции, которая характеризует наличие слоя повышенной проводимости на поверхности раздела твердой изоляции с окружающей газовой средой - это воздух, где ток зависит от состояния поверхности: увлажнения, шероховатости и загрязнения. Для сравнительной оценки объемной и поверхностной проводимостей пользуются значениями удельного объемного ρ_v и удельного поверхностного ρ_s сопротивления, определяя по ним соответствующие удельные объемную и поверхностную проводимости.

В системе СИ удельное объемное сопротивление численно равно сопротивлению куба с ребром 1 м, мысленно вырезанного из данного диэлектрика, если ток в 1 А проходит сквозь куб от одной площади грани к противоположной.

Для плоского образца в однородном электрическом поле:

$$\rho_v = \frac{U}{I_{cm}} \frac{S}{l}, [\text{Ом/м}],$$

где $\frac{U}{I_{cm}} = R_v$ - объемное сопротивление образца, Ом; S - площадь электрода или площадь грани, м²; l - толщина образца или длина ребра, м.

Удельное поверхностное сопротивление плоского диэлектрика равно сопротивлению квадрата единичных размеров, мысленно выделенного на поверхности диэлектрика, если ток в 1 А проходит через квадрат от одной его стороны к противоположной.

Удельное поверхностное сопротивление рассчитывается по формуле

$$\rho_s = \frac{U}{I_{ут}} \frac{d}{l}, [\text{Ом}],$$

где $\frac{U}{I_{ут}} = R_s$ - поверхностное сопротивление образца диэлектрика между па

параллельно поставленными электродами, Ом; l - ширина электродов, м; d – расстояние между электродами, м.

Если ток электропроводности – это сумма токов сквозной проводимости и абсорбционных токов, то ток по поверхности или по объему выразится

$$I = I_3 + I_{и} + I_{др} + I_{ир} + I_{эр} + I_{м} + I_{сп},$$

где явное перемещение в электрическом поле электронов и ионов собственной структуры, а так же диполей, ионов и электронов релаксационной поляризации и возможных поляризаций миграционной и спонтанной, составляют общий ток в диэлектрике по поверхности или по объему в зависимости от его структуры.

Таким образом, величина ρ_v окажется:

- для чистых, однокомпозиционных, однородных материалов (кристаллы, полимеры и им подобные диэлектрики) $\rho_v < 10^{15} - 10^{13}$ Ом м в зависимости от токов сквозной проводимости;
- для технических диэлектриков уже токи сквозной проводимости и от релаксационных поляризаций определяют $\rho_v < 10^{13} - 10^{10}$ Ом м;
- для сложных диэлектриков, композиционных и слоистых материалов $\rho_v < 10^{10}$ Ом м.

Эти параметры находятся при соответствующем числе слагаемых токов, протекающих по объему структуры диэлектрика.

Удельное сопротивление по поверхности ρ_s , будет зависеть от восприимчивости поверхности к влаге с учетом загрязнения и шероховатости:

- для диэлектриков с водоотталкивающей поверхностью, нерастворимой или не впитывающей влагу $\rho_s < 10^{13} - 10^{11}$ Ом;
- для диэлектриков частично поглощающих и растворяющих влагу, а также с непроводящим загрязнением $\rho_s < 10^{11} - 10^{10}$ Ом;
- для материалов поглощающих влагу или впитывающих, растворяющих ее $\rho_s < 10^9$ Ом.

Эти параметры оцениваются соответствующим числом слагаемых токов, протекающих по поверхности материала.

В эксплуатации для участка изоляции между электродами, имеющими вид двух коаксиальных цилиндров с осевой длиной l м, диаметрами внутреннего и внешнего электрода соответственно d_1 , d_2 , м (или радиусами r_1 , r_2 , м), т.е. для изоляции коаксиального кабеля или диэлектрического конденсатора, объемное сопротивление

$$R = \rho_v / (2 \pi l) \ln(d_1 / d_2) = \rho_v / (2 \pi l) \ln(r_2/r_1). \quad (1.1)$$

При $d_2 - d_1 \ll d_1$; ($r_2 - r_1 \ll r_1$) получим

$$R = \rho_v / (\pi l) (d_2 - d_1) / (d_2 + d_1) = \rho_v / (\pi l) (r_2 - r_1) / (r_2 + r_1). \quad (1.2)$$

Эти формулы справедливы, если можно пренебречь растеканием линий тока от краев электродов в часть объема изоляции, которая не охватывается электродами. Значения R лежат в пределах от 10^6 Ом для низкокачественных материалов и до $10^{15} - 10^{17}$ Ом для неполярных материалов типа фторопласта и других.

Для однородного электрического поля в материале можно использовать закон Ома в обобщенной форме, выраженной через плотность тока:

$$j = \gamma E = E / R,$$

где j - плотность тока проводимости утечки для электрической изоляции, А/м; E - напряженность электрического поля, В/м.

Для изоляционных материалов кабелей различают удельное поперечное сопротивление слоя и удельное сопротивление изоляции. Поперечное сопротивление слоя R_1 есть сопротивление участка площадью S , м² и слоя диэлектрика постоянной толщины h , м, сквозь который проходит ток.

$$R_1 = \rho h / S = r_1 S,$$

откуда определится удельное поперечное сопротивление слоя

$$\rho_1 = R_1 S = \rho h.$$

Удельное сопротивление изоляции симметричного кабеля или провода ρ_k , т.е. объемное сопротивление изоляции, например, между двумя жилами - это R , Ом, отнесенное к единице длины кабеля L , м, определяется по формуле

$$R_k = \rho_k / L, \text{ откуда } \rho_k = R_k / L.$$

Для одножильного кабеля диаметром d_1 (радиусом r_1) и внутренним диаметром металлической оболочки d_2 (r_2) можно пользоваться формулами (1.1) и (1.2). для поверхностного сопротивления в случае электродов в виде концентрических окружностей поверхностное сопротивление кольцевого зазора равно

$$R_s = \rho_s / (2 \pi) \text{Ln}(d_2 / d_1) = \rho_s / (2 \pi) \text{Ln}(r_2 / r_1),$$

где d_1 (r_1) - диаметр (радиус) внутреннего, а d_2 (r_2) - внешнего электродов.

При $d_2 - d_1 \ll d_1$ имеем

$$R_s = \rho_s / \pi (d_2 - d_1) / (d_2 + d_1) = \rho_s / \pi (r_2 - r_1) / (r_2 + r_1).$$

При длительной работе диэлектрика под напряжением ток через жидкие и твердые диэлектрики может уменьшаться или увеличиваться. В случае уменьшения тока происходит так называемая электрическая очистка образца, т.к. слабозакрепленные ионы примесей осаждаются на электродах и сквозной ток, поэтому уменьшается. Увеличение тока идет вследствие старения материала; процесс этот необратим и в конце концов может привести к пробое. Произведение сопротивления изоляции диэлектрика конденсатора и его емкости называют постоянной времени саморазряда конденсатора.

$$\tau_0 = R_{из} C$$

Значение t_0 определяют из выражения

$$U = U_0 \exp(- t / t_0),$$

приняв $t = t_0$, получим

$$U = U_0 \exp(- t_0 / t_0) = U_0 / e,$$

где U - напряжение на электродах конденсатора спустя время t после его отключения от источника напряжения, В; U_0 - напряжение, до которого заряжен конденсатор ($t = 0$), В; C - емкость конденсатора, Ф; R - сопротивление изоляции сквозному току, Ом; $e = 2,718$.

$$t_0 = R C = \rho \epsilon_0 \epsilon.$$

Таким образом, определив постоянную времени, как время, по истечении которого напряжение на выводах конденсатора после снятия поля уменьшится вследствие саморазряда в e раз ($e = 2.718\dots$), зная вид материала и его ϵ , учитывая наличие только объемного тока утечки, можно определить удельное сопротивление использованного диэлектрика. При повышении температуры удельное сопротивление диэлектриков, как правило, уменьшается:

$$TK\rho = TKR + \alpha,$$

где $\alpha = TKL$ - температурный коэффициент длины материала.

Очевидно, что

$$TK\rho_s = TKR_s.$$

Обычно для многих электроизоляционных материалов зависимость ρ от термодинамической температуры T описывается формулой

$$\rho = A \exp(B / T),$$

где A и B - постоянные. Иначе

$$L_{\rho} = \ln A + B / T$$

или

$$\rho = \alpha \exp(-b t),$$

где α и b - постоянные величины; t - температура, $^{\circ}\text{C}$.

В этом случае

$$TK\rho = -b.$$

Понятно, что условия работы изоляции при высоких температурах оказываются тяжелыми, т.к. сопротивление изоляции при этом уменьшается.

При больших напряженностях электрического поля необходимо учитывать появление в кристаллических диэлектриках электронного тока, который быстро возрастает с увеличением напряженности поля E . В результате чего нарушается закон Ома. При напряженностях поля выше 10 - 100 МВ/м зависимость удельной проводимости выражается эмпирической формулой Дж. Пуля

$$\gamma_E = \gamma \exp(\beta \sqrt{E})$$

или, если напряжение близко к пробивному, то по формуле Я.И. Френкеля:

$$\gamma_E = \gamma \exp(\sqrt{E})^{1/2},$$

где γ_E - проводимость диэлектрика в сильных полях; γ - проводимость диэлектрика в области, подчиняющейся закону Ома; β - числовой коэффициент, характеризующий материал диэлектрика.

Газы при небольших напряженностях электрического поля обладают очень малой электропроводностью рисунок 1.8 (кривая 1). Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация молекул газа возникает по двум причинам: либо вследствие влияния каких-либо внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц (свободных электронов) газа с нейтральными молекулами. На кривой 1 различают: до v_n несамостоятельную ионизацию, когда с увеличением концентрации заряда v идет увеличение тока I до насыщения его v_n , здесь внешнее электрическое поле изменяет величину тока (на линейном участке по за-

кону Ома, на нелинейном – не выполняется закон Ома); затем выделяется область насыщения тока (от v_H до $v_{кр1}$), когда явление рекомбинации не приводит к возрастанию тока хотя концентрация зарядов растет (широкий участок

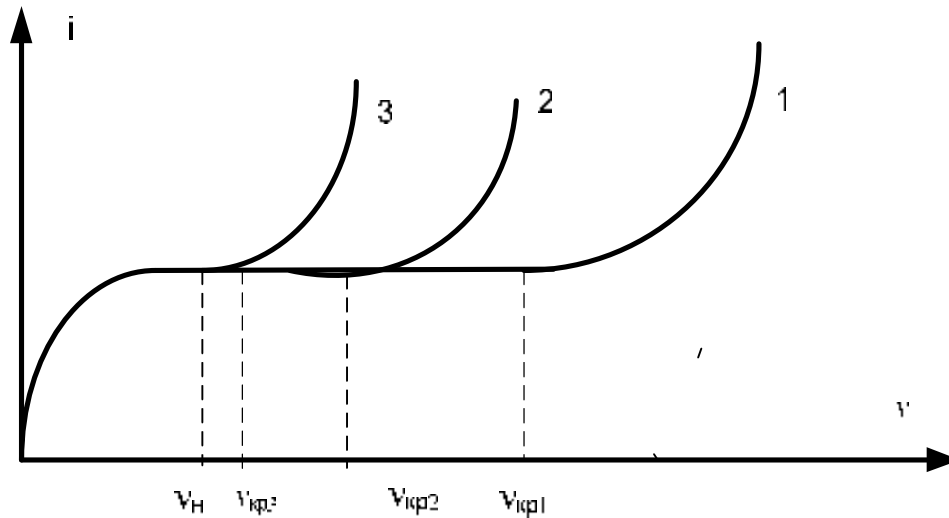


Рис.1.8. Электропроводность газа 1, жидкости 2 и твердого диэлектриков 3

этой кривой характерен для газов, т.е. для материалов, у которых мало количество примесей); участок кривой 1 за пределами $v_{кр1}$ – это самостоятельный процесс ионизации, когда внешние факторы: космическое излучение α и β лучей, ультрафиолетовые лучи, рентгеновское излучение и световое давление, а также за счет собственной энергии первичных процессов (фотоионизация в объеме промежутка), эти факторы значительно увеличивают электропроводность газа. Иногда, особенно в сильно разреженных газах, возможно появление электропроводности из-за ионов, образовавшихся в результате соударения заряженных частиц с молекулами газа. Такая ионизация называется ударной. Она может возникнуть в газе, если кинетическая энергия электрона за время свободного пробега в результате столкновений (упругих или неупругих) под действием электрического поля, окажется достаточно большой и превысит энергию ионизации нейтральной молекулы $\frac{mv^2}{2} > W_{и}$. В

этом случае электропроводность газа, вызванная ударной ионизацией, называется самостоятельной. В слабых электрических полях ударной ионизации нет и соответственно нет самостоятельной электропроводности.

Электропроводность **жидкостей** связана со строением их молекул рисунок 1.8 (кривая 2). В неполярных жидкостях электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей, в том числе и от воды. В полярных жидкостях электропроводность определяется не только примесями, но и диссоциацией молекул самой жидкости кривая 2 участок от v_H до $v_{кр2}$, причем, чем больше примесей, тем уже эта зона, а ток в жидкостях вызывается движением ионов или перемещением более крупных коллоид. Невозможность полного удаления из жидких диэлектриков примесей, способных к диссоциа-

ции, осложняет получение высококачественных электроизоляционных жидкостей с малой удельной электропроводностью. Сильнополярные жидкости с высокой удельной электропроводностью относятся к проводникам с ионной электропроводностью. Уменьшить удельную проводимость можно путем очистки жидкого диэлектрика. При длительном пропускании электрического тока через неполярную жидкость наблюдается уменьшение электропроводности из-за переноса свободных ионов примесей к электродам. Этот процесс носит название электрической очистки диэлектрика. Удельная проводимость любой жидкости зависит от температуры. С ее увеличением возрастает подвижность ионов из-за уменьшения вязкости жидкости, а также из-за увеличения степени тепловой диссоциации, что приводит к увеличению электропроводности жидкого диэлектрика. Наиболее точное выражение для определения удельной проводимости при изменении температуры описывается формулой

$$\gamma = A \exp(-a/T)$$

где A и a - постоянные коэффициенты для данной жидкости.

Часто для выражения удельной проводимости жидкости от температуры используют формулу

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\alpha t),$$

где γ и α - постоянные величины для данной жидкости; t - температура, °С.

Удельная проводимость жидкости зависит от ее вязкости, это можно доказать, воспользовавшись законом Стокса (движение шара в вязкой среде под действием постоянной силы). Тогда установившаяся скорость

$$v = F / (6 \pi r \eta), \quad (1.3)$$

где F - сила; r - радиус шара; η - динамическая вязкость жидкости.

Сила, действующая на носитель заряда и вызывающая его направленное перемещение,

$$F = q E, \quad (1.4)$$

где q - заряд носителя; E - напряженность электрического поля.

Используя выражение для удельной проводимости из закона Ома, получим

$$\gamma = n_0 q u = n_0 q v / E, \quad (1.5)$$

где u , м²/с В - подвижность носителей заряда, равная средней скорости направленного движения носителей в поле с напряженностью, равной единице; n_0 - концентрация носителей заряда.

Подставив в формулу (1.5) выражения (1.3) и (1.4) получим выражение для проводимости

$$\gamma = n_0 q^2 / (6 \pi r \eta).$$

Отсюда следует, что при независимости от температуры n_0 , q и r , т.е. пренебрегая тепловой диссоциацией, можно утверждать, что произведение удельной проводимости и вязкости жидкости есть величина постоянная при разных температурах (правило Л.В. Писаржевского и П.И. Вальдена):

$$\gamma h = n_0 q^2 / (6 \pi r_1). \quad (1.6)$$

Из формулы (1.6) видно, что проводимость возрастает при уменьшении вязкости. С учетом тепловой диссоциации частиц жидкости произведение γh

растет с увеличением температуры. При очень больших напряженностях электрического поля, величиной порядка 10 - 100 МВ/м, ток в жидкости не подчиняется закону Ома, что связано с увеличением числа движущихся под влиянием поля ионов. У жидкостей в кривой зависимости тока от напряжения нет горизонтального участка. Хотя для жидкостей очень высокой степени очистки он может и быть, что соответствует току насыщения в (увеличение участка $v_n - v_{кр2}$ кривой 2 рисунок 1.8).

В коллоидных системах может быть молионная или электрофоретическая проводимость. Носители заряда в этом случае группы молекул (молионы). Электрофоретическая проводимость может наблюдаться в трансформаторном масле, содержащем эмульгированную воду (пленка воды).

Электропроводность твердых диэлектриков складывается из электронной и ионной проводимостей, причем первая наблюдается в сильных полях. Ток проводимости от направленных ионов обуславливается перемещением ионов примесей и ионов самой структуры, поэтому определяется кривой 3 рисунка 1.8 или узкой областью насыщения от v_n до $v_{кр3}$. В диэлектриках с атомными и молекулярными решетками ток проводимости оценивается только ионами различной примеси, причем при некоторой температуре имеем выражение

$$\gamma = q n_{0\gamma} u_T [\text{Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}],$$

где q – заряд носителя; $n_{0\gamma}$ - число носителей в 1 объема, см^3 ; u_T - подвижность, $\text{см}^3/\text{с}$.

В ионных кристаллических диэлектриках ток проводимости определяется перемещением ионов одного знака, например, NaCl где по направлению сил электрического поля движутся только положительно заряженные ионы натрия. При высоких температурах в токе проводимости принимают участие ионы другого знака. в этом предположении в зависимости $\ln\gamma = f(1/T)$ более крутой спад прямой указывает на то, что ток проводимости при высоких температурах создается ионами обоих знаков и при сильном поле наблюдается электронная проводимость, которая измеряется по формуле Пуля

$$\gamma' = \gamma e^{\beta\sqrt{E}},$$

где E – напряженность поля; γ - удельная проводимость в области независимости γ от E или, когда скорость перемещения носителей зарядов пропорциональна E ; β - числовой коэффициент, характеризующий материал.

При напряженности поля, близкой к пробивным значениям более точной оказывается формула Френкеля

$$\gamma' = \gamma e^{\beta\sqrt{\sqrt{E}}}.$$

1.5. Диэлектрические потери в диэлектриках

1.5.1. Основные понятия

Диэлектрическими потерями называется мощность, рассеиваемая в диэлектрике под действием приложенного к нему электрического поля и вызывающая его нагрев. Рассматривают полные диэлектрические потери вызываемые как при переменном, так и при постоянном напряжениях за счет сквозных токов, обусловленного проводимостью.

Природа диэлектрических потерь в изоляционных материалах различна и зависит от агрегатного состояния вещества: газообразного, жидкого и твердого. При изучении диэлектрических потерь, связанных с явлением поляризации диэлектрик можно отобразить в виде кривых зависимостей заряда Q на обкладках конденсатора с заданным диэлектриком от напряжения электрического поля рисунки 1.9 – 1.11. Потери, вызванные мгновенными поляризациями, не разогревают диэлектрик и графическое отображение их – линейная зависимость (рисунок 1.9). Потери, вызванные любой замедленной поляризациями, выражаются площадью овала пропорциональной энергии рассеяния на тепло за один период напряжения (рисунок 1.10). Для диэлектриков с спонтанной поляризацией потери энергии за один период определяются площадью, ограниченной петлей гистерезиса (рисунок 1.11).

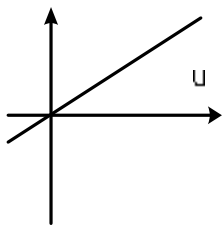


Рис.1.9. Диэлектрик без потерь при поляризации

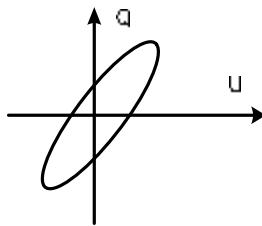


Рис.1.10. Диэлектрик с потерями при замедленных поляризациях

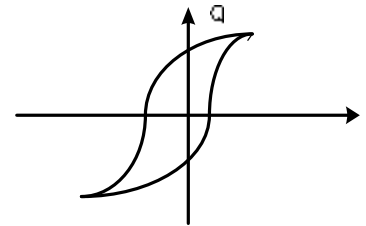


Рис.1.11. Потери сегнетоэлектрика от поляризации

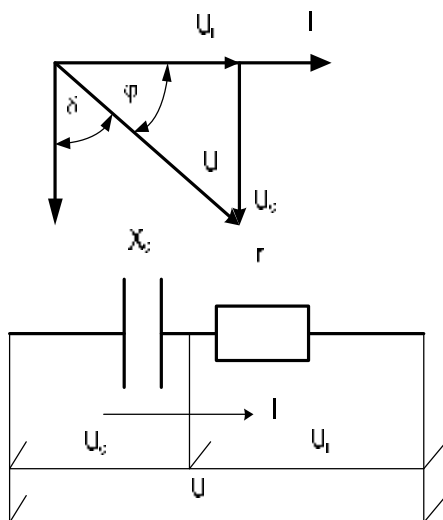


Рис.1.12. Векторная диаграмма напряжений и последовательная схема замещения изоляции

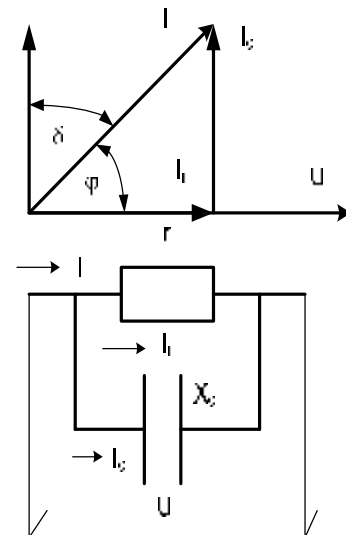


Рис.1.13. векторная диаграмма токов и параллельная схема замещения изоляции

При постоянном напряжении U (В) на участке изоляции сопротивлением $R_{из}$ (Ом) значение активных потерь P_a (Вт) определится как

$$P_a = U^2 / R_{из} = U I = I^2 R_{из},$$

где I - сквозной ток утечки через диэлектрик или изоляцию, А.

При переменной форме напряжения имеем значение энергии рассеяния на тепло W_a или активные потери P_a , Вт, на участке изоляции емкостью C , пФ, при действующем значении приложенного напряжения U , В, частоте f , Гц или $\omega = 2 \pi f$ (круговая частота). Здесь необходимо из векторных диаграмм последовательной и параллельной схем замещения изоляции найти угол фазы φ между общим током и общим напряжением и, дополнив его до 90° , находят угол δ - угол диэлектрических потерь, по рисункам 1.12 и 1.13. Причем, чем больше рассеяние мощности в диэлектрике, переходящей в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол δ и, следовательно, его функция $\operatorname{tg}\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь, таким образом,

$$W_a = P_a = U I \cos\varphi = U I \operatorname{tg}\delta = U \omega C \operatorname{tg}\delta.$$

Для последовательной схемы замещения:

$$P_a = \frac{U^2 r_s}{r^2 + x^2} = \frac{U^2 r_s}{x^2 \left(1 + \frac{r^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2\delta} = \frac{U}{z} - \frac{U r_s}{z},$$

где $\operatorname{tg}\delta = \omega C_s r_s$.

Для параллельной схемы замещения:

$$P_a = U^2 g = U^2 b \operatorname{tg}\delta = U^2 \omega C_p \operatorname{tg}\delta,$$

где $\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega C_p r_p}$; $b = 1/1/\omega C_p = \omega C_p$.

Приравнявая значения $\operatorname{tg}\delta$ при последовательной и параллельной схемах замещения изоляции, если они эквивалентны и мощность P_a одинакова, получим

$$C_s = C_p (1 + \operatorname{tg}\delta) \quad \text{или} \quad C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2\delta} \quad \text{и} \quad r_s = r_p \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}\right) = \frac{r_p}{1 + \operatorname{tg}^2\delta},$$

где в первом приближении, пренебрегая $\operatorname{tg}^2\delta$ по сравнению с «1», можно считать $C_p \approx C_s \approx C$, тогда активная мощность будет равна $P_a = U I \operatorname{tg}\delta$.

Можно выразить $\operatorname{tg}\delta$ из векторных диаграмм рисунков 1.12. 1.13:

$$\operatorname{tg}\delta_s = U_a / U_c \quad \text{и} \quad \operatorname{tg}\delta_p = I_a / I_c.$$

Угол потерь δ - это параметр как самого материала, так и изделия из диэлектрического материала. Часто пользуются термином “добротность изоляции” - это величина, обратная тангенсу угла диэлектрических потерь,

$$Q_s = 1 / \operatorname{tg}\delta_s = U_c / U_r \quad \text{или} \quad Q_p = 1 / \operatorname{tg}\delta_p = I_c / I_r$$

Значения $\operatorname{tg}\delta$ для высококачественных материалов составляют тысячные и даже десятитысячные доли единицы, но могут быть и больше для электротехнических материалов более низкого качества (нескольких сотых долей единицы).

Для расчета диэлектрических потерь в единице объема, где напряженность поля равна E , В/м и любая картина электрического поля (равномерная, резконеоднородная, слабонеоднородная), а также любой неоднородный диэлектрик, принимается эмпирическая формула

$$P_a = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 f \varepsilon \operatorname{tg} \delta.$$

Произведение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ($\varepsilon \operatorname{tg} \delta$) называется коэффициентом диэлектрических потерь материала. Если величина $\gamma = 5,56 \cdot 10^{-11} \operatorname{tg} \delta$, Ом м является объемной удельной проводимостью материала тогда P_a примет вид

$$P_a = \gamma E.$$

При переменном напряжении потери обычно больше, чем на постоянном напряжении, что отражается неравенством

$$f \rho \varepsilon \operatorname{tg} \delta > 1,8 \cdot 10^{10}.$$

Это неравенство связывает удельное объемное сопротивление ρ , измеренное при постоянном напряжении, с параметрами ε и $\operatorname{tg} \delta$ на переменном напряжении при частоте f .

В газообразных диэлектриках при малых напряженностях поля E , в неполярных жидкостях, таких как сухое трансформаторное масло, в неполярных твердых диэлектриках потери при постоянном и переменном напряжениях одинаковы. Следовательно, на переменном напряжении имеем равенство:

$$\operatorname{tg} \delta = 1,8 \cdot 10^{10} / (f \varepsilon \rho) = 1,8 \cdot 10^{10} \gamma / (\varepsilon f).$$

Для диэлектриков с большими потерями расчетное значение емкости зависит от выбора схемы замещения и тогда ε также окажется зависящей от схемы замещения, т.е. окажется величиной неопределенной, а величина угла потерь и $\operatorname{tg} \delta$ от этого не зависит.

1.5.2. Схема замещения диэлектрика

В любом диэлектрике, помещенном в электрическое поле, наблюдаются явления: смещение зарядов различных видов поляризации, перемещение зарядов или ток по объему структуры или по поверхности ее и нагрев диэлектрика от энергии рассеяния – все эти явления происходят в направлении силовых линий электрического поля. На рисунке 1.14 отображены эти явления и представлены как схема замещения изоляционного материала.

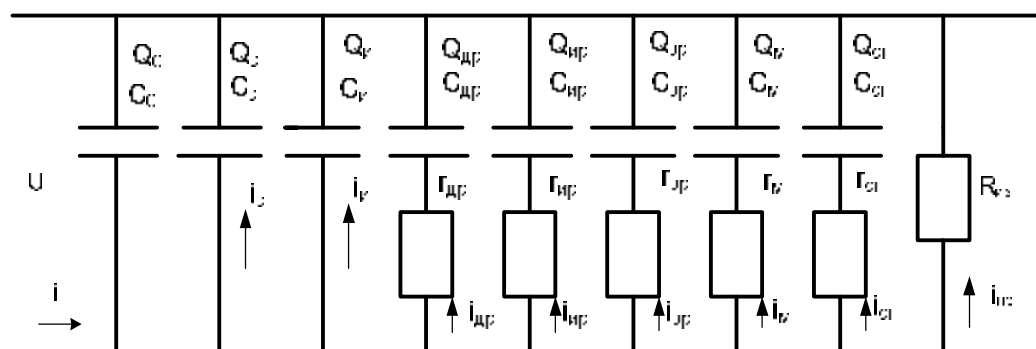


Рис. 1.14. Схема замещения диэлектрика с учетом явлений поляризации, электропроводности и диэлектрических потерь

1.6.2. Виды диэлектрических потерь

Диэлектрические потери по своей природе и физической сущности или воздействию электрического поля делятся на четыре основных вида:

- 1) диэлектрические потери, обусловленные всеми видами мгновенной и замедленной поляризацией в диэлектриках;
- 2) потери от сквозной электропроводности;
- 3) ионизационные потери;
- 4) потери, вызванные неоднородностью структуры

Таким образом, три явления электрического поля определяют или вызывают нагрев диэлектрика: поляризация, электропроводность и ионизация.

Поляризация обуславливает изменение δ и соответственно $\operatorname{tg}\delta$ в веществах, обладающих релаксационными поляризациями или в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов или дипольной структуры с ковалентной связью между молекулами. Поляризация вызывает нарушение теплового движения частиц по направлению электрического поля и приводит к рассеянию энергии или нагреву диэлектрика. Такие потери возрастают при увеличении частоты приложенного напряжения и могут резко проявиться на высокой частоте. Однако, если при высокой частоте поляризация не проявляется (ионы или диполи не успевают сместиться вслед частоте электрического поля), то $\operatorname{tg}\delta$ падает. Это характерно для большинства технических диэлектриков со стекловидной фазой в структуре.

В сегнетоэлектриках. потери от спонтанной поляризация наблюдаются значительными до точки Кюри, так как успевают смещаться заряды или отслеживают изменение температуры. За пределами точки Кюри потери уменьшаются и значительно, так как не проявляется поляризация.

В радиотехнических материалах при световых частотах, за пределами МГц, проявляются резонансные потери. Это наблюдается в газах, когда идет интенсивное поглощение энергии электрического поля. и в твердых диэлектриках, когда частота вынужденных колебаний, вызванных электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц вещества.

Диэлектрические потери от **электропроводности** обнаруживаются в зависимости от объемной или поверхностной удельной проводимости вещества, поэтому

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{12}}{\varepsilon f \rho}. \quad (1.7)$$

Здесь δ не зависит от частоты поля и $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается с увеличением частоты f по гиперболическому закону. Температурная зависимость в этом случае определяется как экспонента вида

$$P_T = A e^{-\frac{b}{T}} \quad \text{или} \quad P_t = P_0 e^{at},$$

где A , b , a – постоянные материала; P_T – потери при температуре T ; P_t – потери при температуре t , $^{\circ}\text{C}$; P_0 – потери при 0°C .

Ионизационные потери характерны для газообразных и неоднородных твердых диэлектриков с газовым включением. В неоднородном электрическом поле при напряженностях превышающих значение, соответствующее началу ионизации газа, имеем

$$P_{\text{и}} = A_1 f (U - U_{\text{и}})^3,$$

где A_1 - постоянный коэффициент, зависящий от вида материала; U - приложенное напряжение; $U_{и}$ - напряжение ионизации, если $U > U_{и}$; f - частота поля.

Величина $U_{и}$ зависит от давления газа, поскольку ионизация это соударение молекул при свободном пробеге электронов, и пропорционально увеличению его.

Диэлектрические потери, связанные с **неоднородностью структуры** диэлектриков, наблюдаются у многих технических диэлектриков - слоистых пластиков, пропитанных бумаг, пластических масс с наполнителями, в керамике, материалах на основе слюды, асбестовых материалах и т.д. Ввиду большого разнообразия структуры неоднородных диэлектриков и содержащихся в них составляющих, общей формулы для расчета их диэлектрических потерь не существует. Однако, возможная оценка диэлектрических потерь в композиционных материалах связана с выделением тепла при двух явлениях: электропроводность и одно из явлений поляризация или ионизация, а то и всех трех явлений одновременно. Это обусловлено примесями или отдельными компонентами, введенными в диэлектрик для изменения его свойств.

Диэлектрические потери в газах при напряженности поля, ниже необходимой для возникновения ударной ионизации молекул, очень малы. В таком случае газ - идеальный диэлектрик. Источником диэлектрических потерь в газах является в основном электропроводность, потому что ориентация дипольных молекул в газах при их поляризации не сопровождается диэлектрическими потерями. Все газы имеют очень малую электропроводность, поэтому угол диэлектрических потерь у них мал, особенно на высоких частотах и выражаются зависимостью (1.7)

Диэлектрические потери в жидкостях существенно зависят от строения жидкости: в **неполярных** жидкостях (без примесей с дипольными молекулами), они обусловлены только электропроводностью. Удельная проводимость их тоже очень мала и малы диэлектрические потери. В этом случае $\tan \delta$ очень мал и может быть рассчитан по формуле (1.7). **Полярные** жидкости в зависимости от условий могут обладать большими потерями, связанными с дипольно-релаксационной поляризацией и потерями от электропроводности. Применяемые в технике диэлектрики могут представлять смеси неполярных и полярных веществ, например, масляно-канифольные компаунды, или могут быть полярными жидкостями. Жидкие полярные диэлектрики имеют заметную зависимость диэлектрических потерь от вязкости. Диэлектрические потери в них в основном обусловлены поляризацией и называются дипольно-релаксационными потерями. Диполи, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери электрической энергии на трение с выделением теплоты. Если вязкость жидкости велика, то молекулы не успевают следовать за изменением поля и потери от поляризации будут малы. дипольные потери малы также в жидкостях с малой вязкостью, т.к. поворот диполей происходит без трения. При средней вязкости дипольные потери могут быть достаточно велики и при некотором значении вязкости имеют максимум. Рассеиваемая мощность P_a при дипольно-релаксационных потерях в жидком диэлектрике возрастает с частотой до тех

пор, пока поляризация успевает следовать за изменением поля. Когда же частота становится настолько велика, что дипольные молекулы не успевают ориентироваться в направлении поля, и $\operatorname{tg} \delta$ падает, потери становятся постоянными. При работе диэлектрика на синусоидальном переменном напряжении с угловой частотой ω ток абсорбции (от поляризации) будет также синусоидальным и имеет две составляющие - активную и реактивную. Через диэлектрик в этом случае протекают три тока:

емкостной ток, опережающий на 90° напряжение: $I_c = U \omega C$, где C - геометрическая емкость, измеренная при высокой частоте, когда нет релаксационной поляризации;

ток абсорбции с активной и реактивной составляющими вычисляется по формулам:

$$I_{aabc} = U G \omega^2 t^2 / (\omega^2 t^2 + 1);$$

$$I_{rabc} = U G \omega t / (\omega^2 t^2 + 1),$$

где U - приложенное напряжение; G - проводимость для сквозного тока из выражения $G = U / i_{ск}$ при тангенсе угла фазы равном $\operatorname{tg} \phi = \omega t$;

сквозной ток находится из выражения $i_{ск} = U G = U / R_{из}$.

Диэлектрические потери твердых диэлектриков. С молекулярной структурой потери зависят от вида молекул. В неполярных молекулах и неустойчивой (Ван-дер-Ваальса) связи, вещества, не имеющие примеси, $\operatorname{tg} \delta$ очень мал, оценивается электропроводностью, поэтому порядка 10^{-4} . Это высокочастотные диэлектрики, как сера, парафин, полимеры и др. Для технических материалов с **полярной молекулой** и дипольно-релаксационной поляризацией потери значительные, т.е. явления электропроводности и поляризации повышают их до 10^{-3} . К таким диэлектрикам можно отнести: целлюлозо-содержащие материалы, материалы со стекловидной фазой (органические стекла); полиамиды (капрон и др.); каучуковые материалы (эбонит), фенолоформальдегидные смолы (бакелит и др).

Диэлектрики с **ионной структурой** связаны с упаковкой ионов в решетке. Так $\operatorname{tg} \delta < 10^{-3}$ для диэлектриков с кристаллической решеткой и плотной упаковкой ионов при отсутствии примесей, когда проявляется явление электропроводности. Это характерно для керамики и каменной соли. А проявление релаксационных поляризаций (ионной и электронной) в материалах с **не плотной упаковкой ионов** значительно повышает $\operatorname{tg} \delta < 10^{-2}$, когда проявляются электропроводность и ионно- и электронно- релаксационные поляризации. Термическая обработка (обжиг, закалка) стекла снижает $\operatorname{tg} \delta$, а наличие щелочных окислов (N^2O , K^2O) при отсутствии тяжелых металлов (BaO , PbO) вызывают повышение $\operatorname{tg} \delta$, однако, введение только тяжелых окислов металлов снижает $\operatorname{tg} \delta$, так как проявляются явления электропроводности и электронно-релаксационной поляризации.

Сегнетоэлектрики и сложные, **неоднородные структуры** оцениваются более высокими диэлектрическими потерями, порядка $\operatorname{tg} \delta > 10^{-1}$. Здесь, наряду с электропроводностью, проявляется длительная спонтанная (сегнетова соль пьезоэлектрики, керамика) или миграционная (высоковольтная) (гете-

накс, текстолит, фибра, пластические массы, миканит и др.) поляризации. Если в структуре сложной композиции заложено газовое включение, то еще может проявляться и ионизационное явление, поэтому для композиционных, слоистых или сложных диэлектриков возможна комбинация явлений: электропроводность и поляризация; электропроводность, поляризация и ионизация; электропроводность, и ионизация, которые вызывают большой $\text{tg}\delta$.

1.6.3. Факторы, влияющие на диэлектрические потери

Температурная и частотная зависимости диэлектрической проницаемости приведены на рисунках 1.15 и 1.16.

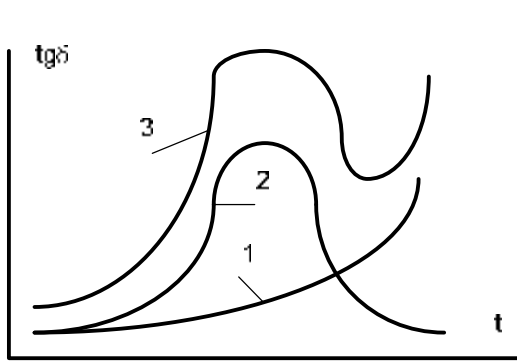


Рис.1.15. Температурная зависимость диэлектрических потерь однородного 1, не однородного 2 и композиционного диэлектрика 3

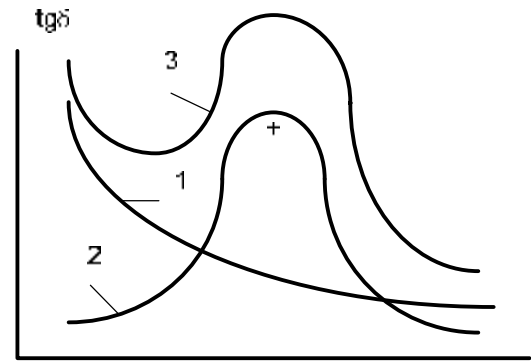


Рис.1.16. Частотная зависимость диэлектрических потерь однородного 1, не однородного 2 и композиционного диэлектрика 3

Температура. Повышение температуры вызывает рост $\text{tg}\delta$, если потери обусловлены проводимостью, т. к. при нагревании диэлектрика возрастает интенсивность смещения или перемещения зарядов (кривая 1 рисунка 1.15). Если потери обусловлены поляризацией, то при росте температуры $\text{tg}\delta$ проходит через максимум. Это объясняется тем, что при низких температурах вязкость велика и потерь нет, а при высоких температурах вязкость мала и диполи смещаются, не испытывая трения (кривая 2 рисунка 1.15). При наличии двух видов потерь, результирующие потери определяются сложной кривой 3 рисунка 1.15.

Частота. Увеличение частоты вызывает снижение $\text{tg}\delta$, если потери обусловлены проводимостью (кривая 1 рисунка 1.16). В этом случае активная составляющая тока, вызванная утечкой через диэлектрик, не меняется с изменением частоты, а реактивная (емкостной ток) растет пропорционально частоте, поэтому отношение активного тока к реактивному, т. е. $\text{tg}\delta$, будет снижаться с увеличением частоты. Если потери вызваны поляризацией, то $\text{tg}\delta$ будет иметь максимум (кривая 2 рисунка 1.16). При низких частотах потери малы, т. к. скорость поворота диполей и смещение ионов при неплотной упаковки невелико, а, следовательно, мало и трение. При очень больших частотах диполи и ионы не успевают поворачиваться или смещаться вслед за частотой электрического поля и поэтому потери, малы. В сложных диэлектриках существуют потери обоих типов и $\text{tg}\delta$ получается путем суммирования обоих типов по кривой 3 рисунка 1.16. Следовательно, $\text{tg}\delta$ с увеличением частоты падает, однако, это не означает, что активные потери снижаются, т.

к. $P_a = U I \cos \varphi$, где $I \approx I_c = U \omega C$; $\cos \varphi = \sin \delta \approx \operatorname{tg} \delta$, т.е. $P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$. Снижение $\operatorname{tg} \delta$ с ростом частоты меньше соответствует увеличению частоты, а следовательно и потерь с ростом частоты.

Влажность. Появление влаги в любом агрегатном состоянии (эмульгированное, молекулярнорастворимое или газообразное) вызывает рост $\operatorname{tg} \delta$. Это объясняется тем, что у большинства диэлектриков при увлажнении снижается удельное сопротивление, т.е. увеличивается проводимость.

Напряжение электрического поля. Если потери обусловлены ионизацией, то $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается с ростом напряжения, начиная с $U_{и}$, т.е. с напряжения ионизации газового включения. При отсутствии включений $\operatorname{tg} \delta$ не зависит от U . Поэтому кривая зависимости $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ позволяет установить, есть ли воздушные включения в изоляции.

1.7. Пробой диэлектриков

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, может потерять свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение, когда разрушаются молекулярные связи. Это явление носит название ПРОБОЯ диэлектрика или нарушения его электрической прочности; значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется ПРОБИВНЫМ напряжением, а значение напряженности электрического поля, соответствующее пробивному напряжению, - ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ диэлектрика. Пробой (длительный или кратковременный) диэлектрика приводит к потере диэлектрических свойств и образованию канала с высокой электрической проводимостью. Электрическая прочность диэлектрика определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя. Как правило, пробивное напряжение измеряется в киловольтах.

$$E_{пр} = U_{пр} / h, \quad (1.8)$$

где $E_{пр}$ - электрическая прочность диэлектрика, кВ/м; $U_{пр}$ - пробивное напряжение, кВ; h - толщина диэлектрика в месте пробоя, м.

На практике часто пользуются значениями пробивного напряжения, выраженными в мегавольтах, киловольтах или вольтах. Тогда электрическая прочность $E_{пр}$ будет выражаться так: $1 \text{ МВ/м} = 1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м}$.

Прохождение тока через изоляцию представлено на рисунке 1.17.

Точка "n" на графике рисунка 1.17, для которой $dI / dU \rightarrow \infty$, соответствует пробую. Дальнейшие явления в диэлектрике после пробоя определяются характером электротехнического материала и мощностью источника. В месте пробоя возникает искра или дуга, которые могут вызвать оплавление, обгорание, растрескивание или разложение (для полимеров) как диэлектрика, так и электродов. После снятия напряжения просматривается след в твердом диэлектрике в виде пробитого, проплавленного или прожженного отверстия. Для электрических аппаратов пробой изоляции, как правило, явление аварийного характера, выводящее их из строя и требующее ремонта или замены.

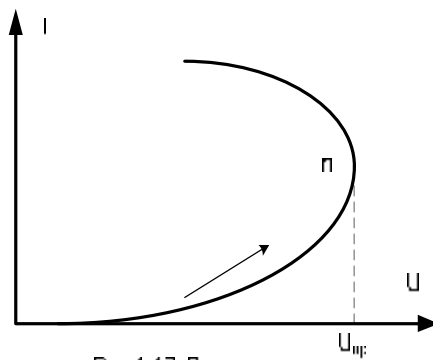


Рис.1.17. Вольтамперная характеристика изоляции при пробое

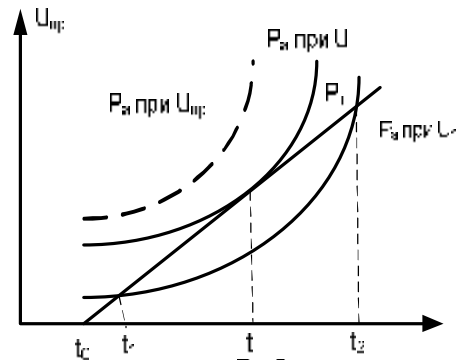


Рис.1.18. Пробивное напряжение при тепловом факторе

Пробой в газообразных и жидких диэлектриках отличается от пробоя в твердых диэлектриках тем, что в силу подвижности частиц после снятия напряжения пробитый промежуток диэлектрика полностью восстанавливает свои диэлектрические свойства, т.е. первоначальное значение пробивного напряжения $U_{пр}$, при условии, что длительность и величина электрической дуги не были столь велики, чтобы вызвать необратимые изменения в диэлектрике или в токопроводящих частях аппарата.

В большинстве случаев при возрастании толщины h диэлектрика значение уменьшается, а $U_{пр}$ растет нелинейно. Для надежной работы диэлектрика в любых установках значение рабочего напряжения $U_{раб}$ должно быть существенно меньше пробивного $U_{пр}$. Отношение $U_{пр} / U_{раб}$ называется коэффициентом запаса электрической прочности изоляции. Электрическая прочность высококачественных твердых диэлектриков, как правило, выше, чем электрическая прочность жидких и газообразных диэлектриков. Поэтому если расстояние между ближайшими точками электродов по поверхности твердой изоляции ненамного превосходит расстояние по объему изоляции, то при повышении напряжения в первую очередь пробивается не изоляция, а происходит поверхностный пробой - перекрытие изоляции, т.е. разряд в прилегающем к твердой изоляции слое газообразного диэлектрика, например воздуха (перекрытие фарфоровых изоляторов).

По физической природе различают несколько, видов пробоя диэлектриков, основными из которых являются следующие:

- электрический;
- электротепловой;
- электромеханический;
- электрохимический;
- ионизационный.

Для твердых диэлектриков явно выражены четыре вида пробоя:

электрический пробой макроскопически как однородных, так и неоднородных диэлектриков, электротепловой, электрохимический и ионизационный пробой.

В общем случае чисто **электрический пробой** представляет собой непосредственное разрушение структуры диэлектрика силами электрического

поля, действующими на электрически заряженные частицы диэлектрика; он развивается практически мгновенно. Поэтому, если пробой не произошел сразу после приложения электрического поля к диэлектрику, он должен выдерживать это поле длительно. Исключением является напряжение $U_{\text{примп}}$ к пробивному напряжению длительного воздействия называется коэффициентом импульса $K_{\text{имп}}$ для данной изоляции

$$K_{\text{имп}} = U_{\text{примп}} / U_{\text{прдл}}$$

Коэффициент импульса зависит от вида материала изоляции, формы и размеров диэлектрика. Для газов $K_{\text{имп}}$ в неоднородном поле больше при прочих равных условиях.

Электротепловой пробой (тепловой) связан с нагревом изоляции в электрическом поле и диэлектрическими потерями. Развитие теплового пробоя идет по следующей схеме: при некоторой разности потенциалов на электродах (например, Ураб) в диэлектрике выделяются тепловые потери, его температура повышается, увеличиваются потери и процесс продолжается до тех пор, пока диэлектрик не оплавится или произойдет его обугливание (в зависимости от того термопластичный или терморезистивный материал) и его собственная электрическая прочность упадет до такой величины, что произойдет пробой диэлектрика. Тепловой пробой, так же как и электрический может быть местным. Если удельная активная проводимость диэлектрика мала и температурный коэффициент $T_{\text{ке}}$ невелик, то при хороших условиях отвода тепла в окружающее пространство устанавливается тепловое равновесие между выделяющимся в диэлектрике теплом и его отводом в окружающую среду, и диэлектрик будет длительно работать при данном напряжении. При тепловом пробое $U_{\text{пр}}$ зависит от частоты приложенного напряжения, уменьшаясь при значительных частотах и так же снижаясь при возрастании температуры.

Электрохимический пробой сопровождается механическим разрушением и образованием микротрещин под действием электрического поля и механического давления электродов.

Электрохимический пробой – вид медленно развивающегося пробоя, вызванного химическим изменением материала под действием электрического поля. Процесс этот часто связан со старением диэлектрика и является необратимым, особенно, в области дефекта.

Ионизационный пробой объясняется действием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующихся в газовых порах диэлектрика при частичных разрядах в газе, а также эрозией диэлектрика на границе пор ионами газа.

Пробой в газах - распространенный пробой, т.к. во многих электрических аппаратах, на линиях электропередач внешней изоляцией служит воздух или какой-нибудь газ. Пробой газов обусловлен явлениями ударной и фотонной ионизации. Электрическая прочность воздуха невелика в сравнении с жидкостями и твердыми диэлектриками. Явление пробоя газа зависит от степени однородности поля, в котором осуществляется пробой. Пробой газа в однородном поле - явление менее распространенное, чем пробой газа в неоднородном.

родном поле. Однородное поле получается между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами при расстоянии между ними, соизмеримым с диаметром сферы. Пробой в этом случае возникает практически мгновенно по достижении напряжением значения зависящего от температуры и давления газа. Между электродами возникает искра, переходящая в дугу, если источник напряжения достаточно мощный. С помощью шарового разрядника измеряют высокое напряжение искрового разряда.

При малых расстояниях между электродами электрическая прочность воздуха значительно возрастает, т.к. при малых расстояниях между электродами разряд формируется с трудом. Электрическая прочность газа зависит от его плотности, т.е. давления (при нормальной температуре 20°C), поэтому для расчета пробивного напряжения воздуха используют формулу

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \delta,$$

где $U_{\text{пр}}$ - пробивное напряжение при данной температуре и давлении; $U_{\text{пр}0}$ - пробивное напряжение при нормальном давлении $P = 0,1$ МПа и нормальной температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$; δ - относительная плотность воздуха, рассчитанная по формуле

$$\delta = 0,386 P / (t + 273),$$

где P - давление, Па (мм рт. столба); t - температура, $^{\circ}\text{C}$. При нормальных условиях $\delta = 1$.

В неоднородном поле, которое создается между острием и плоскостью, в слабо неоднородном поле - между двумя остриями или проводами высоковольтных линий электропередач (ЛЭП), между сферами при расстоянии между ними, превышающем диаметр сферы, закономерности оказываются другими. Особенностью пробоя в неоднородном электрическом поле является возникновение частичного разряда в виде короны в местах наибольшей напряженности поля, достигающих критических значений; далее корона может перейти в искровой разряд и дугу, если напряжение будет возрастать. При положительной полярности электрода иглы (в системе электродов игла-плоскость) пробой происходит при более низком напряжении, чем в системе с отрицательной полярностью на игле. На высоких частотах напряжение короны почти совпадает с пробивным, в отличие от напряжения промышленной частоты.

Пробой жидких диэлектриков происходит при более высоких, чем в газе, значениях пробивного напряжения, при прочих равных условиях. Повышенная электрическая прочность жидкого диэлектрика обусловлена значительно меньшей длиной свободного пробега электронов в жидкости, чем в газах. Пробой технических жидкостей может быть связан с газовыми включениями, что вызывает ионизацию газа и местный перегрев жидкости, приводящей к образованию газового канала в ней. Вода в диэлектрике также сильно снижает электрическую прочность. Электрическая прочность сухого трансформаторного масла не зависит от температуры, когда начинают испаряться легкие фракции масла, образуя пузырьки газа в жидкости. Требования, предъявляемые к изоляционным маслам, нормируют все посторонние

примеси в масле. У сухого масла $E_{пр} = 20 - 25$ МВ/м, а у масла, бывшего в эксплуатации, $E_{пр} = 4 - 5$ МВ/м. Для повторного использования масло подвергают регенерации.

Пробой твердых диэлектриков может быть любой из четырех видов, в зависимости от характера электрического поля, структуры диэлектрика, наличия дефектов, условий его охлаждения и времени воздействия на него напряжения. Электрический пробой макроскопически однородных твердых диэлектриков - это чисто электронный пробой, время развития которого около десятка мс, он не обусловлен тепловой энергией. Чисто электрический пробой наблюдается, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь и отсутствует ионизация газовых включений. Такой пробой отмечается у монокристаллов щелочно-галлоидных соединений и у некоторых полимеров. В этом случае $E_{пр} = 100$ МВ/м и даже больше. Для однородных материалов значения пробивного напряжения в однородном и неоднородном электрическом поле заметно отличаются друг от друга.

Для случая электрического пробоя неоднородных диэлектриков развитие его тоже достаточно быстрое, но значения для неоднородных диэлектриков (в том числе и с газовыми включениями) в однородном и неоднородном электрическом поле отличаются друг от друга незначительно.

Электрическая прочность при электрическом пробое не зависит от температуры, но после достижения температурой некоторых определенных значений заметно уменьшается: это говорит о наличии теплового пробоя.

Низкая электрическая прочность наблюдается у диэлектриков с открытыми порами (дерева, бумаги, неглазурованной керамики) и мало отличается от газов. Для диэлектриков с закрытыми порами - плотной бумаги, глазурованной керамики - характерна высокая электрическая прочность.

Тепловой пробой отличается от электрического тем, что электрическая прочность при тепловом пробое является характеристикой не только электротехнического материала, но и изделия из него, тогда как $E_{пр}$ при электрическом пробое, является характеристикой только самого материала.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой поля, условиями охлаждения диэлектрика, температурой окружающей среды; оно зависит также от нагревостойкости материала. С повышением температуры электрическая прочность уменьшается.

Для однородных плоских диэлектриков, обладающих потерями, существует приближенный метод расчета пробивного напряжения.

Для расчета $U_{пр}$ полагаем, что пробой происходит при повышенных температурах и в диэлектрике преобладают потери от сквозной электропроводности. Таким образом, учитывая экспоненциальную зависимость тангенса потерь ($\text{tg } \delta$) от температуры и используя выражение $P_a = U^2 \omega C \text{tg } \delta$, после преобразований получим

$$P_a = U^2 f \varepsilon S \text{tg } \delta e^{\alpha(t-t_0)} / (1,8 \cdot 10^{10} \text{ h}),$$

где U - приложенное напряжение; f - частота; ε - диэлектрическая проницаемость материала; S - площадь электрода; $\text{tg } \delta$ - тангенс угла потерь диэлек-

трика при t_0 - температуре окружающей среды; α - температурный коэффициент тангенса угла потерь; t - температура нагретого за счет диэлектрических потерь материала; t_0 - температура электродов, приблизительно равная температуре окружающей среды; h - толщина диэлектрика.

Теплопроводность материала электродов обычно на два - три порядка больше, чем теплопроводность диэлектрика, поэтому полагаем, что теплота из нагревающегося объема диэлектрика передается в окружающую среду через электроды. Мощность, отводимая от диэлектрика, выражается формулой Ньютона

$$P_a = 2 \sigma S (t - t_0).$$

где σ - коэффициент теплопередачи системы диэлектрик - металл электродов.

На рисунке 1.18 изображены: прямая теплопередачи $P_t = F(t)$; экспоненты тепловыделения $P_a = \Phi(t)$ для трех различных значений приложенного напряжения. При значении напряжения U_1 , прямая теплопередачи является секущей кривой тепловыделения, и, следовательно, диэлектрик нагреется до температуры t_1 температуры состояния устойчивого равновесия. Напряжение U_1 будет неопасным для образца, если нагрев до этой температуры не приведет к механическому и химическому разрушению структуры материала образца. Поэтому увеличим напряжение до значения U_1 , при котором кривая тепловыделения станет касательной к прямой теплопередачи, что приведет к состоянию неустойчивого теплового равновесия при температуре t . При значении напряжения U_2 кривая тепловыделения пройдет выше прямой теплопередачи, а это означает отсутствие теплового равновесия, т.е. температура будет возрастать до разрушения диэлектрика - до теплового пробоя.

Таким образом, напряжение U , при котором имеет место неустойчивый режим - граничный режим, можно принять за напряжение пробоя $U_{пр}$. Его значение можно определить по двум условиям:

$$\begin{aligned} P_a &= P_t, \\ dP_a / dt &= dP_t / dt. \end{aligned}$$

Решая эти два уравнения относительно U_i с учетом выше обозначенных значений для P_a и P_t , получаем:

$$\begin{aligned} U^2 f \varepsilon \operatorname{tg} \delta S e^{\alpha(t-t_0)} / (1,8 \cdot 10^{10} h) &= 2 \sigma S (t - t_0), \\ U^2 f \varepsilon \operatorname{tg} \delta S e^{\alpha(t-t_0)} / (1,8 \cdot 10^{10} h) &= 2 \sigma S. \end{aligned}$$

Разделив эти два выражения, получим $1 / \alpha = t - t_0$, тогда, подставив его в последнее выражение и решив его относительно U , получим

$$U_{пр}^2 = 1,8 \cdot 10^{10} 2 \sigma h / (f \varepsilon \operatorname{tg} \delta \alpha)$$

или

$$U_{пр} = K (\sigma h / (f \varepsilon \operatorname{tg} \delta \alpha))^{1/2},$$

где K – числовой коэффициент, равный $1,15 \cdot 10^5$, если все величины выражены в единицах системы СИ.

Отсюда следует, что пробивное напряжение будет выше (изменяется по закону экспоненты), если диэлектрик будет толще, условия теплоотвода лучше (σ больше), частота ниже, а ε и $\operatorname{tg} \delta$ меньше. При больших ε , $\operatorname{tg} \delta$ и при высо-

ких частотах, а также при большом температурном коэффициенте тангенса угла потерь пробивное напряжение будет ниже.

Этот расчет, пригодный только для одномерного потока теплоты, называется графоаналитическим и является приближенным, в нем не учтены перепад температуры по толщине диэлектрика (искажение электрического поля и повышение градиента напряжения в поверхностных слоях), а также теплопроводность материала электродов. Поэтому тепловой пробой часто наступает при напряжении ниже расчетного. Более точные методы расчета разработаны академиками Н.Н. Семеновым и В.А. Фоком только для изделий простейшей конфигурации.

1.7. Электрический пробой твердых диэлектриков

1.7.1 Одно и многокомпозиционные изоляционные конструкции

Изоляционный материал одной структуры, имеющий неизменные электроизоляционные свойства, называется однокомпозиционной конструкцией. К таким материалам относятся в основном кристаллы (сланца, стекло, фарфор, керамика и т.п.). В технике однокомпозиционные материалы в чистом виде применяются очень редко.

Технический диэлектрик - это многокомпозиционный материал. Характерным техническим диэлектриком может служить изоляция электрических машин. В ее состав входят: изоляционный барьер с высокой электрической прочностью - сланца, мусковиты, флогопиты, стеклоткани, стекловолокну; механический барьер (подложки) электрокартон, бумаги, хлопчатобумажные материалы, стеклоленты, стеклоткани, жгуты; связующие или компаунды (склеивающие и пропитывающие) - эпоксидные, полиэфирные, формальдегидные, битумные и т.д., смолы и компаунды. Различают изоляцию **ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКУЮ** (микалента) - с повышением температуры такая изоляция размягчается и мигрирует, теряет монолитность, но со снижением температуры до рабочих восстанавливает свои электроизоляционные свойства; **ТЕРМОРЕАКТИВНУЮ** с повышением температуры такая изоляция разрушается и теряет свои свойства, а при снижении ее до рабочих они не восстанавливаются. Например, изоляция для электрических машин это сланца-дотерм, монолит, ВЭС и т.п., которая успешно эксплуатируется в настоящее время. Электроизоляционные свойства термопластической изоляции достаточно высоки и имеют срок службы более 50 лет, однако остаются дорогостоящими с невысокими физико-механическими характеристиками. Термореактивная изоляция обладает более высокими электрическими, физико-механическими свойствами и меньше старится. Однако под воздействием явления короны в ней могут развиваться дендриты - это термическая деструкция - разрушение материала в виде науглероженных дорожек. Такие изменения материала увеличивают проводимость изоляционного промежутка.

1.7.2. Теории электрического пробоя

Однородный диэлектрик. Физический процесс электрического пробоя в однокомпозиционной изоляции достаточно хорошо изучен. В его основе лежит молекулярнокинетическая теория, которая исходит из известных классических и квантовомеханических представлений о внутреннем строении вещества и взаимодействии между частицами и квазичастицами. Поэтому все теории опираются на методы теории вероятности и используют законы молекулярной электродинамики и статической физики.

Квантовые теории ионизации электронным ударом. Теория Хиппеля – Коллена или теория ударной ионизации медленными электронами. Ее критерием является условие, достаточное для образования лавины электронов в твердом диэлектрике при воздействии внешнего электрического поля свободных электронов; энергия таких электронов растет до энергии ионизации в результате нескольких столкновений друг с другом и нейтральными молекулами в электрическом поле за время свободного пробега между двумя столкновениями: $We = m v^2 / 2 = 4 h v$.

Теория Фреляха или теория ударной ионизации быстрыми электронами, согласно которой в отсутствие внешнего электрического поля имеется некоторая вероятность наличия электронов с энергиями, близкими к энергии ионизации, и именно эти электроны становятся свободными, если они попадают в это электрическое поле, именно они ускоряются и проводят процесс ионизации, т.е. резко увеличивают проводимость и приводят в дальнейшем к электрическому пробую.

Квантовомеханические теории электрического пробоя. Теория электростатической ионизации предполагает существенное увеличение электронной проводимости твердого диэлектрика в следствие перехода электронов в зону проводимости за счет туннельного эффекта как из нормальной зоны, так и из зоны проводимости; здесь ширина запрещенной зоны (потенциальный барьер) обратно пропорциональна напряженности внешнего электрического поля и уменьшается с увеличением напряженности, при этом растет угол наклона уровней зон. **Теория ударной ионизации** при достаточно большой величине напряженности внешнего электрического поля и перемещении электронов в зоне проводимости с нижнего уровня на верхний или в нормальной зоне с верхнего на нижний уровень. Тогда, растет их энергия и при частичных потерях ее при взаимодействии с кристаллической решеткой возникает все же лавинный процесс. Столкновение двух электронов на нижнем уровне зоны проводимости или на верхнем уровне нормальной зоны приводит к тому, что один электрон передает другому энергию, достаточную

для преодоления потенциального барьера и перехода в другую зону, т.е. в диэлектрике растет проводимость и формируется канал пробоя диэлектрика.

Композиционный диэлектрик. В настоящее время в оценке электрического пробоя сложной композиции не представляется возможным провести расчеты из-за отсутствия исходных данных для подобных расчетов. По этой причине имеет право на существование метод количественного энергетического анализа или феноменологическая теория Ю. Н. Вершинина. Этот метод основан на представлении физических процессов в разрядных промежутках, когда механизм электронно-дырочной проводимости приводит к возникновению на расстоянии несколько сот микрон от острия электрода объемного заряда или области локального поля, ограниченного высокой напряженностью. Напряженность искривляет энергетические зоны, создавая условия для туннельного перехода по направлению к острию основных носителей зарядов: свободных электронов к положительному электроду, дырок - к отрицательному. Взаимодействие в процессе ударной ионизации электронов и дырок проводимости с электронами, участвующими в образовании химических связей, приводит к нарушению соответствующих связей и переходу твердого вещества в состояние частично ионизированной газовой плазмы в направлении движения потока носителей зарядов.

Образование газовой плазмы рассматривается как термодинамический баланс энергии в диэлектрике. Таким образом, кинетическая энергия носителей зарядов затрачивается на изменение внутренней энергии A_e единицы объема диэлектрика, при котором возникает начальный участок канала неполного пробоя - это энергетический критерий пробоя диэлектрика. Пробивное напряжение диэлектрика выражается империческим выражением

$$U_{пр} = K_n K_p K(\tau, d) A_e^{1,1}$$

где K_n - коэффициент, учитывающий форму электрического поля и полярность электродов: для “+” знака на острие электрода и “-” - на плоскости электрода $K_n = 1$; для обратной полярности электродов $K_n = 1,52$; для электродов шар - плоскость $K_n = 1,82$; $K_p = 0,75 + 0,5 P$ - коэффициент вероятности пробоя или пробойного напряжения $P(U_p)$; $K(\tau, d) = 3,55 d^{0,365} \tau^{0,11}$ - коэффициент, зависящий от толщины диэлектрика, мм и времени воздействия напряжения, мкс; A_e - удельная энергетическая характеристика диэлектрика, ккал см³, индивидуальная для каждого вида диэлектрика сложной композиции и находится с учетом физических свойств и особенностей молекулярного строения

$$A_e = 1,08 \gamma / M (\Delta H_a + n W_{\text{имин}}),$$

где 1,08 - коэффициент, учитывающий силы отталкивания в плотной газовой плазме; γ - плотность диэлектрика, г см³; M - молекулярный вес, г; ΔH_a - сум-

марная энергия связей атомов в молекуле, ккал моль; n - число атомов, обладающих минимальной энергией ионизации W_{imin} .

Расчетное пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ хорошо согласуется с экспериментальными данными для исследуемого сложного диэлектрика, если их брать при напряжении равном 50% пробивного, получаемого в слабонеоднородном поле при $d = 1$ мм и $\tau = 1$ мкс.

1.7.3. Кратковременная и одноминутная электрическая прочность

Электрический пробой твердых диэлектриков однородной структуры по своей природе связывается с появлением свободных электронов, т.е. таких электронов, которые обладают достаточной энергией, чтобы возбудить нейтральные молекулы до их ионизации. Свободные электроны становятся причиной лавинного процесса в структуре и в результате образуется канал пробоя. Электрический пробой однородной структуры - это явление, при котором исключается влияние потерь, вызывающих нагрев диэлектрика, а также отсутствует ионизация газовых включений. Таким образом, для такого диэлектрика электрический пробой будет мерой электрической прочности материала. В сложной композиции (технический диэлектрик) канал пробоя развивается быстро, как и в однородной структуре. Если композиционный материал находится в равномерном или неравномерном электрическом поле, то пробивные напряжения мало отличаются друг от друга. Установлено, что электрическая прочность твердых неоднородных диэлектриков не зависит или мало зависит от толщины материала, и будет оцениваться наличием дефектов, т.е. неоднородностью структуры по рисунку 1.19. Снижение электрической прочности с увеличением толщины твердого диэлектрика – это, прежде всего увеличение вероятности появления дефекта на участке диэлектрика, который подвергается воздействию внешнего электрического поля. Поэтому различают область высокой электрической прочности диэлектрика или вероятность отсутствия дефекта в структуре и область низкой электрической прочности, где вероятность присутствия дефекта очень большая.

Электрическая прочность твердого технического диэлектрика находится из напряженностей внешнего $E_{\text{вн}}$ электрического поля и суммарной напряженности внутренней $E_{\text{в}}$, возникающей под действием сил электрического поля между электродами 2, 3 внутри диэлектрика 1: поляризации (дипольная E_1 , миграционная E_2 и E_3 на границах раздела) и ионизации в газовом включении E_4 по рисунку 1.20. Результирующая напряженность выразится

$$E_p = E_{\text{пр}} = E_{\text{вн}} - E_{\text{в}}.$$

Расчетное значение электрической прочности находится формуле (1.8).

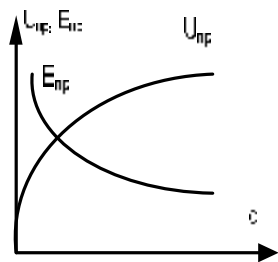


Рис.1.19. Электрическая прочность и пробивное напряжение от толщины диэлектрика с дефектом

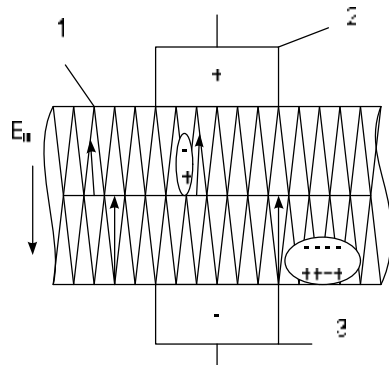


Рис.1.20. Напряженность внешняя $E_{в}$ и внутренняя $E_{в}$ от разности потенциалов

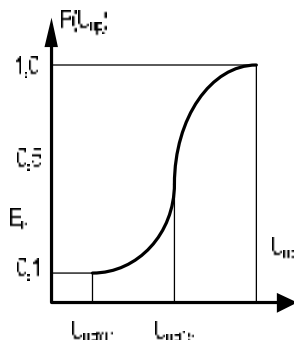


Рис.1.21. Интегральная кривая вероятностей пробивных напряжений

Электрический пробой при одной и той же толщине твердого диэлектрика подчиняется статистическим закономерностям и имеет значительный разброс дискретных значений пробивного напряжения $U_{пр}$ из-за вероятностей дефектов. Поэтому вероятность получения одного и того же значения $U_{пр}$ при многократном пробое большой площади диэлектрика маловероятна, что видно из рисунка 1.21

Вероятность появления минимального значения $U_{прmin}$ говорит о большом количестве дефектов в объеме испытуемого диэлектрика, а вероятность появления максимального значения напряжения $U_{прmax}$ - прежде всего об отсутствии дефектов в этом месте твердого диэлектрика, т.е. о его однородной структуре под электродами 2, 3 из рисунка 1.20. 50%-ное или при вероятности 0,5 пробивное напряжение используется для выбора рабочего напряжения $U_{раб}$ аппарата, в котором можно использовать изоляционный материал, подвергающийся испытанию. С этой целью сначала по формуле (1.8) находят электрическую прочность диэлектрика, а затем полученный результат делят на четыре, предполагая, что запас электрической прочности изоляционной конструкции должен быть в 4 раза выше рабочего (номинального) напряжения аппарата. Найденное значение, равное или близкое к меньшей величине стандартного рабочего (номинального) напряжения аппарата, рекомендуют как рабочее напряжение для данного диэлектрика. Рабочие (номинальные) напряжения электрических аппаратов $U_{раб}$ в кВ: 0,22; 0,4; 0,6; 1,0; 3,0; 6,0; 10,5; 15,75; 20; 35; 110; 220; 500.

Определение электрической прочности твердых диэлектриков проводят по ГОСТ 6433.3 - 71. Изменение напряжения может быть плавным (кратковременным) или ступенчатым (одноминутным). При плавном изменении напряжение повышают от нуля до пробоя равномерно, чтобы пробой диэлектрика произошел через 10 - 20 с после начала повышения напряжения. По результату пробивного напряжения по формуле (1.8) находят кратковременную электрическую прочность. Во втором случае напряжение поднимают от величины 0,5 ожидаемого пробивного напряжения ступенями. На каждой ступени выдерживают напряжение в течение 1 мин. Увеличение напряжения

производят через 0,2 от величины напряжения первой ступени и увеличивают его до пробоя.

Таким образом, при пробивном напряжении по формуле (1.8) находят одномоментную электрическую прочность, которая на 20 - 25 % ниже кратковременной по причине возможного электрического старения диэлектрика за время оценки или испытания.

1.7 .4. Факторы, влияющие на электрическую прочность диэлектрика

Толщина изоляции. Любая изоляция аппарата определяется расстоянием между электродами. При увеличении этого расстояния растет и толщина h изоляции. Увеличение h изоляции приводит к возрастанию допустимых значений напряжений $U_{пр}$ и $U_{пр0,5}$, соответствующих требуемым вероятностям пробоя при малой и максимальной повреждаемости диэлектрика. Для основных видов изоляции высоковольтных аппаратов крупногабаритной конструкции допустимые напряженности составляют: $E_{пр} < 400$ кВ/см, $E_{пр0,5} < 200$ кВ/см. Характерный вид зависимости напряжения и распределения напряженности от толщины изоляции в конструкции в/в аппарата представлен на рисунке 1.19. Замедление роста напряжения по мере увеличения толщины изоляции связано с изменением электрического поля в сторону неравномерности или увеличением вероятности присутствия дефектов. По этой причине вводят коэффициент неоднородности K_n с использованием правила максимальной напряженности, по которому в изоляционном промежутке при любой заданной вероятности пробоя или повреждения изоляции нет зависимости от толщины h и от коэффициента K_n . Если максимальная напряженность в изоляции $E_{max} = U / h K_n$, то из указанного правила вытекает следующее соотношение допустимых напряжений для двух конструкций с изоляцией одного и того же вида:

$$U_{пр1} / U_{пр2} = h_2 K_{n1} / h_1 K_{n2}.$$

Удовлетворительные результаты изоляционных конструкций, работающих в неоднородном электрическом поле, получаются при $K_n < 3$.

Площадь электродов. С увеличением площади электродов электрическая прочность снижается. Если рассмотреть зависимости вероятностей пробоя или повреждения изоляции по рисунку 1.1 в зависимости от площади электродов, то окажется, что напряжение будет снижаться. Эмпирическое выражение, связывающее допустимые напряжения для конструкции с площадями электродов соответственно S_1 и S_2 , запишется как

$$U_{пр2} - U_{пр1} = \sqrt{6} / \pi (\sigma \ln(S_2 / S_1)),$$

где у первой конструкции площадь электродов S_1 , а у второй $S_3 = n S_1$ при $n > 1$; σ - среднеквадратическое отклонение математического ожидания напряжения пробоя.

1.7.5. Пробой твердых диэлектриков в эксплуатации

Электротехнические свойства твердых диэлектриков в электрическом поле обусловлены временем их эксплуатации или «кривой жизни» по рисунку 1.22.

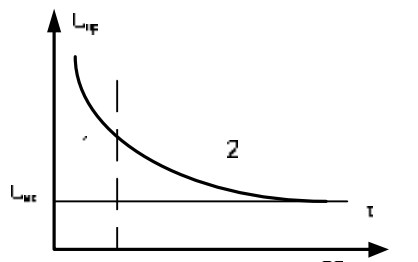


Рис. 1.22. «Кривая жизни» (регрессии) твердого диэлектрика
1 - приработочный период; 2 - рабочий

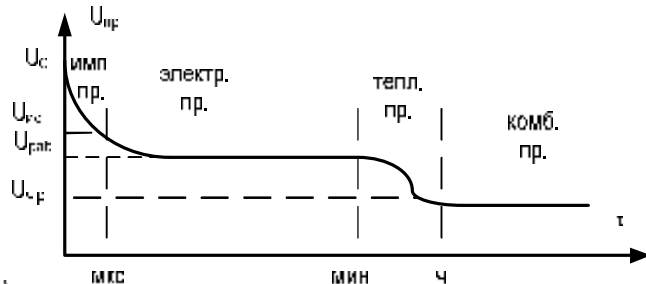


Рис. 1.23. Вольтвременная зависимость пробоя изоляции электрооборудования

На изоляцию за время эксплуатации воздействуют: электрическое поле рабочего напряжения, повышенное испытательное и перенапряжения; тепловой и механический факторы; электролитические процессы и др. воздействия. Весь комплекс факторов проявляется в состоянии изоляции в приработочный период, когда отмечается наибольшее число отказов изоляции электроаппаратов. В рабочий период пробой изоляции - редкое явление; в это время электрическая прочность изоляции контролируется путем испытания ее повышенным напряжением в течение 1 мин. За период эксплуатации можно выделить следующие пробой изоляции по рисунку 1.23: **импульсный**, когда разрушение изоляции происходит в очень короткий период времени (микросекунды) при значительной амплитуде воздействующего напряжения, грозового или коммутационного характера, и без выделения тепла; **электрический**, когда амплитуда напряжения еще выше рабочего (номинальной) и время ее воздействия сравнимо с явлением структурной (миграционной) поляризации в изоляции и отсутствует выделение тепла при пробое; **тепловой**, для которого характерно явное выделение тепла или разогрев изоляции при напряжении не выше испытательного; **комбинированный** пробой при длительном воздействии рабочего напряжения, коронных явлений и частичных разрядов с явным электролитическим процессом и изменением структуры твердого диэлектрика.

1.7.6. Частичные разряды в изоляции

Понятие частичные разряды (ч. р.) в твердом диэлектрике - это местные пробои на поверхности или внутри изоляции аппарата в виде короны скользящего разряда или частичного пробоя элемента изоляции. Характеристики ч. р.

позволяют выбирать допустимые рабочие и испытательные напряженности изоляционной конструкции аппарата высокого напряжения. Возникновение ч. р. сопровождается как нейтрализацией некоторого заряда q в толщине диэлектрика, так и изменением напряжения на внешних электродах образца емкостью C_x на величину $\Delta U_x = q_{\text{ч.р.}} / C_x$. Эквивалентная схема может быть представлена тремя емкостями, где $C_x = C_0 + (C_v C_d / (C_v + C_d))$, или суммой полной емкости C_0 и последовательно включенных емкостей: емкости элемента диэлектрика C_v с газовым включением, где развивается ч. р., и оставшейся части диэлектрика C_d по рисунку 1.24.

В результате можно получить

$$d_{\text{ч.р.}} = \Delta U_x C_x = \Delta U_x \frac{C_v C_d}{C_v + C_d} = q \frac{C_d}{C_v + C_d}.$$

Нейтрализация заряда и связанное с этим изменение напряжения на образце приводит к высокочастотным колебаниям в электрической схеме в виде всплесков тока, снижения внешнего сетевого напряжения и появления электромагнитных колебаний в области ч. р. изоляции. Такие изменения в изоляции могут оценить регистрирующие устройства в виде индикаторов ч. р. (ИЧР) или радиоизлучения ч. р. (ИРИ). Если к твердому диэлектрику прикладывать кратковременные импульсы напряжения (грозового или коммутационного характера) амплитудой выше рабочего напряжения, то в нем развиваются микроскопические трещины. В некоторых аморфных диэлектриках (стекло, канифоль, целлулоид) трещины самозалечиваются и при повторных импульсах возникают в новом месте. В большинстве твердых диэлектриков при импульсах ч. р. развивается по пути предыдущего, вследствие чего микротрещина (дефект) увеличивается. Явление, отражающее накопление дефекта в изоляции, называется кумулятивным эффектом. Снижение пробивного напряжения изоляции в зависимости от числа воздействий характеризуется коэффициентом кумулятивности K_k , равным отношению пробивных напряжений при единичных и многократных воздействиях: $K_k = U_{\text{пр1}} / U_{\text{прn}}$.

Известны следующие виды ч. р. в изоляции по рисунку 1.25:

начальные ч. р., слабая интенсивность которых не приводит к заметному разрушению изоляции или уменьшению напряжения ч. р. при кратковременном воздействии;

критические ч. р., значительная интенсивность которых вызывает заметное разрушение (кумулятивный эффект) изоляции, сопровождающееся снижением напряжения ч. р.

В обоих случаях имеют место напряжения возникновения $U_{\text{вч.р.}}$ и погасания $U_{\text{вч.р.}}$ частичного разряда и при постоянном напряжении возникающие ч. р. оказывают существенное влияние на старение изоляции. Здесь, как и при переменном напряжении возможны пробой участков изоляции с пониженной электрической прочностью (газовые включения). Однако, при постоянном напряжении интенсивные ч. р., типа критических, отмечаются только при включении напряжения или при его быстром изменении во времени. Поэтому ч. р. образуются на границах газовых включений в виде поверхност-

ных зарядов от ионизации процессов, напряженности дополнительного поля, которое направлено против основного, и вызывает ослабление результирующей напряженности. Различают напряженность погасания ч. р., когда идет стекание поверхностных зарядов через проводимость изоляции и пропитывающие составы поверхности, и напряженность включения ч. р., зависящие от приложенного напряжения.

1.7.7. Электрическое старение изоляции при длительном воздействии рабочего напряжения

Длительное воздействие рабочего напряжения аппарата определяет способность его изоляции выдержать влияние всевозможных факторов за время всего срока эксплуатации и численно оценивается электрической прочностью через 20 - 30 лет путем испытания изоляции повышенным напряжением частотой 50 Гц в течение 1 мин. Длительная эксплуатация изоляции приводит к ее старению, снижению электрической прочности и ухудшению электрических характеристик (диэлектрической проницаемости и потерь). Причинами изменения этих характеристик являются: **электрическое старение** вследствие развития ч. р. при перенапряжениях (грозового и внутреннего характера) или при рабочем напряжении; **тепловое старение** и окисление изоляции; увлажнение изоляции, а также причины механического характера (электродинамические толчки при коротких замыканиях, вибрации и т.п.); **химическое старение** или электролитическое окисление. В процессе старения увеличиваются диэлектрические потери в изоляции, что приводит в дальнейшем к ее пробою. Основной причиной электрического старения является развитие ч.р., энергия которых тратится на разрушение молекул и ионизацию атомов, нагрев диэлектрика и излучение электромагнитных колебаний. Необратимое частичное разрушение диэлектрика накапливается, создавая кумулятивный эффект в изоляции, на что тратится несколько процессов всей энергии ч.р. Характер и степень разрушения в твердом диэлектрике связаны с разрывом молекулярных связей и образованием радикалов или обратных процессов: образование молекул или присоединение радикалов. В органических диэлектриках ч.р. вызывают выделение водорода или других газов (метан, ацетилен, углекислый газ и др.), а также углеродистых соединений со значительной проводимостью (дендриты в эпоксидном образующем термоактивной изоляции, эрозия или углекислые образования по поверхности керамической, фарфоровой или стеклянной изоляции). Во многих случаях явление ч.р. может вызвать микротрещины в диэлектрике.

Старение маслобарьерной и бумажной изоляции проявляется в изменении электрических и физико-химических характеристик, как самого минерального масла, так и бумаги или электрокартона. При этом проводимость и диэлектрические потери увеличиваются, в дальнейшем старение завершается электрическим или тепловым пробоем изоляции аппарата. Газовыделение в масле связано с действием сильного электрического поля (около 3 ЭВ), достаточного, чтобы свободные электроны разрушили молекулу углерода с от-

щеплением атома водорода. Интенсивность газовыделения при наличии ч.р. или в его отсутствие зависит от химического состава масла, поэтому количество трансформаторного масла определяется месторождением нефти, возможными присадками и его очисткой.

Тепловое старение диэлектрика связано с рабочей температурой аппарата. Возможность повышения температуры ограничивается свойствами изоляции, так как чем выше температура, тем быстрее происходит химическое старение и осуществляется процесс химических реакций. Например, при повышении температуры химическое разложение целлюлозы характеризуется уменьшением степени полимеризации, при этом укорачиваются цепочки молекул, уменьшается гибкость и механическая прочность бумаги и картона.

Изоляционная конструкция во многих аппаратах в рабочем режиме соприкасается с воздухом, при этом возможно увлажнение. Процесс увлажнения масла в трансформаторах может быть от трех агрегатных состояний влаги: эмульгированное (пленка), молекулярнорастворенное (диполи) и газообразное (молекула влаги в газовой полости). Растворимость воды зависит от химического состава масла. Наибольшей растворимостью обладают непредельные и ароматические углеводороды, наименьшей – парафиновые. Наличие воды в масле снижает его электрическую прочность и увеличивает диэлектрические потери. Причем влияние воды сильнее сказывается, когда она находится в эмульгированном состоянии, чем в молекулярнорастворимом. Влажность увеличивает скорость термического старения, способствует разрушению молекул органического диэлектрика, ухудшает физико-технические характеристики.

ГЛАВА 2. КОНТРОЛЬ ЗА КАЧЕСТВОМ ИЗОЛЯЦИИ

2.1 Качество изоляции

Качество технической изоляции определяется не только культурой производства, но и налаженной службой контроля или проверки соответствия качества изоляции ГОСТу или заводским нормам. Контроль за качеством изоляции на производстве при изготовлении и выпуске электротехнического оборудования и профилактика изоляции в эксплуатации направлены на выявления ее дефектов с последующей заменой или восстановлением поврежденного изоляционного участка.

В изоляционной конструкции различают местные и общие дефекты.

Местные дефекты сосредоточены на небольшом участке изоляции и проявляются в виде газовых (воздушных полостей) и металлических включений, примесей, а также в виде механических и технологических нарушений (микротрещин, заусениц, морщин, смещений слоев ленты, вмятин и т. п.). **Общие дефекты** наиболее распространены, среди них чаще обнаруживается проникающая влага в изоляцию, реже выявляются дефекты развитого газового включения и проводящей примеси.

Разрушение изоляции в начале эксплуатации протекает медленно, а в конце - носит скачкообразный характер.

Методы контроля за качеством изоляции - это разрушающие методы при испытании повышенным напряжением и обнаружение дефектов под воздействием напряжения ниже номинального уровня или рабочих напряжений без разрушения изоляции.

Опыт применения профилактических испытаний высоковольтной изоляции сводится к повышению надежности изделий в работе или к снижению вероятностей отказов электрооборудования.

3.2. Испытание изоляции повышенным напряжением

Изоляция электрооборудования в условиях эксплуатации подвергается воздействию рабочего напряжения, перенапряжений внешнего и внутреннего характера и физико-механических факторов - теплового поля, вибраций, электродинамических усилий и т.д. Пооперационные испытания повышенным напряжением позволяют оценить способность изоляции противостоять таким воздействиям.

Повышенное испытательное напряжение должно:

- эффективно обнаружить все виды дефектов;
- не старить изоляцию, т.е. не развивать дефект, если он выдержал испытания;
- дать распределение напряженности поля по изоляции во время испытания идентичное перенапряжению во время эксплуатации;
- установки повышенного напряжения должны быть транспортабельны, простые в обслуживании и электробезопасны.

В понятие эффективности испытания вкладывают различное содержание, вследствие чего сравнение эффективности испытаний, проводимых различными специалистами затруднительно, а порой невозможно. Одни оценивают эффективность испытаний отношением числа выявляемых дефектов к числу испытаний машин, другие определяют отношение числа выявленных дефектов при испытаниях к числу машин, изоляция которых повреждена в эксплуатации за период времени между двумя испытаниями. В обоих случаях такой подход формальный. В ряде случаев дается оценка эффективности испытаний с применением нескольких форм испытательных напряжений и при неоправданно завышенных величинах испытательного напряжения. Наряду с большим числом пробоев изоляции во время испытаний ожидается кумулятивный эффект в ней и, как следствие, аварийность изоляции в эксплуатации не снижается. Все вышесказанное относится как к традиционным испытаниям повышенным напряжением, существующим в настоящее время в Нормах и ГОСТах (это повышенное переменное напряжение промышленной частоты в течение 1 мин и выпрямленное в течение 5 Мин, а также импульсное напряжение стандартной волны 1,5/40 мкс и срезанной - 1,5/2 мкс - «трех ударный метод»), так и к нетрадиционным - это другие формы повышенных напряжений: трапецеидальная (завод «Электросила»), сверхнизкочастотная 0,1

Гц (США). полупериод напряжения 50 Гц (Нидерланды, ЛПИ им. М.И. Калинина). Анализ форм испытательных напряжений сведен в таблицу 2.1

Таблица 2.1. Показатели различных форм повышенных напряжений

Формы напряж., ед.СИ	повш.	Эффектив-ть	Эл. ста-рение	Ииден-тич-ность	Трансп., об-служ.,эл./безоп.	прост.	Приме-ч
Перемен. 50 Гц	0	0	0	+	+		Зав.
в течение 1 мин							.
Выпрямл. 5 мин.	0		+	-	-		-«-
Им-пульс.напрж. 1,5/40 мкс	+		+	0	-		-«-
Полупер. 59 Гц	+		+	0	+		-«-
СНЧ 0,1 Гц	+		-	-	-		-«-
Трапецеидальн.	+		0	0	-		-«-

Примечание: «+» - полностью удовлетворяет требованию; «-» - не удовлетворяет; «0» - частично удовлетворяет

2.2. Устройство полупериода 50 Гц для получения высокого напряжения

В области разрушающего метода электрических испытаний высоковольтной изоляции электрических машин известны два способа оценки ее качества. Для пазовой изоляции испытания ведут повышенным переменным напряжением промышленной частоты в течение 1 мин, а лобовую изоляцию - повышенным выпрямленным напряжением в течение 5 мин. Однако установлено, что переменное напряжение вызывает явление частичных разрядов в области дефекта, что способствует развитию электрического старения в изоляции. Кроме того, оно может привести к развитию скользящего разряда по поверхности изоляции лобовой части. Именно поэтому в заводских условиях испытание изоляции лобовой части обмоток крупных электрических машин проводят повышенным выпрямленным напряжением. но при этом дефекты изоляции пазовой части не выявляются.

Исключить недостатки двух форм напряжений может устройство, создающее повышенное напряжение полупериода частотой 50 Гц.

В первых, такая форма напряжения характерна для большинства амплитуд внутренних перенапряжений, например, поступающих на вводы высоковольтных машин собственных нужд крупных электростанций. Во вторых, анализ большого статистического материала по электрической прочности для разной изоляции электрических машин показал, что во время испытаний таким напряжением изоляция не старится, а эффективность обнаружения дефекта не хуже, чем при испытании повышенным напряжением промышленной частоты. Напряжением полупериода 50 Гц можно испытывать изоляцию стержней крупных генераторов с номинальным напряжением 23 кВ, при этом не наблюдается перекрытия по лобовой части обмоток, несмотря на то, что амплитуда напряжения в 1,5 - 2 раза выше, чем при испытаниях переменным напряжением. Режим испытания напряжением полупериода 50 Гц устанавливается 50 - 80 полупериодов со скважностью 1 с и с величиной испытательного напряжения согласно таблице 2.2.

Таблица 2.2. Нормы пооперационных испытательных напряжений полупериода 50 Гц

ИСПЫТАНИЯ	Напряжение полупериода 50 Гц
Заводские	
1. Стержни (катушки) до укладки	1,5 (2,75 U_n + 6,5)
2. То же после укладки их в пазы	1,3 (2,5 U_n + 4,5)
3. То же после пайки и изолировки соединений	1,3 (2,25 U_n + 4,0)
4. Прием – сдаточное	1,3 (2,0 U_n + 3,0)
Профилактические	
1. Послеремонтные	1,3 (2,0 U_n + 3,0)
2. Эксплуатационные	1,5 (1,5 – 1,7) U_n

В соответствии с данными табл. 3.2 проводят испытания стержней (катушек), вводимых в эксплуатацию электрических машин, а также находящихся в эксплуатации. Изоляция каждой фазы или ветви испытывается отдельно при других фазах или ветвях, соединенных с корпусом машины.

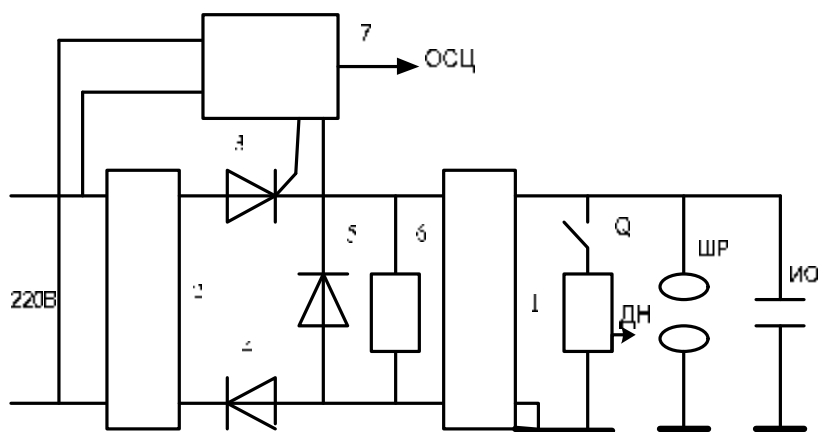


Рис. 2.1. Функциональная электрическая схема высоковольтной установки с напряжением полупериода 50 Гц

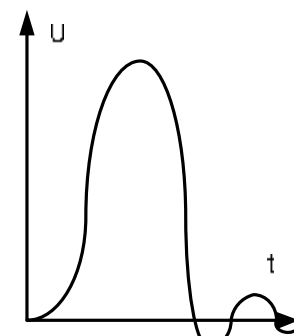


Рис.2.2. Форма напряжения полупериода 50 Гц

Функциональная схема высоковольтного устройства с напряжением полупериода 50 Гц по рисунку 2.1 может быть выполнена на базе любого высоковольтного испытательного трансформатора типа ИОМ или стационарных испытательных заводских установок повышенного напряжения для контроля изоляции, например, типа АИИ-70. В схеме однофазное переменное напряжение с соблюдением фазности одновременно подается на регулятор напряжения 2 и на блок управления 7. Регулятор 2 меняет напряжение от 0 до максимального значения, а блок 7 позволяет осуществить задержку входного напряжения частотой 50 Гц. Тиристор 3 работает в ключевом режиме с углом задержки $\alpha = 60^\circ$. Управляющий сигнал с блока 7 позволяет плавно менять время между полупериодами (скважность) от долей секунды до нескольких секунд. Тиристор 3 пропускает в течение 1 мин оптимальное число полупериодов на уровне 50 - 80 положительной (отрицательной) полярности. Высоковольтный трансформатор 1 передает во вторичную цепь испытуемого объекта ИО повышенное напряжение, близкое полупериоду 50 Гц. Осциллограф, подключенный к делителю напряжения ДН, показывает форму напряжения, которая приводится на рисунке 2.2.

Амплитуду испытательного напряжения можно измерить осциллографом или шаровым разрядником ШР. Во время пробоя изоляции, на испытуемом объекте ИО, в первичной цепи обмотки трансформатора 1 растет ток. Для защиты тиристора 3 и температурной компенсации от возрастающего тока в первичной цепи включен диод 4, а параллельно включенные диод 5 и резистор 6 исключают переходный процесс в обмотке трансформатора 1.

При оценке качества изоляции соблюдается нижеприведенная **методика изменения напряжения полупериода 50 Гц** на выходе установки.

Напряжение повышается ступенями через 5 кВ до значения пробивного или испытательного напряжения согласно таблице 2.2. При этом на каждой ступени могут быть подан один или 50 - 80 полупериодов напряжения, которые фиксируются счетчиком. Устройство высокого напряжения полупериода 50 Гц представляет интерес для энергосистем, энергоремонтных предприятий и заводов-изготовителей, где проводят электрические испытания высоковольтной изоляции, что позволит, с одной стороны, исключить электрическое

старение и скользящий разряд во время испытаний изоляции, а с другой - заменить две формы испытательных напряжений при контроле изоляции электрических машин (переменную 50 Гц и выпрямленную) одной формой – напряжением полупериода 50 Гц.

2.3. Неразрушающий метод контроля изоляции

Такой контроль построен на оценке процессов медленной поляризации, которая происходит в изоляции. Изоляция может быть представлена параллельной схемой замещения, приведенной на рисунке 2.3. Первая ветвь ее состоит из емкости C_i (мгновенные поляризации с импульсным током I_i), вторая - из емкости C и сопротивления r (релаксационные поляризации с абсорбционным током $I_{абс}$), третья - из сопротивления R , когда протекают токи проводимости $I_{пр}$. Суммарная емкость схемы равна

$$C_0 = C_i + C,$$

где $C = C_0 - C_i$ - емкость поляризационных процессов в изоляция, по которой течет абсорбционный ток $I_{абс} = (U / r) e^{-t/T}$, изменяющийся с постоянной времени T .

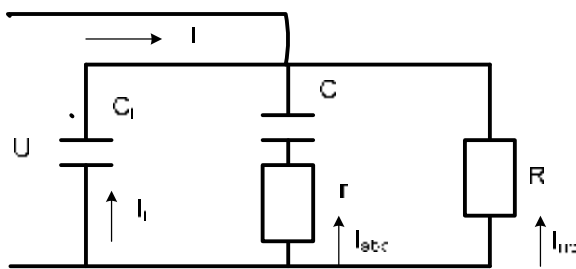


Рис.2.3. Электрическая схема замещения изоляции

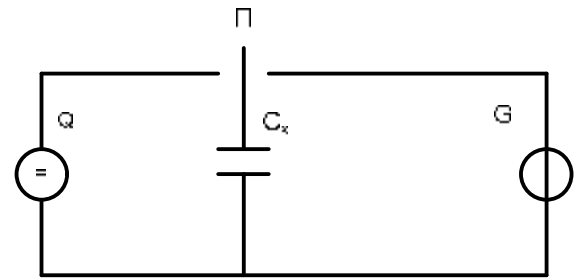


Рис.2.4. Принципиальная электрическая схема измерения емкости

Через емкость C_i протекает импульс тока I_i заряда емкости или токи поляризации, которые считаются мгновенными. Релаксационные поляризация характерны для оценки не только абсорбционных токов, но и токов сквозной проводимости $I_{пр} = U / R$, протекающих через сопротивление R и обусловленных сквозными путями утечки в изоляции при образовании мостика из влаги. На схеме замещения можно рассмотреть многие из способов контроля изоляции неразрушающим методом. Поляризационные явления, как и каналы сквозной проводимости, связываются в основном с увлажнением изоляции. Поэтому качество изоляции определяется по оценке токов в схеме замещения

2.3.1. Измерение сопротивления изоляции или сквозной проводимости

Сопротивление изоляции из рисунка 2.3, определяемое как $R_{из} = U / I$, где $I = I_i + I_{абс} + I_{пр}$, растет, если ток I падает во времени. К моменту времени $T = 1$ мин после приложения напряжения U сопротивление $R_{из}$ достигает ус-

тановившегося значения. Резкое падение сопротивления показывает на далеко зашедшее развитие дефекта или наличие сквозной проводимости в изоляции. Чем больше изоляция содержит посторонних включений, в частности, чем больше она увлажнена, тем меньше отношение R_{60} к R_{15} в моменты времени $t_1 = 15$ с и $t_2 = 60$ с, когда измеряются сопротивления от токов $I_{абс}$ и $I_{пр}$. Измерение сопротивления изоляции осуществляется мегаомметрами, содержащими маломощный генератор постоянного тока напряжением 0,5 - 2,5 кВ с ручным или электронным приводом.

2.3.2. Измерение угла диэлектрических потерь

Поляризационные токи, протекающие через диэлектрик, разогревают его, что соответствует потере энергии, называемой диэлектрической. При промышленной частоте такие потери происходят за счет релаксационных поляризаций или токов $I_{абс}$ и $I_{пр}$ по рисунку 2.3, т.е. активной и емкостной суммарной составляющих токов, а в векторной диаграмме между этими составляющими появится угол δ . Отношение тока активного I_a к току емкостному I_c равно $\text{tg}\delta$, что является характеристикой диэлектрических потерь в изоляции, которые можно определить из выражения

$$W = U I \cos\varphi = U I \text{tg}\delta.$$

Поскольку токи сквозной проводимости малы, измерение угла диэлектрических потерь определяется параметрами ветви Γ C , т.е. угол δ является показателем посторонних включений и, в частности, увлажнения изоляции. Величина $\text{tg}\delta$ не зависит от абсолютного значения емкости объекта, а зависит от отношения C_0 / C_i . Поэтому $\text{tg}\delta$ становится универсальным показателем качества изоляции, не зависящим от ее габаритов.

Для **малогаборитных** объектов емкостью порядка 200-300 пФ (например, вводы трансформаторов тока или внешняя изоляция, различные изоляторы) значение $\text{tg}\delta$ характеризует общее состояние изоляции и может отметить развивающийся местный дефект. Для **крупногаборитных** объектов емкостью выше 2000 пФ, например, изоляция крупных генераторов, электродвигателей, трансформаторов, кабелей и т.д. значение $\text{tg}\delta$ указывает на увлажнение изоляции, на общее старение, частичное разрушение (микротрещина) и т.п. Такие дефекты в изоляции как весьма развитые металлические включения или мостики повышенной проводимости, могут быть обнаружены и на постоянном токе.

Величина $\text{tg}\delta$ и сопротивление сквозной проводимости растут с увеличением температуры свыше 40 °C, поэтому эти параметры нормируются при температуре 20 °C. Измерение $\text{tg}\delta$ изоляции осуществляется высоковольтными мостами по схеме Шеринга типа Р-5026 с рабочим напряжением 5 - 10 кВ промышленной частоты.

2.3.3. Измерение емкостных характеристик изоляции

При неизменной температуре и частоте емкость объекта остается постоянной. Если она изменяется скачкообразно, то это крупный развитый дефект в изоляции, такой как хорошо проводящее включение, шунтирующее часть изоляции. Для увлажненной изоляции в крупных объектах оценка емкости может оказаться зависящей от частоты. т.к. C_i , минимальна при $\omega \rightarrow \infty$ и минимальна при $\omega \leftarrow 0$. С другой стороны, посторонние включения не влияют практически на емкость C . Измерение емкости объекта можно вести при двух частотах: низкой C_n и высокой C_v , а отношение C_n / C_v покажет качество изоляции. Для сухой изоляции $C_n / C_v = 1,2 - 1,3$, а по мере ее увлажнения отношение, измеренное на частотах 2 и 50 Гц, возрастает.

Принципиальная электрическая схема измерения емкости приведена на рисунке 2.4. Переключатель Π в левой части заряжает емкость C_x (объект, изоляции) от источника постоянного напряжения в несколько сотен вольт, а в правой части Π разряжает емкость C_x на гальванометр G . Переключение происходит на частотах 2 и 50 Гц (механический вибратор или умформер). Средний ток разрядки емкости изоляции находится как

$$I = q f = C \omega U f.$$

Этот способ измерения получил название «емкость – частота». Измерение абсорбционной емкости возможно и способом «емкость - время», когда измеряется мгновенное значение емкости через 1 мкс и 0,5 - 1 с после приложения зарядного напряжения или после разряда. Таким образом, оценивается в первом случае геометрическая емкость изоляции C , а во втором - абсорбционная емкость ($C_0 - C_i$). Отношение $\Delta C / C_i = (C_0 - C_i) / C$ служи характеристикой изоляции так же как и способе «емкость - частота».

2.3.4. Измерение частичных разрядов из изоляции

Воздушные и газовые включения являются распространенными сосредоточенными -в.дефектами в изоляция. Поскольку диэлектрическая проницаемость воздуха меньше, чем у диэлектрика, то напряженность поля в газовой полости значительно превосходит среднюю напряженность поля в полости изоляции. Поэтому в газовой полости даже при рабочем напряжении и возникают ионизационные процессы, что называется частичным разрядом. Такой разряд вызывает импульс тока порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ с, снижение амплитуды рабочего напряжения и распространение в окружающее пространство электромагнитных волн частотой от 10 кГц до 100 МГц. Во внешней электрической цепи такие факторы могут быть обнаружены и измерены путем: **оценки напряжения на объекте; регистрации импульса тока в цепи; оценки интенсивность электромагнитных волн.**

Обнаружение колебаний напряжения или тока во внешней электрической цепи осуществляют индикаторы частичных разрядов ИЧР, которые включаются непосредственно в испытательную схему. Наличие частичных разрядов можно обнаружить под рабочим напряжением во время эксплуатации изоляционной конструкции. Для этого применяют высокочастотные дефектоскопы, которые имеют с объектом индуктивную связь через специальный щуп. Ток, проходящий в цепи заземления объекта, наводит в рамке щупа электродвижущую силу, которая измеряется с помощью осциллографа или электронного вольтметра.

Другая разновидность приборов позволяет обнаружить частичный разряд с помощью индикатора радиоизлучения ч.р. ИРИ. При таком способе электромагнитные волны, излучаемые ч.р., воспринимаются с помощью антенны, т.е. четко пеленгуется источник излучения. Однако, при измерении параметра источника излучения возможна ошибка в распознавании того, коронное это явление или частичный разряд в газовой полости, а трудности, связанные с наличием большого количества помех, усложняют расшифровку результата. В последние годы в эксплуатации для контроля качества изоляции широко используют акустический метод, определяющий не только наличие частичного разряда, но и место, где он развивается.

ГЛАВА 3. ПРОВОДНИКИ

3.1. Классификация проводников

На современном этапе нет общепринятой классификации проводниковых материалов. Существует, правда, деление проводников по механизму прохождения тока. Если ток обусловлен дрейфом свободных электронов под воздействием электрического поля, то такие проводники называются проводниками с электронной электропроводностью или проводниками первого рода. Проводниками второго рода являются электролиты, прохождение тока через которые обусловлено ионной электропроводностью, а она, как известно, связана с переносом вещества в соответствии с законами Фарадея. Поэтому состав электролита постепенно меняется, а на электродах выделяются продукты электролиза.

Проводники с электронной электропроводностью, как известно, это металлы и сплавы металлов. Металлические проводники в физике, химии, технике классифицируют по разным признакам:

- 1) по составу (чистые металлы и сплавы);
- 2) по значению проводимости (проводники высокой проводимости, имеющие удельное сопротивление при 20 ос не более 0,05 мкОм м, и проводники высокого сопротивления, у которых значение удельного сопротивления при 20 ос не менее 0,3 мкОм м);

3) по положению в периодической системе элементов Д.И. Менделеева (щелочные металлы, благородные, щелочноземельные, многовалентные простые, актиниды, переходные и редкоземельные);

4) по особенностям строения электронных оболочек: нормальные и переходные металлы. К первой группе относятся металлы, используемые для проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов.

Ко второй группе принадлежат элементы 5 группы периодической системы элементов (висмут, сурьма, мышьяк), которые плохо проводят ток (их даже иногда называют полуметаллами). К этой же группе относятся металлы и сплавы высокого сопротивления, широко применяемые для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т.д.

Третья группа включает щелочные металлы (натрий, калий и другие подгруппы 1а) и благородные, к которым в физике относятся только одновалентные металлы подгруппы 1б и т.д.

Четвертая группа. По мере увеличения порядкового номера химических элементов в периодической системе происходит заполнение электронных оболочек в последовательности, определяемой квантовомеханической теорией. Однако, при некоторых порядковых номерах энергии двух соседних оболочек оказываются очень близки, благодаря чему сначала заполняется не очередная, а последующая оболочка. Элементы с таким «сбоем» называются переходными. Они образуют в таблице Менделеева несколько рядов: от скандия до никеля иттрий - палладий, лантан - платина, а также редкоземельные или лантаноиды (от церия до лютеция). Остальные металлы называются нормальными.

Все газы и пары, в том числе пары металлов, при малых напряженностях поля не являются проводниками. Однако если напряженность поля превысит некоторое критическое значение, при котором начинается фотонная и ударная ионизация, то газ становится проводником с электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема оказывается особой проводящей средой, так называемой плазмой.

3.2. Электропроводность металлов

При воздействии на металл электрического (или магнитного) поля (или разности температур) в нем возникают потоки заряженных частиц и энергии. Явления возникновения этих потоков или токов принято называть кинетическими эффектами или явлениями переноса, иначе - транспортными эффектами, имея в виду воздействие стационарных полей на неподвижные проводники. В таком случае ток или поток пропорционален разности потенциалов (или разности температур), а коэффициент пропорциональности определяется только геометрическими размерами проводника и физическими свойствами самого металла. При единичных геометрических размерах этот коэффициент зависит только от свойств данного металла и является его фундамен-

тальной физической характеристикой, которая носит название кинетического коэффициента. При нахождении проводника в переменном поле возникающие в нем токи зависят не только от геометрических размеров и кинетического коэффициента, но и от частоты переменного поля, формы проводника, взаимного расположения элементов электрической цепи. Сопротивление проводника при переменном токе существенно зависит от его частоты, обусловленной скин-эффектом - вытеснением тока из центра проводника на периферию. Из многих возможных кинетических явлений наиболее известны в технике два: электропроводность - способность вещества проводить постоянный электрический ток под действием не изменяющегося во времени электрического поля, и теплопроводность - аналогично по отношению к разности температур и тепловому потоку. Оба эти явления выражаются (количественно) законами Ома и Фурье соответственно:

$$j = \gamma E; \quad \omega = k T.$$

где j - плотность тока, А/м; γ - кинетический коэффициент электрической проводимости (см. в разделе « Диэлектрики », где его название - удельная электрическая проводимость); E - напряженность электрического поля В/м; ω - плотность теплового потока; T - разность температур; k - коэффициент теплопроводности.

На практике обычно используют удельное электрическое сопротивление или просто удельное сопротивление, Ом м

$$\rho = 1 / \gamma.$$

Однако, для проводников разрешается пользоваться внесистемной единицей измерения Ом мм²/м, или рекомендуется применять равную по размерности единицу СИ мкОм/м. Переход от одной единицы к другой в этом случае: 1 Ом м = 10⁶ мкОм м = 10⁶ Ом мм²/м. Сопротивление проводника произвольных размеров с постоянным поперечным сечением определяются:

$$R = \rho l / S,$$

где l - длина проводника, м; S - площадь проводника, м².

Металлы обычно характеризуются как вещества пластичные с характерным «металлическим» блеском, хорошо проводящие электрический ток и теплоту. Для электропроводности металлов типичны: низкое значение удельного сопротивления при нормальной температуре, значительный рост сопротивления при повышении температуры, достаточно близкий к прямой пропорциональности; при понижении температуры до температуры, близких к абсолютному нулю, сопротивление металлов уменьшается до очень малых значений, составляющих для наиболее чистых металлов до 10⁻³ или даже меньшую долю сопротивления при нормальных, + 20 °С, температурах. Для них также характерно наличие связи между удельной электропроводностью и удельной теплопроводностью, которая описывается эмпирическим законом Видемана - Франца, как отношение k / γ приближенно одинаково для разных материалов при одинаковой температуре. Частное от деления k / γ на абсолютную температуру T ($L_0 = k / (\gamma T)$). называется числом Лоренца, является (для всех металлов) величиной мало отличающихся при всех температурах.

Теория кинетических явлений в металлах может объяснить форму зависимости кинетических коэффициентов от температуры, давления и других факторов, с ее помощью также можно вычислить и их значения. Для этого рассмотрим внутреннее строение металлов.

Фундаментальная идея этого раздела физики возникла на рубеже 19 – 20 го столетия: атомы металла ионизированы, а отделившиеся от них валентные электроны свободны, т. е. принадлежат всему кристаллу. Ионы строго упорядочены, образуют правильную кристаллическую решетку; их взаимодействие с отрицательно заряженным облаком свободных электронов такое, что делает кристалл стабильным, устойчивым образованием. Наличие свободных электронов хорошо объясняет высокую электропроводность металлов, а их делокализация обеспечивает высокую пластичность. Значит, наиболее характерной особенностью внутреннего строения металлических проводников является наличие коллективизированных электронов, что подтверждает их электронное строение. В ее простейшей модели совокупность коллективизированных электронов объясняют как электронный газ, в котором частицы находятся в хаотическом тепловом движении. Равновесие устанавливается (если пренебречь столкновениями между электронами) за счет столкновения электронов с ионами. Поскольку тепловое движение полностью не упорядочено, то, несмотря на заряженность электронов, тока в цепи (макроскопического) не наблюдается. Если к проводнику приложить внешнее электрическое поле, то свободные электроны, получив ускорение, выстраиваются в упорядоченную составляющую, которая ориентирована вдоль поля. Поскольку ионы в узлах решетки неподвижны, упорядоченность в движении электронов проявится макроскопическим электрическим током. Удельная проводимость в этом случае может быть выражена с учетом средней длины свободного пробега λ электрона в ускоряющем поле напряженностью E :

$$\lambda = e E \tau / (2 m) \text{ как } \gamma = e^2 n \lambda / (2 m v_{\tau}),$$

где e - заряд электрона; n - число свободных электронов в единице объема металла; λ - средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями; m - масса электрона; v_{τ} - средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

С учетом положений квантовой механики

$$\gamma = K \pi^{2/3} / \lambda ,$$

где K - числовой коэффициент.

Диапазон удельных сопротивлений металлических проводников при нормальной температуре занимает всего три порядка. Для различных металлов скорости хаотического теплового движения электронов при определенной температуре примерно одинаковы. Концентрации свободных электронов различаются незначительно, поэтому значение удельного сопротивления в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике, а она определяется структурой материала проводника. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой имеют ми-

нимальные значения удельного сопротивления. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению удельного сопротивления

Температурный коэффициент удельного сопротивления или средний температурный коэффициент удельного сопротивления выразится

$$\alpha = 1 / \rho (d\rho / dt); \quad \alpha' = 1 / \rho (\rho_2 - \rho_1) / (T_2 - T_1),$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления проводника при температурах T_1 и T_2 соответственно при $T_2 > T_1$.

В технических справочниках обычно приводится величина α' , с помощью которой можно приближенно определить ρ при произвольной температуре T :

$$\rho = \rho_1 (1 + \alpha_p' (T - T_1)).$$

Это выражение дает точное значение удельного сопротивления ρ только для линейной зависимости $\rho(T)$. В остальных случаях этот метод является приближенным; он тем точнее, чем уже интервал температур, который использован для определения α_p' . Удельное сопротивление большинства металлов, увеличивающих свой объем при плавлении, уменьшает плотность. У металлов, уменьшающих свой объем при плавлении, удельное сопротивление уменьшается; к таким металлам относят галлий, сурьму и висмут.

Удельное сопротивление сплавов всегда больше, чем у чистых металлов. Особенно это заметно, если при сплавлении они образуют твердый раствор, т.е. совместно кристаллизуются при затвердевании и атомы одного металла входят в решетку другого. Если сплав двух металлов создает раздельную кристаллизацию и застывший раствор – смесь кристаллов каждой из составляющих, то удельная проводимость γ такого сплава изменяется с изменением состава почти линейно. В твердых же растворах эта зависимость (от содержания каждого из металлов) не линейна и имеет максимум, соответствующий определенному соотношению компонентов сплава. Иногда при определенном соотношении между компонентами они образуют химические соединения (интерметаллиды), при этом они обладают не металлическим характером электропроводности, а являются электронными полупроводниками.

Температурный коэффициент линейного расширения проводников определяется так же, как и для диэлектриков по формуле

$$TK_l = \alpha(l) = 1/l (dl / dT), \quad (3.1)$$

где $TK_l = \alpha(l)$ – температурный коэффициент линейного расширения K^{-1} .

Этот коэффициент необходимо знать, чтобы иметь возможность оценить работу сопряженных материалов в различных конструкциях, а также исключить растрескивание или нарушение вакуумного соединения металла со стеклом или керамикой при изменении температуры. Кроме того, он входит в расчет температурного коэффициента электрического сопротивления проводов

$$TK_R = \alpha(R) = \alpha(\rho) - \alpha(l).$$

Для чистых металлов обычно $\alpha(\rho) \gg \alpha(l)$, поэтому можно приближенно считать, что $\alpha(R) \sim \alpha(\rho)$, но для некоторых сплавов, имеющих малые значения $\alpha(\rho)$, следует пользоваться формулой (3.1).

3.3. ТермоЭДС проводников

ТермоЭДС возникает при соприкосновении двух различных проводников (или полупроводников), если температура их спаев неодинакова. Если два различных проводника соприкасаются, то между ними возникает контактная разность потенциалов. Для металлов А и В

$$U_{cb} - U_c + K T / e \ln(n_{0c} / n_{0b}),$$

где U_c и U_b - потенциалы соприкасающихся металлов; концентрация электронов в соответствующих металлах; K - постоянная Больцмана; T - температура; e - абсолютная величина заряда электрона.

Если температура спаев металлов одинакова, то сумма разности потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Если же температура слоев различна (T_2 и T_1 , например), то в этом случае

$$U = K / e (T_1 - T_2) \ln(n_c / n_b). \quad (3.2)$$

На практике выражение (3.2) не всегда соблюдается, и зависимость термоЭДС от температуры может быть нелинейной. Провод, составленный из двух изолированных проволок разных металлов или сплавов, называется термопарой и используется для измерения температур. В таких случаях стараются использовать материалы, имеющие большой и стабильный коэффициент термоЭДС. для измерения высоких температур иногда приходится (особенно при измерении температур в агрессивных средах) применять термопары с меньшими коэффициентами термоЭДС, но выдерживающими высокие температуры и не окисляющиеся в агрессивных средах. Во многих случаях термопары приходится защищать металлическими или керамическими кожухами. Катушки измерительных приборов, добавочные резисторы и шунты в них приходится подбирать с минимальными коэффициентами термоЭДС относительно меди, чтобы избежать появления паразитных термоЭДС, которые могут вызвать дополнительные погрешности измерения.

Сплавы для термопар имеют различные сочетания, в том числе один электрод может быть из чистого металла. Наиболее распространенными являются никелевые и медно-никелевые сплавы. Для температур в пределах 1000 – 1200 °С используются термопары хромель – алюмель (ТХА), при более высоких температурах применяются электроды платина – платинородий; в этих сплавах родия составляет от 6,7 до 40,5 %. Марки таких термопар следующие: ПлРд-7, ПлРд-10, ПлРд-30, ПлРд-40.

3.4. Материалы высокой проводимости

Среди металлов высокой проводимости наиболее широко применяются медь и алюминий. Медь из-за малого удельного сопротивления (наименьшего среди металлов, исключая серебро) используют в качестве проводникового материала; кроме того, она обладает достаточно высокой механической прочностью, высокой коррозионной стойкостью и хорошей обрабатываемостью (прокат, волочение,ковка, а также пайка и сварка). Производство меди

основано на переработке медных руд - оксидных и сульфидных соединений меди, хотя медь может встречаться в природе и в самородном состоянии.

По механической прочности различают медь твердую не отожженную - МТ и мягкую отожженную медь - ММ. По содержанию химических примесей медь подразделяется на марки по ГОСТ 859 - 78. Электрические характеристики меди следующие: удельная проводимость наиболее чистой электролитической меди при 20 °С - 59,5 МСм/м; удельная проводимость отожженной стандартной меди при 20 - 58 МСм/м; удельное сопротивление стандартной меди при 20 °С - 0,017241 мкОм м; температурный коэффициент удельного сопротивления при 0..150 °С $\alpha(\rho)$. 10 - 4,3 1/ К; отношение удельного сопротивления расплавленной меди к сопротивлению твердой меди при t плавления - 2,07; термоЭДС относительно платины при температуре холодного спая 0 °С - 0,14 мВ; работа выхода электронов - 4,07...4,61 кВ из металла; число Лоренца L_0 . = 2,45.10⁻⁸ В²/К². При низких температурах удельное сопротивление меди становится весьма малым, однако сверхпроводимостью она не обладает. Число Лоренца не постоянно и при уменьшении температуры понижается, однако при $T < 100$ °К снова возрастает. В электротехнике медь применяется для изготовления проводников, шин распределительных устройств, токоведущих частей приборов и электрических аппаратов, анодов в гальванопластике. В электронной технике из меди изготавливают: аноды генераторных ламп (с принудительным охлаждением); стойки антикатодов трубок рентгеновского излучения; траверсы сеток приемно-усилительных ламп, все внешние токоподводящие вводы; проводящую часть печатных плат и т.д. Медь используется в спаях со стеклами, хотя у нее коэффициент линейного расширения больше, чем у стекол, и зато она обладает низким пределом текучести, мягкостью и высоким коэффициентом теплопроводности. Для впаивания в стекло медному электроду придается специальная форма в виде тонкого рантика (так называемые рантовые спаи). Для повышения механической прочности медь применяется в виде сплавов бронз и латуней.

При изготовлении конструкционных и проводящих частей приборов и аппаратов, (в том числе для щеткодержателей и коллекторных пластин) используют следующие бронзы: оловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 5017 - 74); бронзы литейные (ГОСТ 613 - 79); бронзы безоловянные литейные (ГОСТ 493 - 79). Проводниковые бронзы применяются для изготовления контактов, троллейных проводов, зажимов и электродов. Латунни представляют собой медно-цинковые сплавы и так же, как и бронзы, обладают более высокой механической прочностью и повышенными значениями удельного электрического сопротивления. Латунни делятся на обрабатываемые давлением и литейные. Обычно они паяются мягкими и твердыми припоями и допускают электрическую и газовую сварку. Марки латуней, обрабатываемых давлением, определены ГОСТ 15527 - 70, а литейных - ГОСТ 17711-80. Вторым по значению удельной электрической проводимости после меди при нормальной температуре является алюминий. При низких температурах он становится даже более проводящим, чем медь; это происходит при температуре около 70 °К. Классы и марки первичного алюминия устанавливаются в

зависимости от способа получения и его химического состава. Особо чистым является алюминий марки А999, в котором примеси составляют всего 0,001%, а чистого алюминия содержится не менее 99,999 %. Существует четыре марки химически чистого алюминия, в которых количество каждой примеси нормируется, например, марка А995; чистого алюминия не менее 99,995 %, примеси (не более); железо 0,0015%, кремний - 0,0015 %, медь - 0,001 %, цинк 0,001 %, титан - 0,001 %. При этом общее количество примесей не должно превышать 0,005%. Технически чистого алюминия существует восемь марок. Наиболее распространен алюминий марки АЕ, который должен обеспечивать для изготовленной из него и отожженной при температуре 350 - 20 °С проволоки удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С не более 0,028 мкОм·м. Согласно ГОСТ 4784 - 74, Сплавы алюминиевые деформируемые имеются четыре марки сплавов, представляющих собой алюминий с нормируемым количеством примесей. Марки АД0С, АД0, АД1 и АД, в которых алюминия должно быть не менее 99,7%, 99,5%, 99,3% и 98,8% соответственно.

Электрические характеристики алюминия следующие: при 20 °С удельная проводимость чистого алюминия (отожженного при 320 °С в течение 3 ч) составляет 38 МСм/м; удельное сопротивление ρ алюминия АД 0,028 мкОм·м; температурный коэффициент удельного сопротивления при 0 ... 150 °С $\alpha(\rho) 10^{-3} = 4,1 / \text{К}$; отношение сопротивления расплавленного алюминия к сопротивлению твердого алюминия при температуре плавления - 1,64; работа выхода - 4,25 эВ; число Лоренца $L_0 = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$.

При нормальной температуре, одинаковых сечениях и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного, в 1,63 раза. Значит, чтобы получить алюминиевый провод такого же сопротивления, что и медный, нужно взять его сечение в 1,63 раза большим, т.е. его диаметр должен быть больше в 1,3 раза. При ограниченных размерах изделий замена в них меди на алюминий невозможна, но зато масса двух одинаковых по длине и электрическому сопротивлению медного и алюминиевого проводов показывает, что алюминиевый, хотя и толще медного, но весит примерно в 2 раза меньше.

В электротехнике алюминий заменил дорогостоящую медь. Он используется для изготовления электрических проводов, кабельных, тонкопленочных и других токопроводящих изделий, в качестве обмоток асинхронных двигателей, для производства сплавов, для изготовления конденсаторов и конденсаторной фольги, для электровакуумной техники (электроды в разрядниках, катоды в ионных рентгеновских трубках) и т.д.

Прокатка, протяжка и отжиг алюминия аналогичны этим операциям над медью; алюминий хорошо варится, но обычными методами не паяется. На воздухе он активно окисляется, покрываясь тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка, предохраняя алюминий от дальнейшей коррозии, создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых деталей и делает затруднительной их пайку. Для пайки алюминия обычно используют ультразвуковые паяльники, специ-

альные припои. В местах контакта меди с алюминием, особенно под воздействием влаги, образуется местная гальваническая пара, причем полярность ее такая что ток идет от алюминия к меди (по внешней поверхности), и алюминий разрушается коррозией. Для защиты от коррозии необходимо тщательно изолировать места соединения меди и алюминия (покрывать лаком, например). Несмотря на то, что алюминий имеет низкую механическую прочность, его сплавы обладают повышенной механической прочностью.

Сплавы делятся на алюминиевые деформируемые (ГОСТ 4784-74) и алюминиевые литейные (ГОСТ 2685-75). Первые предназначены для изготовления гюлуфабрикатов (прутков, профилей, полос, листов, проволоки, панелей, труб, Штамповок и поковок) методами холодной или горячей обработки. Вторые - для изготовления фасонных отливок.

К материалам высокой проводимости относится большая группа металлов, применяемых в электротехнике (с ними можно ознакомиться в соответствующей литературе), но по массовости применения, они не идут ни в какое сравнение с алюминием и медью

3.5. Криопроводники и сверхпроводники

К криопроводникам и сверхпроводникам относятся металлы, работающие при очень низких (криогенных) температурах, приближающихся к абсолютному нулю. Явление сверхпроводимости было открыто В. Камерлинг-Оннесом в 1911 г. Им было обнаружено, что при охлаждении до температуры сжижения гелия сопротивление замороженной ртути резким скачком падает практически до нуля, во всяком случае, до значения столь малого, что оно не поддается измерению. В настоящее время известно 35 таких металлов и большое количество сплавов и химических соединений, у которых при очень низких температурах удельная проводимость становится практически бесконечной величиной. Наличие у вещества такой проводимости называется СВЕРХПРОВОДИМОСТЬЮ, а температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, называется температурой сверхпроводящего перехода (T_c). Вещества, переходящие в сверхпроводящее состояние, называются сверхпроводниками. Этот переход является обратимым: при повышении температуры до значения T_c сверхпроводимость исчезает и вещество переходит снова в обычное состояние с конечным значением удельной электропроводности γ . Современная теория сверхпроводников объясняет это явление взаимодействием электронов друг с другом через посредство кристаллической решетки и образование связанных пар электронов, т.е. куперовских пар. Из-за электростатического притяжения электрон слегка притягивает ближайший к себе ион, тот, в свою очередь подтягивает к себе другой электрон (находящийся по другую сторону иона). Эти два электрона имеют противоположные спины (и импульсы). Одновременно они отталкиваются, будучи одноименно заряженными. В некоторых металлах при весьма низких температурах притяжение через посредство решетки оказывается сильнее этого отталкивания, и электроны связываются попарно. Т.к. энергия связи

электронов в паре невысока, то каждая такая пара существует ограниченное время. затем разрушается, однако в целом энергия электронной системы из-за этого процесса спаривания уменьшается и металл переходит в сверхпроводящее состояние. При этом электронные пары не испытывают рассеяния, что и приводит к почти полному исчезновению сопротивления. Ток, наведенный в замкнутом контуре из сверхпроводника, может существовать сколь угодно долго. При этом сверхпроводники представляют собой идеальные диамагнетики: магнитное поле, пронизывающее проводник при обычной температуре, выталкивается из него в сверхпроводящем состоянии при условии, что напряженность внешнего магнитного поля не превышает определенного критического значения H_c . В противном случае сверхпроводящее состояние разрушится. В зависимости от характера перехода из сверхпроводящего состояния в обычное при увеличении магнитного поля различают **сверхпроводники 1-го рода** - свинец, ртуть, индий, олово, алюминий, у которых переход в нормальное состояние происходит скачком, и **сверхпроводники 2-го рода**, у которых этот переход происходит постепенно (ниобий, ванадий и технеций, а так же большое число сплавов и химических соединений). Явление сверхпроводимости обнаружено у некоторых веществ, не обладающих этим эффектом при нормальном давлении, при воздействии высокого гидростатического давления. Сверхпроводящие свойства отмечены у полупроводников, например у антимонида индия InSb, и даже у диэлектриков - серы и ксенона (таблица 3.1).

Таблица 3.1. Параметры сверхпроводников

Сверхпроводники	Температура перехода T_c, К	Критическое значение индукции, B_c, Тл
Алюминий Al	1,2	0,01
Олово Sn	3,7	0,031
Индий In	3,4	0,03
Ртуть Hg	4,2	0,46
Свинец Pb	7,2	0,08

Помимо сверхпроводимости в современной электротехнике используется **КРИОПРОВОДИМОСТЬ**, т.е. работа металла при криогенных температурах, когда удельное сопротивление становится очень мало, но является конечной величиной. Металлы, обладающие таким свойством, но без перехода в сверхпроводящее состояние, называются **КРИОПРОПРОВОДНИКАМИ**. для получения качественных криопроводников требуется высокая чистота металла. Как правило, используются металлы, имеющие при криогенных температурах (которые выше температур сверхпроводимости) наименьшее

удельное сопротивление. К ним относятся: при температуре жидкого водорода - алюминий, а при температуре жидкого азота бериллий (20,3 и 77,4 К соответственно).

3.6. Материалы высокого сопротивления

К материалам высокого сопротивления относятся металлы и сплавы, используемые для электроизмерительных приборов, резисторов. У них помимо высокого удельного сопротивления должны быть высокая стабильность сопротивления во времени, малый температурный коэффициент удельного сопротивления, малая термоЭДС в паре с медью. Иногда они должны работать при высоких температурах, быть технологичными и по возможности не содержать дорогостоящих компонентов. Резистивные материалы должны иметь высокое удельное сопротивление, обладать высокой коррозионной стойкостью, высокой стабильностью и малой термоЭДС в паре с медью. Очень важно, чтобы эти требования выполнялись, если материал предназначен для изготовления **образцовых и добавочных резисторов** и шунтов электроизмерительных приборов. Для переменных низкоомных резисторов надо иметь весьма малое и стабильное (во времени) контактное сопротивление. В зависимости от назначения, условий эксплуатации, с учетом номинального сопротивления в качестве материалов для резисторов применяют металлы и сплавы с высоким удельным сопротивлением, а также оксиды металлов, углерод, композиционные материалы (иногда на основе благородных металлов - платины, палладия, золота и серебра). Конструктивно резисторы выполняются в виде объемных элементов, проволоки различных диаметров и пленки, осаждаемой на диэлектрическое основание (подложку). Для пленок введен параметр - сопротивление квадрата, или сопротивление на квадрат (или удельное поверхностное сопротивление), численно равное сопротивлению участка пленки, длина которого равна его ширине, при протекании тока параллельно поверхности подложки. Сопротивление квадрата определяется по формуле

$$R_k = \rho / d, \quad (3.3)$$

где ρ - удельное объемное сопротивление пленки толщиной d .

Для резисторов и термопар наиболее распространенными являются сплавы типа манганина. Это сплавы на никелевой и медно-никелевой основе. Собственно манганин - наиболее распространенный сплав при изготовлении точных резисторов. Манганин марки МНМц3-12 содержит: марганца 11,5 - 13,5 %, никеля и кобальта 2,5 - 3,5 %, остальные % - медь. Обычно при повышении стабильности характеристик его отжигают при температуре 400 °С в течение 2 ч в вакууме или в нейтральных газах (аргон, азот) с медленным охлаждением. Холоднотянутая проволока подвергается 10- часовому старению при температуре 140 °С. Кроме того, требуется длительная выдержка манганина при комнатной температуре, примерно около 1 года. Основные свойства манганина этой марки таковы: при 20 °С удельное сопротивление

$\rho = 0,48$ мкОм м: температурный коэффициент удельного сопротивления при той же температуре $\alpha_\rho = (5 - 30) 10^{-6} 1/K$, термоЭДС относительно меди равна 1 мкВ $1/K + 1$; $T_{\text{плавл}} = 960$ °С, наибольшая допустимая рабочая температура (длительно) $TR 300$ °С.

Константан также относится к этой группе сплавов, но в его составе марганца всего $1 - 2$ %, никеля - $39 - 41$ %, остальные %- медь. Марка константана - МНМц40-1,5. Его основные свойства: $\rho = 0,48 - 0,52$ мкОм м; $\alpha_\rho = (5 - 25) 10^{-6} 1/K$; $T_{\text{раб}} = 450$ °С; термоЭДС в паре с медью достаточно высока и составляет $45 - 55$ мкВ $1/K$. что является недостатком при использовании его в измерительных схемах, но достоинством в термопарах.

Резисторы на основе кремния, как правило, тонкоплёночные. Для них использованы следующие марки сплавов: РС-4800, РС-370, РС3001, РС-1714, РС-1004, а также сплавы многокомпозиционные, состоящие из кремния, железа, хрома, никеля, алюминия и вольфрама (типа МЛТ). В обозначении марок буквы означают: РС резистивный сплав, две первые цифры - номинальное содержание основного легирующего компонента, две остальные - то же для второго компонента. Сплавы в виде порошков предназначены для изготовления методом испарения и конденсации в высоком вакууме тонкоплёночных резисторов и других вспомогательных слоев в электронике. Резисторы из сплавов МЛТ получают термическим вакуумным испарением из вольфрамовых испарителей и путем конденсации пленок на диэлектрические подложки. Для увеличения удельного сопротивления сплавов в них часто вводят оксиды металлов. Для получения нужных свойств пленки после осаждения термообрабатывают. При толщине пленок от $0,1$ до 1 мкм можно получить сопротивление квадрата от десятков Ом м до 35 кОм при $\alpha_\rho = (2,5 - \pm 4) \cdot 10^{-4} 1/K$. В микросхемах распространен сплав МЛТ-3М, у него сопротивление квадрата $R = 200 - 500$ Ом.

Сплавы на основе железа, никеля, хрома и алюминия в основном применяются для электронагревательных элементов. Они относятся к жаростойким с высоким удельным сопротивлением и подразделяются на: никель-хромовые (нихромы); никель-хромовые, легированные алюминием, железо-хромоникелевые и железохромоалюминиевые (хромали). У всех этих сплавов характеристики зависят от их химического состава. Так, для нихрома марки Х20Н80 (хром - $15 - 18$ %, никель - $55 - 61$ %, марганец - $1,5$ %, остальные %- железо) удельное сопротивление $\rho = (1,1 - 1,2)$ мкОм м; $\alpha_\rho = (100 - 200) 10^{-6} 1/K$; предельная $T_{\text{раб}} = 1000$ °С. Для хромали марки Х23Ю5 (хром- $22 - 25$ %, никель - $0,6$ %, марганец - $0,7$ %, алюминий - $4,5 - 5,5$ %) удельное сопротивление $\rho = (1,3 - 1,5)$ мкОм м; $\alpha_\rho = 65 10^{-6} 1/K$, а предельная $T_{\text{раб}} = 1200$ °С. Нихромы стойки к окислению на воздухе при высоких температурах, т.к. на их поверхности образуется защитная пленка оксидов $CrO + NiO$ с температурным коэффициентом линейного расширения, близким к $\alpha_\rho = 1$ сплава. Однако для этого слоя оксидов опасны термоудары, при этом пленка трескается, туда проникает кислород - происходит дополнительное окисление и срок службы сплава уменьшается. Железохромоалюминиевые сплавы всех

марок становятся хрупкими в интервале температур от 450 до 500 °С, что связано с выделением в структуре образований с повышенным содержанием хрома (порядка 80 %). Эта хрупкость может быть устранена нагревом сплава до 750 - 800 °С с последующим охлаждением в воде.

Для всех сплавов агрессивными являются фосфорсодержащие среды, галоиды и сера, кроме железохромоалюминиевые сплавов, для которых газы, содержащие серу, допустимы.

Для жаростойких материалов и нагревательных элементов используют обычно карбиды и силициды тугоплавких металлов - ниобия, циркония, тантала и гафния. Из карбида ниобия методом порошковой металлургии изготавливают трубчатые, стержневые и Y-образные нагреватели длиной до 600 мм, наружным диаметром до 18 мм и толщиной стенки 2 - 3 мм. Печи с такими нагревателями работают в вакууме до 2500 °С, а в аргоне - до 3000 °С. Карбид циркония работает примерно при таких же температурах. Точка плавления карбида ниобия минус 3760 °С, циркония - 3530 °С, тантала - 3880 °С, гафния - 3890 °С. При комнатных температурах карбиды инертны к щелочам и кислотам. Из неметаллических нагревателей, чаще всего используются селит и глобар из карбида кремния, которые являются полупроводниковыми соединениями. Их $T_{\text{раб}} = 1400 - 1500$ °С; при этой температуре срок службы таких нагревателей составляет около 1500 - 2000 ч. Силициды представляют собой соединения кремния в основном с металлами. Эти соединения широко используются в электротехнике, металлургии, космической, электронной в атомной технике. В электротермии наиболее популярен дисилицид молибдена (Mo - Si), который в изделиях может работать при 1700 °С в окислительной среде. Элементы выполняются также методом порошковой металлургии. Свойства дисилицида молибдена: удельное сопротивление $\rho = 0,2$ мкОм м при 20 °С; при 1600 °С $\rho = 0,8$ мкОм м; температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_1 = 8,25 \cdot 10^{-6}$ 1/К. При работе в вакууме силициды молибдена диссоциируют, поэтому их использование ограничено и зависит от парциального давления кислорода.

3.7. Тензометры

Сплавы, применяемые в преобразователях деформации различных изделий под действием механических сил, называются тензометрическими. В основу работы тензопреобразователей принцип изменения сопротивления при деформации конструкции, на которую наклеен тензодатчик, Коэффициент тензочувствительности оценится

$$d = \Delta R / R / \Delta L / L. \text{ или } d = 1 + \Delta \rho / (\rho E S) / F + 2 \mu, \quad (3.4)$$

где ΔR - изменение сопротивления R при изменении ΔL длины элемента L ; $\Delta \rho$ - изменение удельного сопротивления ρ материала тензодатчика под влиянием нагрузки F ; S - площадь поперечного сечения проволоки преобразователя; E - модуль Юнга; μ - коэффициент Пуассона материала проволоки.

Наиболее часто для тензометров применяется проволока, наклеиваемая зигзагообразно на лаковую или бумажную основу (диаметр проволоки примерно 0,02-0,05 мм). К концам проволоки пайкой или сваркой гюдсоединяются выводные проводники, как правило, медные. Сверху датчик лакируется. И приклеивается к изделию. Материалами для проволоки могут быть различные металлы и сплавы. например манганин, константан, нихром, никель, висмут, платиносеребряные или титаноалюминиевые сплавы, хотя они чаще применяется для изготовления пленочных тензометров (сплав АЛП9. Д20 и др.). Пленочные тензометры получают путем вакуумной возгонки материала и последующей его конденсацией на подложку. Часто применяются фольговые тензометры из весьма тонкой фольги толщиной 4-12 мкм, на которой часть металла выбрана травлением таким образом, что оставшаяся часть образует так называемую “решетку” - зигзагообразный тензометр.

3.8. Контактные материалы

В качестве контактных материалов используются чистые тугоплавкие металлы и различные сплавы, а также металлокерамические композиции. Наиболее ответственные контакты служат для периодического замыкания и размыкания электрических цепей, особенно сильно точных. По условиям работы контакты делят на **неподвижные, разрывные или скользящие**, к ним предъявляются разные требования, и, следовательно, используются разные материалы. По значению коммутируемого тока контакты делят на **слаботочные** - до единиц ампера и **сильноточные** - для токов от единиц до тысяч ампер. Контакт должен быть надежным соединением двух проводников, способных проводить электрический ток с малым и стабильным во времени электрическим сопротивлением.

Структура площади контакта состоит из: “площадок” с металлическим контактом, сопротивление которых определяется суммарным сопротивлением металлов пары, образующих контакт, через который протекает ток без переходного сопротивления; контактных площадок, покрытых тонкими адгезионными пленками, пропускающими ток благодаря туннельному эффекту; площадок, покрытых пленками оксидов и сульфидов, являющимися изолирующими и не пропускающими электрический ток. Общая площадь контакта, определяемая как сумма этих площадок, оказывается значительно меньше контактной поверхности, представляющей условную площадь контакта. При этом состояние поверхностей контактов непосредственно влияет на переходное сопротивление и нагрев контактов при прохождении через них тока. Переходное сопротивление многоточечного контакта, имеющего n контактирующих поверхностей первого вида, если они все нагружены до предела текучести материала контактов, определяется по формуле

$$R_n = \rho / 2 (\pi \sigma / (n F))^{1/2}, \quad (3.5)$$

где ρ - удельное сопротивление материала контактов; σ - предел текучести материала контактов при сжатии; n - число контактирующих поверхностей; F - сила контактного сжатия.

Если контакты плоские, то их переходное сопротивление обратно пропорционально силе нажатия F .

Основные причины износа контактов при их эксплуатации зависят от условий эксплуатации, но сводятся к следующим: эрозия контактов - нарушение формы рабочих поверхностей, перенос материала с одного контакта на другой, образование кратеров, наростов и даже заклинивание контактов; электрический износ контактов, обусловленный электрической дугой, искрением контактов при размыкании и вибрацией контактов; механический износ, связанный не только с силой удара контактов, но и с контактным нажатием и частотой замыканий контакта; химический износ, на который влияют состав окружающей среды, ее влажность и температура на поверхности контактов; сваривание в отрыв в зависимости от силы контактного нажатия, вибрации и термического действия тока на контакты, усилие при размыкании сварившихся контактов и плохое прикрепление контактов к контактодержателю. В качестве материалов для **слаботочных контактов** обычно используются благородные и тугоплавкие металлы - серебро, платина, палладий, золото, вольфрам и их сплавы.

Большинство благородных металлов обычно применяют для контактов в виде гальванического покрытия (кроме серебра, которое может применяться в чистом виде). Твердость покрытий в этом случае существенно выше, чем у более толстых слоев металла. Например, для серебра твердость по Бринеллю составляет в толстом слое порядка 25, а в виде Гальванического покрытия может достигать 100. Гальванические покрытия более износостойки в электрическом поле. Толщина гальванопокрытия обычно колеблется в пределах от 1 мкм до нескольких десятков микрометров. Для **сильноточных контактов** обычно используются медь, серебро, их сплавы, а также композиционные материалы, получаемые методом порошковой металлургии, состоящие из компонентов, не обладающих взаимной диффузией и представляющих смесь обычно двух - трех фаз, одна из которых значительно более тугоплавкая, чем другая. Наиболее распространенные композиции - это серебро - оксид кадмия; серебро - никель; серебро - графит; серебро - никель - графит; серебро - вольфрам; серебро - оксид меди; медь - вольфрам; медь - графит. Серебро и медь обеспечивают высокую электра и теплопроводность, а тугоплавкая часть повышает износостойкость, термостойкость и сопротивление свариванию контактов. В **низковольтных аппаратах** часто используется серебро - оксид кадмия; для **высоковольтных** (дугогасительных камер) - железо - медь - висмут и др.

Основные **области применения** контактных материалов:

серебро - реле, сигнальная аппаратура, телефонная и телеграфная аппаратура, магнитные пускатели, управление флуоресцентными лампами, контакты вспомогательных цепей контакторов и магнитных пускателей и пр.;

серебро медь - реле, телефонные реле, радиоаппаратура и т.д.;

серебро медь - никель - стенные выключатели, реле уличных сигналов, преобразователи тока, реле автоматики и настройки радио, авиационные легко- и средненагруженные реле, электромагнитные счетчики, автомобильные и железнодорожные сигнальные реле и пр.;

серебро - кадмий - реле, выключатели перегрузки и термостаты холодильников, стартеры, тепловые выключатели;

серебро - кадмий – никель; серебро - кадмий - индий - реле в диапазоне токов от десятых долей ампера до 30 А;

серебро - палладий - сигнальная аппаратура, телефонные реле и номеронабиратели, органы ТВ управления, выключатели и термостаты холодильников, контактные кольца и пр.;

серебро - платина - радиоаппаратура, электромагнитные счетчики;

серебро - оксид циркония - выключатели, реле на токи от мА до 100 А;

платина - иридий - прецизионные реле, работающие без дуги, часы, реле радиоэлектроники, морские и автомобильные регуляторы скорости, электробритвы, термостаты и нагреватели, сигнальные реле, телеграфные реле и пожарные сигнализаторы;

платина - родий - генераторы переменного тока (маломощные);

платина - никель - телефонная и телеграфная аппаратура;

золото - серебро, золото - серебро - платина - прецизионные реле, работающие без дуги, измерительные приборы, телефонная и телеграфная аппаратура, скользящие контакты потенциометров в слаботочной технике;

вольфрам - кассовые аппараты, прерыватели зажигания в автомобилях и тракторах, масло и бензиноизмерители, контрольные реле в авиа приборах, реле-регуляторы напряжения. часы, телетайпы, телеграфные реле, электробритвы, вакуумные низко и высоковольтные выключатели. электроды ртутных выключателей;

серебро - оксид меди - сильнонагруженные контакторы переменного и постоянного тока, автоматические предохранители, тепловозостроение;

серебро - вольфрам - магнитные пускатели и контакторы с большой частотой включений, выключатели бытовых приборов. кнопки управления, высоковольтные выключатели, контакты мощных регулирующих трансформаторов, тяжелонагруженные реле, выключатели авиационного оборудования, стартеры, выпрямители тока и т. д.;

медь - вольфрам - мощные масляные и воздушные высоковольтные выключатели, малогабаритные высоковольтные выключатели, дверные выключатели морских судов, контакты к аппаратам стыковой сварки, мощные масляные выключатели дуговых печей и преобразователи тока;

медь - молибден - маломасляные высоковольтные выключатели.

Этот ряд можно продолжить, т.к. для замены контактов из сплавов благородных и просто дорогих металлов часто используются сплавы, в которых драгметаллы присутствуют в малых количествах (серебро - магний - никель, серебро - магний - никель - цирконий и ряд др.). Кроме того, в этом списке не указан ряд сплавов из благородных металлов. С ними можно познакомиться в соответствующей литературе.

3.9. Припой, флюсы и контактолы

Припой, флюсы, контактолы применяются для создания механически прочного, герметичного шва или постоянного электрического контакта с малым переходным сопротивлением. При пайке припой нагревается до температуры плавления, в зависимости от которой их принято делить на две группы - **мягкие и твердые**. К **мягким припоям** - относятся припой с температурой плавления до 300 °С, а к **твердым** - выше 300 °С. Мягкие припои в основном являются оловянно-свинцовыми согласно ГОСТ 21931-76. Если в припое содержится 1 – 5 % сурьмы, то они называются сурьмянистыми. Наиболее распространенными из мягких припоев являются: ПОС-61, в котором 61 % Sn, остальные % - свинец (температура кристаллизации 190 °С, удельное сопротивление $\rho = 139$ мкОм м); ПОССу-61-0,5 - оловянно-свинцовый, малосурьмянистый, содержащий 61 % Sn, 5 % сурьмы, остальные % - свинец (температура кристаллизации 189 °С, удельное сопротивление $\rho = 0,140$ мкОм м); ПОСК-50-18 - припой, содержащий 50 % Sn, 18 % кадмия, остальные % - свинец (температура кристаллизации 145 °С, удельное сопротивление $\rho = 0,133$ мкОм м). Эти припои применяются для лужения и пайки монтажных проводов (диаметром 0,05 - 0,08 мм), спиральных пружинок в электроизмерительных приборах, резисторов, конденсаторов, печатных схем и при производстве полупроводниковых приборов, для лужения и пайки пассивной части микросхем и других элементов, чувствительных к перегреву. Стандартными твердыми припоями являются медно-цинковые и серебряные. Первые должны удовлетворять ГОСТ 23 137-78, а вторые - ГОСТ 19738-74. Наиболее распространенными из них являются следующие: ПМЦ-36 - припой медно-цинковый, содержащий 36 % Cu, остальные % - цинк (температура кристаллизации 950 °С, используется для пайки латуни с содержанием меди до 64 %); ПСР- 25 и до ПСР-70 - серебряные припои, содержащие от 25 до 70 % Ag, меди - от 40 до 26 %, цинка - от 35 до 4 % (температура их кристаллизации около 600 - 750 °С).

Для пайки алюминия применяют **специальные припои**. Из них наиболее распространены П425А (температура плавления 415 - 425 °С), в составе которого 19 - 21 % М, 14 – 16 % Cu, 64 – 66 % Zn; ПСИЛО (силумин), состоящий из 90 – 87 % Al + 10 – 13 % Si (температура плавления 577 °С); АВИА-1 - сплав, в котором содержится 55 % Sn, 20 % Cd, 22 % Zn, (температура плавления 200 °С). При пайке алюминия **низкотемпературными припоями** (АВИА-1 и др.) его поверхность предварительно должна быть покрыта никелем. **Фосфорные припои** марки МФІ и прочие с содержанием фосфора в сплаве (Cu - P) от 8,5 до 10 %, имеющие температуру плавления 725 - 850 °С, являются **самофлюсующимися**, т.е. пайка ими производится без применения **флюса**. Недостаток их - хрупкость шва. Стали не пригодны для пайки. Используются для пайки медных, латунных, бронзовых деталей, работающих в режимах малых статических нагрузок. Иногда в качестве припоев используют **чистые металлы**. Например, **кадмий** применяют для пайки и

лужения никеля, **чистое олово** для лужения и пайки меди и ее сплавов, низкоуглеродистой стали и платины, а **чистая медь** - для пайки низкоуглеродистой стали и никеля.

В качестве **флюсов** используется очень большое количество материалов. **Назначение флюсов** - удалять загрязнение и оксиды с поверхности спаиваемых металлов, уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя, защищать поверхность металла и припоя в процессе пайки от окисления. **Флюсы** подразделяются на несколько групп по различным признакам. **Флюсы**, применяемые при пайке **мягкими припоями** в основном с активными неорганическими веществами.

Активные флюсы. К ним относятся:

канифоль (24 %), хлористый цинк (4 %), этиловый спирт (72 %) - для пайки черных, цветных и драгметаллов (остатки флюса необходимо удалять растворителем);

канифоль (16 %), хлористый цинк (4 %), вазелин технический (80 %), - при пайке черных и цветных металлов (шов прочный, но требует очень тщательной промывки) для изделий простой конфигурации;

хлористый цинк (1,4 %), глицерин (3 %), спирт этиловый (4 %), вода дистиллированная (91,6 %) - при пайке платины, ее сплавов и никеля, с последующей тщательной промывкой в воде;

флюс для пайки алюминия и его сплавов (хлористый барий – 4 %. хлористый калий – 29 %, хлористый натрий – 19 %. фтористый кальций – 4 %) - пайка припоями марки АВИА-1 и АВИА-2.

При пайке **твердыми припоями** используют обычно несколько марок флюсов. Наиболее популярные из них:

Ф70А (температура плавления 370 °С) предназначен для пайки алюминия, его сплавов, как между собой, так и с другими металлами (хлористый калий – 33 – 37 %. хлористый литий – 40 – 41 %. борофтористоводородный калий – 2 – 29 %);

Ф800Ст (температура плавления 800 °С) предназначен для пайки нержавеющей сталей, жаропрочных сплавов латунию и другими твердыми припоями (температура плавления 850 - 1100 °С). Такой припой представляет собой бурю (тетраборноокислый натрий 100 %).

Флюсы могут быть **твердыми веществами** (соли, оксиды, кислоты), пастами и растворами солей и кислот. Очень часто **флюсы** изготавливаются на местах, поэтому и марки идут не по стандартам. В марках флюсов буквы означают: Ф - флюс, К - канифоль, Сп - спирт, П - гюлиэфирная смола, У - уксусная кислота, М - муравьиная кислота, -Х хлористые соли и т.д.

Контактолами (иначе электропроводящий клей) называются мало-низкие или пастообразные композиции из различных синтетических смол, используемые в качестве токопроводящих клеев и покрытий. Токопроводящим наполнителем являются мелкодисперсные горошки металлов или графита. для регулирования вязкости используют растворители. Полимерные связующие определяют низкую плотность, высокую прочность и эластичность, а также хорошие адгезионные свойства электропроводящих компози-

ций. Электрические свойства определяются свойствами дисперсного наполнителя - его электропроводностью, концентрацией, формой и размером частиц, В настоящее время известно более 50 типов контактолов. Наиболее высокой проводимостью и стабильностью свойств обладают контактолы с содержанием серебра. Их используют для склеивания поверхностей серебра, меди, стекла, керамики. Если серебро предварительно обработано растворами жирных кислот, то такой клей используется для монтажа элементов радиоэлектроники, таких как ниточные резисторы, фоторезисторы и другие элементы. Некоторые виды клея, имеющие высокую термостойкость и большой срок службы, используются в производстве керамических конденсаторов и для монтажа интегральных схем. А контактол К-20 обладает максимальной для подобных материалов электропроводностью ($\rho = 0,5 \text{ мкОм м}$). Марки и характеристики некоторых проводящих клеев приводятся ниже:

клей марки К-17: наполнитель - серебро, $\rho = 1 - 2 \text{ мкОм м}$, температура отверждения $170 - 200 \text{ }^\circ\text{С}$, максимальная рабочая температура - $200 \text{ }^\circ\text{С}$, срок службы 6 месяцев;

клей К-20: наполнитель тот же, температура отверждения $20 - 80 \text{ }^\circ\text{С}$, максимальная рабочая температура $80 \text{ }^\circ\text{С}$, срок службы 6 месяцев.

3.10. Неметаллические проводники

Неметаллические проводники, например, углеродистые материалы, широко используются в электротехнике. Из **угля** изготавливают электроды для прожекторов, аноды гальванических элементов, щетки электрических машин, высокоомные резисторы, разрядники для телефонных сетей, а угольные порошки используют в микрофонах и в производстве непроволочных резисторов. **Щетки** делают из графита, кокса, сажи, в качестве связки выступают каменноугольная и синтетические смолы. для повышения электропроводности в щетках часто используют порошкообразные металлы, медь с добавками свинца, олова и серебра. Углеродистые материалы, кроме сажи и графита, предварительно прокаливают для удаления летучих компонентов; после смешивания с металлическим порошком и связкой прессуют заготовки и затем вырезают щетки. Для прочности щетки спекают в неокислительной атмосфере при температуре около $1300 \text{ }^\circ\text{С}$. Некоторые виды щеток подвергают графитизации при $2500 - 3000 \text{ }^\circ\text{С}$ в неокислительной атмосфере, для перевода кокса и сажи в графит и удаления примесей. Заключительной операцией является пропитка щеток смолой или носком для повышения влагостойкости и снижения коэффициента трения. Повышение механической прочности щеток и увеличение электропроводности достигается за счет пропитки щеток расплавленными металлами.

Основные технические параметры щеток: удельное сопротивление, допустимая плотность тока, допустимая линейная скорость. Иногда учитывают также падение напряжения на щетках и удельное давление.

В настоящее время различают щетки угольно-графитовые (УГ), графитные (Г), электрографитированные (ЭГ) и медно-графитовые (М и МГ) с содержанием порошка меди, приведенные в таблице 3.2).

Таблица 3.2. Параметры электрических щеток

Тип щетки	Уд. сопр., мкОм м	Доп.плот.тока, мА/м	Доп.лин. ск., м/с
Г	10 - 46	7 - 11	12 - 25
УГ	18 - 60	6 - 8	10 - 15
ЭГ	10 - 45	9 - 11	25 - 45
М	От 0,05	12 - 20	12 - 25
МГ	До 1,2	12 - 20	12 - 25

Электрические щетки применяют в электрических машинах различного назначения и мощности, в том числе и в быстроходных машинах с кольцами для подвода или съема тока.

ГЛАВА 4. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники, вещества, электропроводность которых при комнатной температуре имеет промежуточное значение между электропроводностью металлов (10^6 - 10^4 Ом \cdot см) и диэлектриков (10^{-8} - 10^{-12} Ом \cdot см). Характерная особенность полупроводников – возрастание электропроводности с ростом температуры; при низких температурах электропроводность полупроводников мала; на нее влияют свет, сильное электрическое поле, потоки быстрых частиц и т.д. Высокая чувствительность электропроводности к содержанию примесей и дефектов в кристаллах также характерна для полупроводников. К полупроводникам относится большая группа веществ (Ge, Si и др.). Носителями заряда в полупроводниках являются электроны проводимости и дырки. В идеальных кристаллах они появляются всегда парами, так что их концентрации равны. В реальных кристаллах, содержащих примеси и дефекты структуры, равенство концентраций электронов и дырок может нарушаться и проводимость осуществляется практически только одним типом носителей. Особенности полупроводников определяют их применение.

4.1 Терминология и основные понятия

Полупроводники, или полупроводниковые соединения, бывают собственными и примесными.

Собственные полупроводники - это полупроводники, в которых нет примесей (доноров и акцепторов). Собственная концентрация n_i - концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике (электронов в зоне про-

проводимости n и дырок в валентной зоне p , причем $n = p = n_i$. При $T = 0$ в собственном полупроводнике свободные носители отсутствуют ($n = p = 0$). При $T > 0$ часть электронов забрасывается из валентной зоны в зону проводимости. Эти электроны и дырки могут свободно перемещаться по энергетическим зонам. Дырка - это способ описания коллективного движения большого числа электронов (примерно 10^{23} см^{-3}) в неполностью заполненной валентной зоне. Электрон - это частица, дырка - это квазичастица. Электрон можно инжектировать из полупроводника или металла наружу (например, с помощью фотоэффекта), дырка же может существовать только внутри полупроводника.

Легирование - введение **примеси** в полупроводник, в этом случае полупроводник называется **примесным**. Если в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы (например, кремний или германий), ввести в качестве примеси элемент 5 группы, то получим **донорный** полупроводник (у него будет электронный тип проводимости), или полупроводник n -типа. Если же ввести в качестве примеси элемент 3 группы, то получится акцепторный полупроводник, обладающий дырочной проводимостью (p -тип).

Для того чтобы использовать для описания движения электронов и дырок в полупроводниках классические представления, вводятся понятия **эффективных масс электрона и дырки** m_n и m_p соответственно. В этом случае уравнения механики $a = F/m^*$, или $dp/dt = F$, будут справедливы, если вместо массы свободного электрона (электрона в вакууме) то в эти уравнения подставить эффективную массу электрона m_n ($p = m_n \cdot v$).

Эффективная масса учитывает влияние периодического потенциала атомов в кристалле полупроводника на движение электронов и дырок и определяется уравнениями дисперсии.

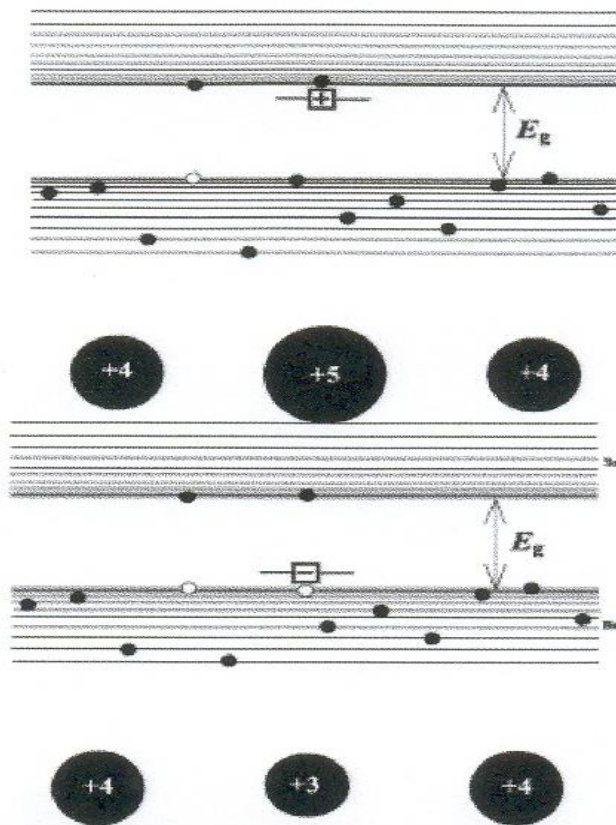


Рис. 4.1 Энергетические схемы полупроводников n-типа и p-типа

4.2 Зонная структура полупроводников

Согласно постулатам Бора энергетические уровни для электронов в изолированном атоме имеют дискретные значения. Твердое тело представляет собой ансамбль отдельных атомов химическая связь между которыми объединяет их в кристаллическую решетку. Если твердое тело состоит из N атомов, то энергетические уровни оказываются N -кратно вырожденными. Электрическое поле ядер, или остовов атомов, выступает как возмущение, снимающее это вырождение. Дискретные моноэнергетические уровни атомов, составляющие твердое тело, расщепляются в энергетические зоны. Решение квантовых уравнений в приближении сильной или слабой связи дает качественно одну и ту же картину для структуры энергетических зон твердых тел. В обоих случаях разрешенные и запрещенные состояния для электронов чередуются и число состояний для электронов в разрешенных зонах равно числу атомов, что позволяет говорить о квазинепрерывном p -определении энергетических уровней внутри разрешенных зон.

Наибольшее значение для электронных свойств твердых тел играют верхняя и следующая за ней разрешенные зоны энергий. В том случае, если между ними нет энергетического зазора, то твердое тело с такой зонной структурой является металлом. Если величина энергетической щели между этими зонами (обычно называемой запрещенной зоной) больше 3 эВ, то твердое тело является диэлектриком. И, наконец, если ширина запрещенной зоны E_g лежит в

диапазоне (0,1 - 3,0) эВ, то твердое тело принадлежит к классу полупроводников. В зависимости от сорта атомов, составляющих твердое тело, и конфигурации орбит валентных электронов реализуется тот или иной тип кристаллической решетки, а, следовательно, и структура энергетических зон. На рисунке 4.2 приведена структура энергетических уровней в изолированном атоме кремния, а также схематическая структура

энергетических зон, возникающих при сближении этих атомов и образовании монокристаллического кремния с решеткой так называемого алмазоподобного типа.

Верхняя, не полностью заполненная, энергетическая зона в полупроводниках получила название зоны проводимости. Следующая за ней энергетическая зона получила название валентной зоны. Энергетическая щель запрещенных состояний между этими зонами называется запрещенной зоной. на зонных диаграммах положение дна зоны проводимости обозначают значком E_c , положение вершины валентной зоны - E_v , а ширину запрещенной зоны - E_g .

Поскольку в полупроводниках ширина запрещенной зоны меняется в широком диапазоне, то вследствие этого в значительной мере меняется их удельная проводимость. По этой причине полупроводники классифицируют как вещества, имеющие при комнатной температуре удельную электрическую

проводимость γ от 10^{-8} до 10^6 Ом*см, которая зависит в сильной степени от вида и количества примесей, структуры вещества и внешних условий: температуры, освещения (радиации), электрических и магнитных полей и т.д.

Для диэлектриков ширина запрещенной зоны $E_g > 3$ эВ, величина удельной проводимости $\gamma < 10^{-8}$ Ом. см, удельное сопротивление $\rho = 1/\gamma > 10^8$ Ом* см.

Для металлов величина удельной проводимости $\gamma > 10^6$ Ом* см.

4.3 Жидкие полупроводники

Плавление многих кристаллических полупроводников сопровождается резким увеличением их электропроводности Q до значений типичных для металлов (см рис. 5 а). Однако для ряда полупроводников (например HgSe, HgTe и т. д.) характерно сохранение или уменьшение Q при плавлении и сохранение полупроводниками характера температурной зависимости Q (см рис. 5 б). Некоторые жидкие полупроводники при дальнейшем повышении температуры теряют полупроводниковые свойства и приобретают металлические (например, сплавы Te - Se, богатые Te). Сплавы же Te - Se, богатые Se ведут себя иначе, их электропроводность имеет чисто полупроводниковый характер.

В жидких полупроводниках роль запрещенной зоны играет область энергии вблизи минимума плотности состояний в энергетическом спектре электронов.

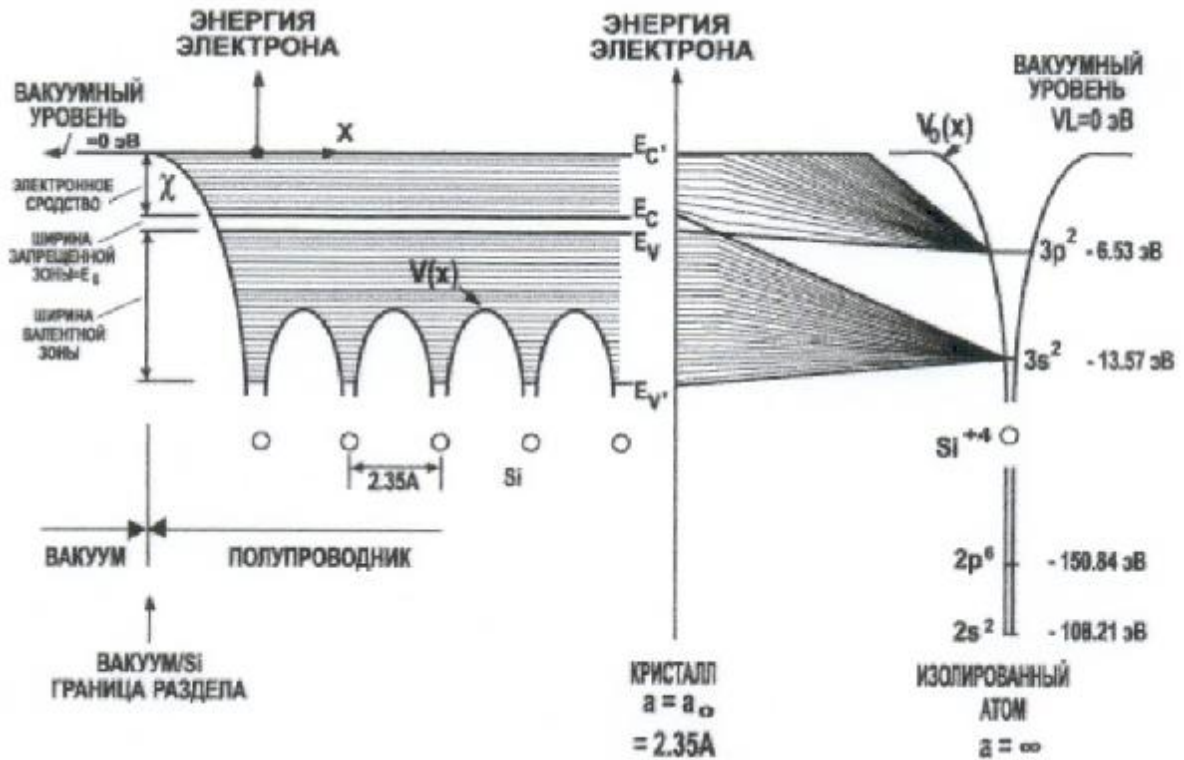


Рис. 4.2 Структура энергетических уровней в изолированном атоме кремния, а также схематическая структура энергетических зон, возникающих при сближении этих атомов и образовании монокристаллического кремния.

При достаточно глубоком минимуме в его окрестности появляется зона почти локализованных состояний носителей зарядов с малой подвижностью (псевдощель). Если при повышении температуры происходит «схлопывание» псевдощелей, жидкий полупроводник превращается в металл.

4.4 Проводимость полупроводников

При приложении электрического поля к однородному полупроводнику в последнем протекает электрический ток. При наличии двух типов свободных носителей - электронов и дырок - проводимость γ полупроводника будет определяться суммой электронной γ_n и дырочной γ_p компонент проводимости

$\gamma = \gamma_n + \gamma_p$. Величина электронной и дырочной компонент в полной проводимости определяется классическим соотношением: $\gamma_n = \mu_n n_0 q$; $\gamma_p = \mu_p p_0 q$

где μ_n и μ_p - подвижности электронов и дырок соответственно.

Для легированных полупроводников концентрация основных носителей всегда существенно больше, чем концентрация неосновных носителей, поэтому проводимость таких полупроводников будет определяться только компонентой проводимости основных носителей. Так, для полупроводника n-типа

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_p = \gamma_n$$

Величина, обратная удельной проводимости, называется удельным сопротивлением:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\gamma_n + \gamma_p} = \frac{1}{\gamma_n}.$$

Здесь ρ - удельное сопротивление, обычно измеряемое в единицах [Ом см].

Для типичных полупроводников, используемых в производстве интегральных схем, величина удельного сопротивления находится в $\rho = (1-10)$ Ом см.

Получаем $\rho = \frac{1}{\gamma_n} = \frac{1}{\mu_n n_0 q} = \frac{1}{\mu_n N_D q}$, где - концентрация доноров в полупроводнике n- типа в условиях полной ионизации доноров, равная концентрации свободных электронов n_0 .

В отраслевых стандартах для маркировки полупроводниковых пластин обычно используют следующее сокращенное обозначение типа: КЭФ-4,5. В этих обозначениях первые три буквы обозначают название полупроводника, тип проводимости, наименование легирующей примеси. Цифры после букв означают удельное сопротивление, выраженное во внесистемных единицах, - Ом см. Например, ГДА-0,2 - германий, дырочного типа проводимости, легированный алюминием, с удельным сопротивлением $\rho = 0,2$ Ом см; КЭФ-4,5 - кремний, электронного типа проводимости, легированный фосфором, с удельным сопротивлением $\rho = 4,5$ Ом см.

4.5 Примесная проводимость

Один и тот же полупроводник обладает либо электронной, либо дырочной проводимостью - это зависит от химического состава введенных примесей. Примеси оказывают сильное воздействие на электропроводимость полупроводников: так, например, тысячные доли процентов примесей могут в сотни тысяч раз уменьшить их сопротивление. Этот факт, с одной стороны, указывает на возможность изменение свойств полупроводников, с другой стороны, он свидетельствует о трудностях технологии при изготовлении полупроводниковых материалов с заданными характеристиками.

Рассматривая механизм влияния примесей на электропроводимость полупроводников, следует рассматривать два случая:

Электронная проводимость

Добавка в германий примесей, богатых электронами, например мышьяка или сурьмы, позволяет получить полупроводник с электронной проводимостью или полупроводник n - типа (от латинского слова «негативус» - «отрицательный»). Примеси создающие такую электропроводимость называют донорами.

Дырочная проводимость

Добавка в тот же германий алюминия, галлия или индия создает в кристалле избыток дырок. Тогда полупроводник будет обладать дырочной проводимостью - полупроводник p - типа.

Дырочная примесная электропроводимость создается атомами, имею-

щими меньшее количество валентных электронов, чем основные атомы. Подобные примеси называются акцепторными.

4.6 Токи в полупроводниках

Проводимость, а, следовательно, и ток в полупроводниках обусловлены двумя типами свободных носителей. Кроме этого также есть две причины, обуславливающие появление электрического тока - наличие электрического поля и наличие градиента концентрации свободных носителей. С учетом сказанного плотность тока в полупроводниках в общем случае будет суммой четырех компонент:

$$\bar{J} = \bar{J}_p + \bar{J}_n = \bar{j}_{pE} + \bar{j}_{pD} + \bar{j}_{nE} + \bar{j}_{nD},$$

где J – плотность тока, j_{nE} - дрейфовая компонента электронного тока, j_{nD} - диффузионная компонента электронного тока, j_{pE} - дрейфовая компонента дырочного тока, j_{pD} - диффузионная компонента дырочного тока.

Выражение для каждой из компонент тока дается следующими соотношениями:

$$\bar{j}_{nE} = q\mu_n nE = \gamma_n E;$$

$$\bar{j}_{pE} = q\mu_p pE = \gamma_p E;$$

$$\bar{j}_{nD} = -qD_n \frac{dn}{dx};$$

$$\bar{j}_{pD} = -qD_p \frac{dp}{dx},$$

где D_n - коэффициент диффузии электронов связанный с подвижностью электронов μ_n соотношением $D_n = \frac{kT}{q}\mu_n$. Аналогичные соотношения существуют для коэффициентов диффузии дырок D_p и подвижности дырок μ_p .

4.7 Использование полупроводников

Наиболее важные для техники полупроводниковые приборы - диоды, транзисторы, тиристоры основаны на использовании замечательных материалов с электронной или дырочной проводимостью.

Широкое применение полупроводников началось сравнительно недавно, а сейчас они получили очень широкое применение. Они преобразуют световую и тепловую энергию в электрическую и, наоборот, с помощью электричества создают тепло и холод. Полупроводниковые приборы можно встретить в обычном радиоприемнике и в квантовом генераторе - лазере, в крошечной атомной батарее и в микропроцессорах. Инженеры не могут обходиться без полупроводниковых выпрямителей, переключателей и усилителей. Замена ламповой аппаратуры полупроводниковой позволила в десятки раз уменьшить габариты и массу электронных устройств, снизить потребляемую ими мощность и резко увеличить надежность.

4.8 Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют нелинейный электронный прибор с двумя выводами. В зависимости от внутренней структуры, типа, количества и уровня легирования внутренних элементов диода и вольтамперной характеристики свойства полупроводниковых диодов бывают различными. В данном разделе будут рассмотрены следующие типы полупроводниковых диодов: выпрямительные диоды на основе р-п перехода, стабилитроны, варикапы, туннельные и обращенные диоды.

4.9 Характеристики идеального диода на основе р-п перехода

Основу выпрямительного диода составляет обычный электронно-дырочный переход. Вольтамперная характеристика такого диода имеет ярко выраженную нелинейность и описывается уравнением. В прямом смещении ток диода инжекционный, большой по величине и представляет собой диффузионную компоненту тока основных носителей. При обратном смещении ток диода маленький по величине и представляет собой дрейфовую компоненту тока не основных носителей. В состоянии равновесия суммарный ток, обусловленный диффузионными и дрейфовыми токами электронов и дырок, равен нулю.

$$J = J_0 \left(e^{bV_G} - 1 \right),$$
$$j_{pE} - j_{nD} + j_{nE} - j_{pD} = 0$$

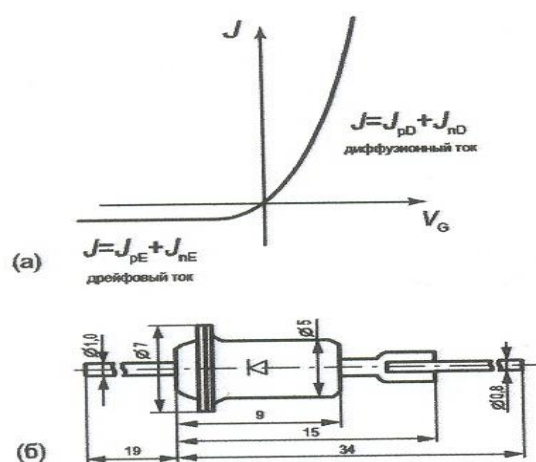
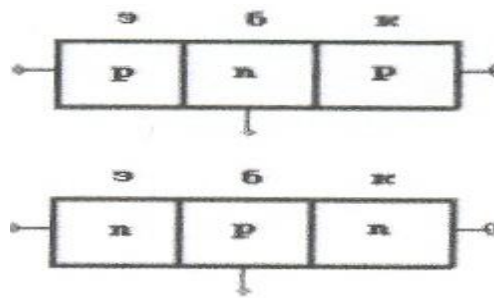


Рис. 4.3 Параметры полупроводникового диода

Для анализа приборных характеристик выпрямительного диода важными являются такие дифференциальные параметры, как коэффициент выпрямления, характеристические сопротивления и емкости диода в зависимости от выбора рабочей точки.

4.10 Транзисторы

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор, состоящий из трёх областей с чередующимися типами электропроводности, пригодный для усиления мощности.



Эти области разделяются электронно-дырочными переходами (э-д переходами). Особенность транзистора состоит в том, что между его э-д переходами существует взаимодействие - ток одного из электродов может управлять током другого. Такое управление возможно, потому что носители заряда, инжектированные через один из э-д переходов могут до другого перехода, находящегося под обратным напряжением, и изменить его ток.

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

1. **Режим отсечки** - оба э-д перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идёт сравнительно небольшой ток;
2. **Режим насыщения** - оба э-д перехода открыты;
3. **Активный режим** - один из э-д переходов открыт, а другой закрыт.

В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором почти отсутствует. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причём транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы.

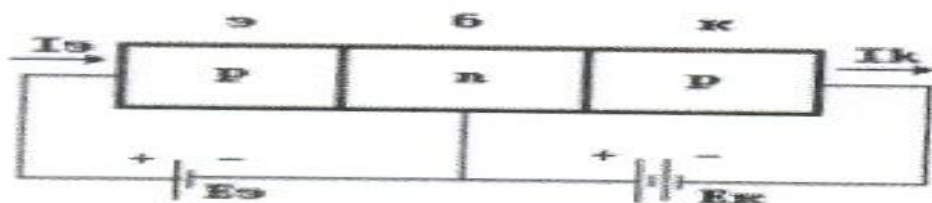
Область транзистора, расположенная между переходами называется **базой** (Б). Примыкающие к базе области чаще всего делают неодинаковыми. Одну из них изготавливают так, чтобы из неё наиболее эффективно происходила инжекция в базу, а другую - так, чтобы соответствующий переход наилучшим образом осуществлял экстракцию инжектированных носителей из базы. Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют **эмиттером** (Э), а соответствующий переход эмиттерным. Область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы - **коллектор** (К), а переход коллекторным.

Если на Э переходе напряжение прямое, а на К переходе обратное, то включение транзистора считают нормальным, при противоположной полярности - инверсным.

Основные характеристики транзистора определяются в первую очередь процессами, происходящими в базе. В зависимости от распределения примесей в базе может присутствовать или отсутствовать электрическое поле. Если при отсутствии токов в базе существует электрическое поле, которое способствует движению не основных носителей заряда от Э к К, то транзистор называют дрейфовым, если же поле в базе отсутствует - бездрейфовый (диффузионный).

Принцип работы транзистора

Когда ключ разомкнут, ток в цепи эмиттера (Э) отсутствует. При этом в цепи коллектора (К) имеется небольшой ток, называемый обратным током **К** и обозначаемый *I_{кбо}*. Этот ток очень мал, так как при обратном смещении **К** перехода потенциальный барьер велик и непреодолим для основных носителей - дырок коллектора и свободных электронов базы. **К** легирован примесью значительно сильнее, чем база. Вследствие этого не основных носителей в коллекторе значительно меньше, чем в базе, и обратный ток **К** создается главным образом не основными носителями: дырками, генерируемыми в базе в результате тепловых колебаний, и электронами, генерируемыми в **К**.



Замыкание ключа в цепи Э приводит к появлению тока в этой цепи, так как смещение эмиттерного **p-n** перехода в прямом направлении понижает потенциальный барьер для дырок, переходящих из Э в Б, и для электронов переходящих из Б в Э. мы рассматриваем только дырки так как только они создают приращение коллекторного тока. Говорят, что дырки инжектируются в базу. В базе обыкновенного транзистора электрическое поле отсутствует, поэтому дальнейшее движение инжектированных дырок определяется процессом диффузии. Так как толщина базы транзистора много меньше длины свободного пробега дырки до рекомбинации, то большая часть инжектированных дырок достигает коллекторного перехода, благодаря чему коллекторный ток усиливается. Лишь очень небольшая часть дырок рекомбинирует.

ГЛАВА 5. ФЕРРОМАГНЕТИЗМ

5.1 Природа ферромагнетизма

Возникновение магнитных свойств ферромагнетиков связано с их доменным строением. Домены - это области самопроизвольной намагниченности, возникающие даже в отсутствии внешнего магнитного поля, в которых магнитные моменты атомов ориентированы параллельно.

Атомы или ионы приобретают магнитный момент, как правило, если они имеют некомпенсированные спины электронов. Например, в атомах железа на внутренней 3d – оболочке имеется четыре некомпенсированных спина. Так как самопроизвольная намагниченность относится к внутриатомным явлениям, то ее природа может быть установлена только на основе квантово – механических понятий.

По Я.И.Френкелю и В. Гейзенбергу главную роль в возникновении ферромагнитного состояния играют силы обменного взаимодействия между атомами, имеющие квантовый характер и по происхождению являющиеся электростатическими.

Энергию A , возникающую в результате обмена электронами обмена электронами родственных атомов, называют обменной энергией или интегралом обменной энергии. При положительном интеграле обменной энергии A на рисунке 5.1, что соответствует минимуму электростатической энергии, возникает параллельная ориентация спинов. При отрицательном знаке A энергетически выгодно антипараллельное расположение спинов. Численное значение и знак интеграла A зависит от степени перекрытия электронных оболочек, то есть зависит от расстояния между атомами.

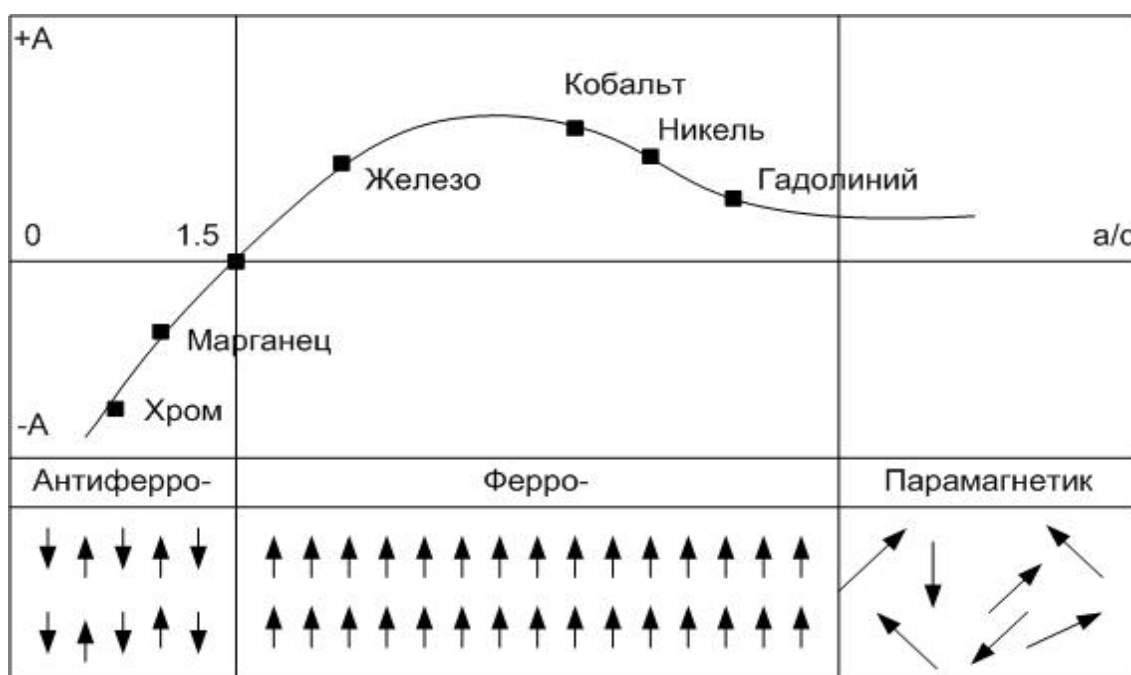


Рис.5.1 Зависимость интеграла обменной энергии A от отношения межатомного расстояния a к диаметру незаполненной электронной оболочки d

На рисунке показано изменение интеграла обменной энергии в функции от отношения межатомного расстояния к диаметру незаполненной электронной оболочки d . При переходе $a/d > 1,5$ происходит переход от антиферромагнитного состояния к ферромагнитному. Эта зависимость позволила обнаружить ферромагнетизм у сплавов марганца с неферромагнитным висмутом, сурьмой, серой и т.д.

Хотя максимум обменного взаимодействия в металлах носит более сложный характер, чем это следует из теории Френкеля – Гейзенберга, данная теория позволяет качественно объяснить причину незаполненных внутренних электронных оболочек, радиус которых должен быть мал по сравнению с расстоянием между ядрами в решетке.

5.2 Доменная структура

Каждый реальный магнитный материал разделен по всему объему на множество замкнутых областей – доменов, в каждом из которых самопроизвольная намагниченность однородна и направлена по одной из осей легкой намагниченности.

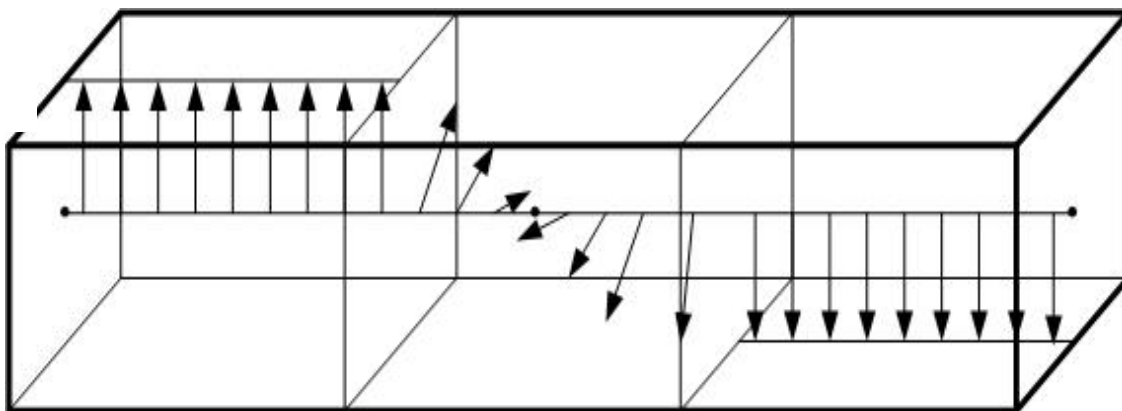


Рис. 5.2. Стенка Блоха

Такое состояние энергетически выгодно и кристалл в целом немагнитен, так как магнитные моменты доменов ориентированы в пространстве равно вероятно. Между соседними доменами возникают граничные слои (стенки Блоха). Внутри доменных стенок векторы намагниченности плавно поворачиваются на рисунке 5.2. Объем доменов может колебаться в широких пределах от 10^{-1} до 10^{-6} см³.

Ширина границ между антипараллельными доменами для железа $13 \cdot 10^{-8}$ м, то есть около 500 элементарных ячеек. Толщина границы зависит главным образом от соотношения энергий: обменной, магнитной, анизотропии и магнитоупругой. Размеры самих доменов зависят от неметаллических включений, границ зерен, скоплений дислокаций и других неоднородностей. Обычно домены имеют правильную форму.

На рисунке 5.3 показана идеализированная доменная структура кристаллического ферромагнетика.

Доменная структура поликристалла приведены на рисунке 5.4.

В магнитных материалах, предназначенных для устройств записи и хранения информации, создаются изолированные цилиндрические магнитные домены (ЦМД). На Рис.5.4 показаны ЦМД в тонкой магнитной пленке. Емкость отдельного ЦМД - элемента может достигать 10^5 бит. В отсутствии внешнего магнитного поля смещение в ЦМД – материалах доменная структура

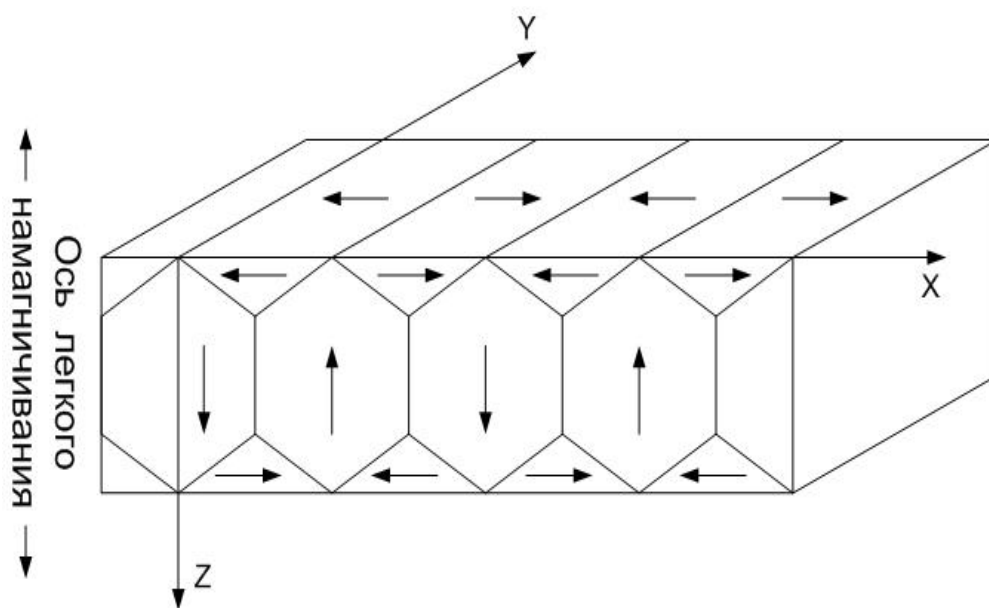


Рис. 5.3. Идеализованная доменная структура кристаллического ферромагнетика

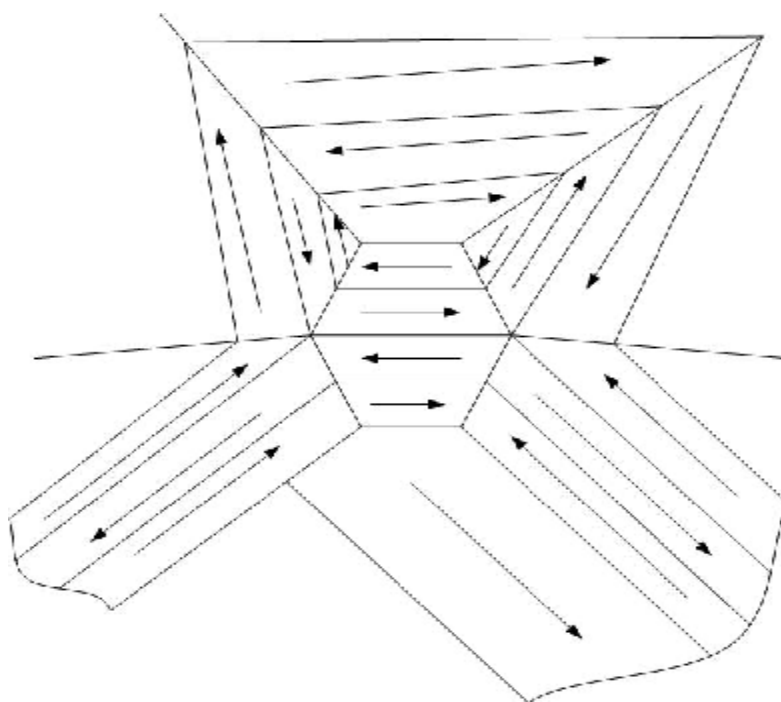


Рис. 5.4. Доменная структура поликристалла

5.3 Структура ферромагнетиков

Ферромагнетики в основном кристаллизуются в трех типах решеток: кубической, пространственной, кубической объемно-центрированной и гексогональной, показанной на рисунке 5.5.

Зависимости $B=f(H)$ показывают, что кристаллы являются магнитоаннизотропными. На рисунке эта зависимость показана для железа. Направления намагничивания указаны в квадратных скобках. При отсутствии внешнего поля векторы намагничивания располагаются в легком направлении. Площадь, заключенная между кривыми легкого и трудного намагничивания, пропорциональна энергии, которую требуется затратить для изменения направления намагничивания от легкого до трудного.

Энергию естественной кристаллографической магнитной анизотропии $-E_k$ характеризуют константами кристаллографической магнитной анизотропии. Для кубического кристалла

$$E_k = K_0 + K_1 \cdot (\alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \cdot \alpha_1^2) + K_2 \cdot \alpha_1^2 \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2,$$

где K_0, K_1, K_2 – константы кристаллографической магнитной анизотропии; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – направляющие косинусы вектора намагниченности по отношению к осям x, y, z ребер куба.

5.4 Магнитострикционная деформация

Это обратимое изменение формы и размеров образца при переходе ферромагнетика через точку Кюри при отсутствии внешнего поля (самопроизвольная магнитострикция) и при воздействии внешнего поля на ферромагнетик при $T < T_K$.

Сумму энергий кристаллографической магнитной анизотропии и магнитоупругой результате магнитострикции называют энергией магнитной анизотропии.

5.5 Магнитная проницаемость

В технике используется несколько десятков видов магнитной проницаемости в зависимости от конкретных применений магнитного материала.

Магнитная индукция и напряженность поля в изотропной среде связаны простым соотношением

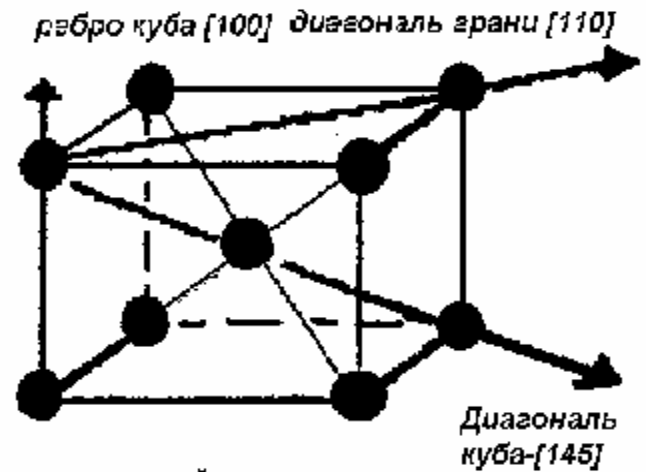
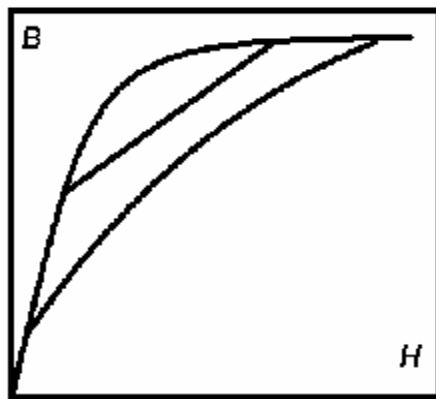
$$B = \mu_a H,$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства среды.

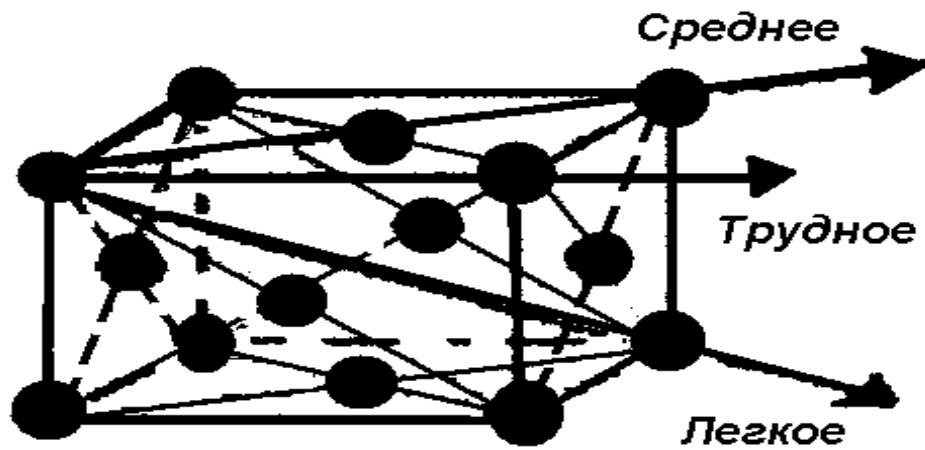
Сравнивая магнитное поле тока в проводе, расположенном в данной среде и в вакууме, установили, что в зависимости от свойств среды (материала) поле получается более интенсивным, чем в вакууме (парамагнитные материалы), или наоборот, менее интенсивным (диамагнитные материалы).

Таким образом, интенсивность магнитного поля, т.е. индукция B , зависит от среды, в которой существует поле.

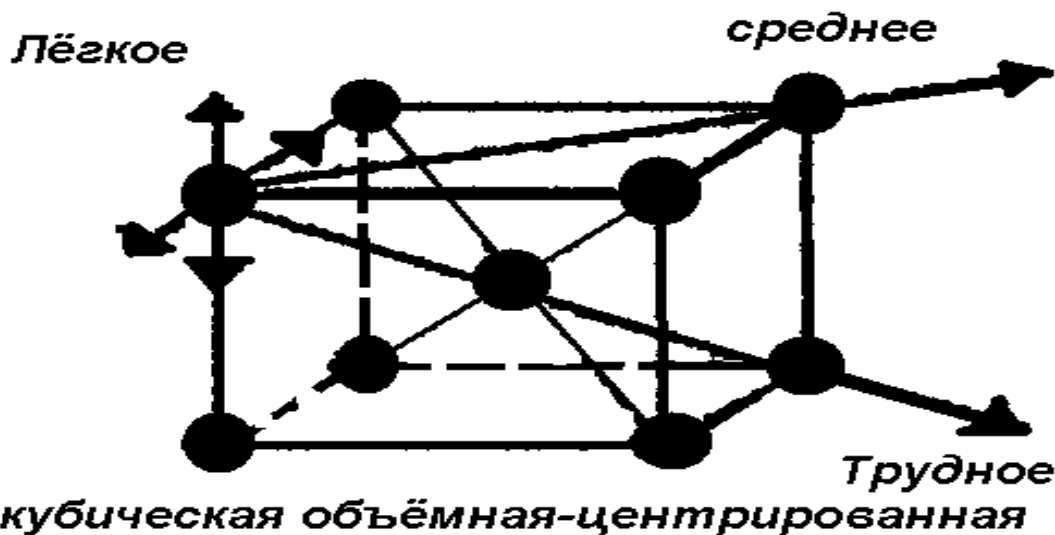
Абсолютная магнитная проницаемость вакуума называется магнитной постоянной μ_0 . В системе СИ для нее принято значение $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ом·с/м.



магнито-анізотропные свойства железа



Кубическая пространственная



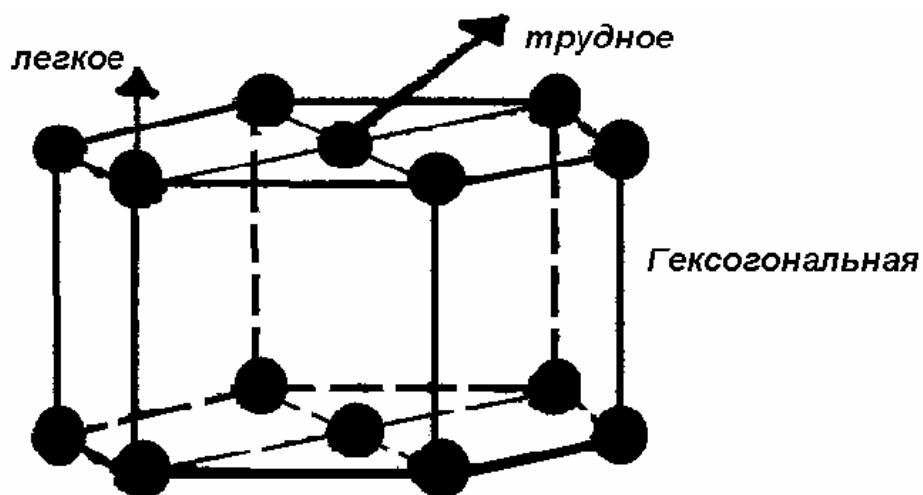


Рис.5.5. Анизотропия магнитных свойств железа

Абсолютную магнитную проницаемость различных материалов и сред сравнивают с магнитной постоянной. Отношение абсолютной магнитной проницаемости какого-либо материала к магнитной постоянной называется магнитной проницаемостью μ (или относительной магнитной проницаемостью), так что

$$\mu = \mu_a / \mu_0 .$$

Магнитная проницаемость – отвлеченное число. Для диамагнитных материалов и сред $m < 1$, например, для меди $\mu = 0,999995$. Для парамагнитных материалов $\mu > 1$, например для воздуха $\mu = 1,0000031$. При технических расчетах магнитная проницаемость диамагнитных и парамагнитных материалов и сред принимается равной единице.

У ферромагнитных материалов, играющих исключительную роль в электротехнике, магнитная проницаемость достигает десятков тысяч и зависит от магнитных свойств материала, температуры, интенсивности магнитного поля, т.е. величины индукции или от величины напряженности магнитного поля.

Зависимость $\mu = F(H)$ показана на рис.5.5 . Начальная и максимальная проницаемости являются частными случаями нормальной проницаемости

$$\mu_{\text{нач}} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 \cdot H} , \quad \mu_{\text{макс}} = \frac{B \cdot \mu_{\text{макс}}}{\mu_0 \cdot H_{\text{макс}}}$$

При одновременном воздействии на магнитный материал постоянного H_0 и H магнитных полей и обычно, при условии $H \ll H_0$ вводят понятие дифференциальной проницаемости $m_{\text{диф}}$

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}$$

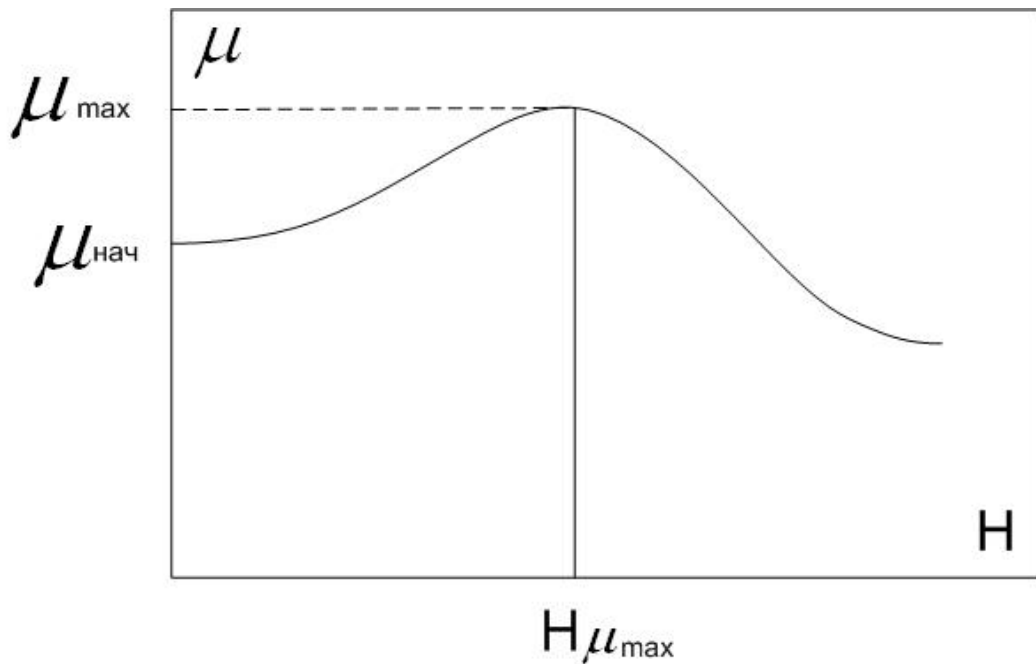


Рис.5.6 Зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H

Зависимость $\mu = F(T)$. Характер этой зависимости различен в слабых, средних и сильных полях. Для $\mu_{нач}$ при T_k наблюдается четко выраженный максимум, сглаживающийся при увеличении напряженности поля на рисунке 5.3. Возрастание $\mu_{нач}$ объясняется тем, что при нагревании облегчается смещение доменных границ и поворот векторов намагниченности доменов. Главным образом из-за уменьшения констант магнитострикции и магнитной анизотропии. Уменьшение $m_{нач}$ при высоких температурах связывается с резким уменьшением спонтанной намагниченности доменов.

5.6 Потери в магнитных материалах

В переменных полях площадь петли гистерезиса увеличивается за счет потерь на гистерезис P_B и дополнительных потерь P_d . Такая петля называется динамической, а суммарные потери полными или суммарными. Потери на гистерезис, отнесенные к единице объема материала (удельные потери).

$$P_{\Gamma} = \frac{\oint H \cdot dB}{V}, \text{ Дж/м}^3.$$

При перемагничивании с частотой f (Гц)

$$P_{\Gamma} = \frac{f \oint H \cdot dB}{\gamma}, \text{ Вт/кг},$$

где γ - плотность материала, кг/м³.

Потери на вихревые токи для листового образца

$$P_B = \frac{1,64d^2 f^2 B_{MAX}^2}{\gamma \cdot \rho},$$

где B_{MAX} - амплитуда магнитной индукции, Тл; f - частота переменного тока, Гц; d - толщина листа, м; γ - плотность, кг/м³; ρ - удельное электросопротивление, Ом·м

Дополнительные потери или потери на магнитную вязкость (магнитное последствие) обычно находят как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи

$$P_{\text{д}} = P - (P_{\text{Г}} + P_{\text{В}})$$

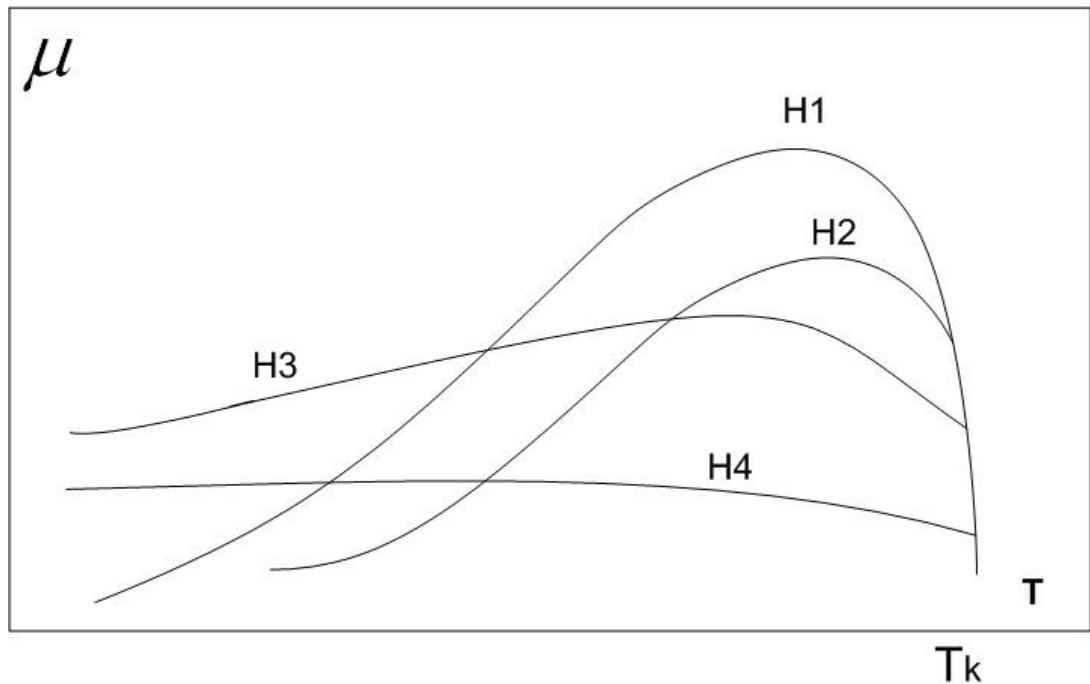


Рис.5.7 Зависимость магнитной проницаемости μ от температуры T

$$H_4 < H_2 < H_2 < H_1$$

H_1 - соответствует $\mu_{\text{НАЧ}}$, H_4 - соответствует области насыщения

Магнитная вязкость $J_n = J_n(t)$ зависит от времени действия магнитного поля. J при включении магнитного поля H быстро достигает значения J_1 , а затем со временем возрастает в соответствии с формулой

$$J_n(t) = J_{\text{но}} (1 - \exp(-t/\tau)),$$

где $J_{\text{но}}$ — намагниченность при $t \rightarrow \infty$, t - время релаксации.

На рисунке 5.4 показана зависимость напряженности магнитного поля и намагниченности от времени действия магнитного поля. В магнитотвердых материалах время t магнитной релаксации может достигать нескольких минут. Такое явление называют **сверхвязкостью**.

Тангенс угла магнитных потерь используется в переменных полях. Его можно выразить через параметры эквивалентной схемы, показанной на рисунке 5.5. Индуктивную катушку с сердечником из магнитного материала представляют в виде последовательной схемы из индуктивности L и активного сопротивления R . Пренебрегая собственной емкостью и сопротивлением обмотки катушки, получаем

$$\operatorname{tg} \delta_M = r / (wL).$$

Активная мощность P_a

$$P_a = J^2 \cdot wL \cdot \operatorname{tg} \delta_M,$$

где $J = K_M H$; K_M - магнитная восприимчивость

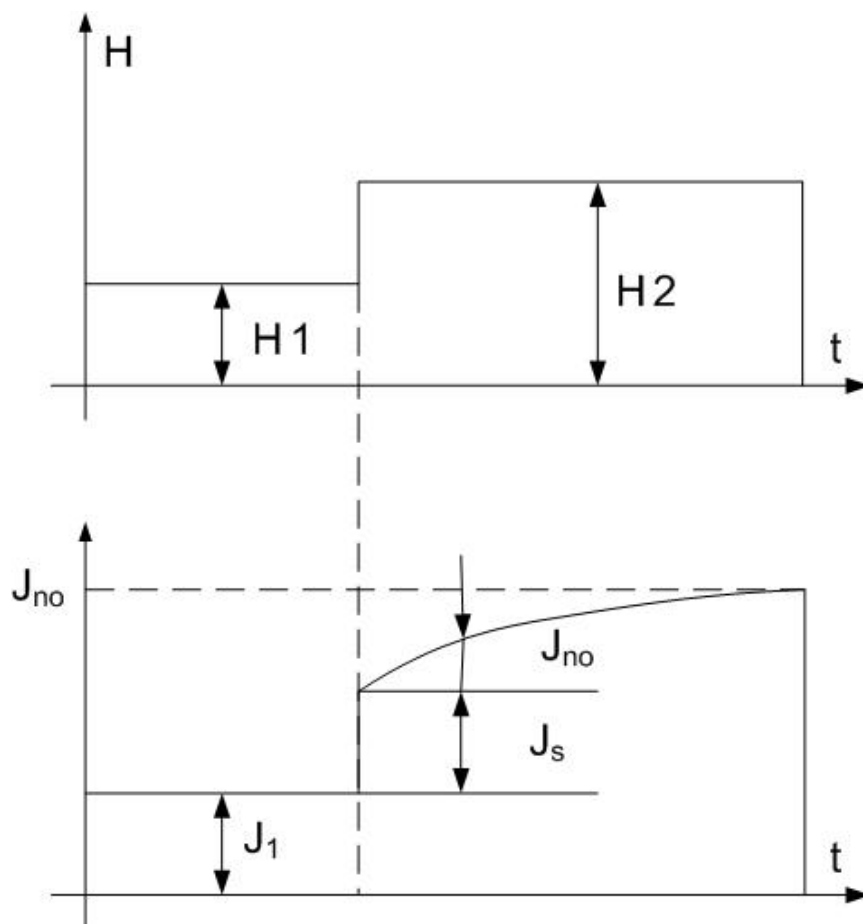


Рис.5.8 Зависимость намагничивания J магнитного материала от времени действия магнитного поля t

5.7 Электрические свойства магнитных материалов

Удельное электрическое сопротивление r металлических магнитных материалов зависит от состава и направления намагниченности по отношению к направлению движения электронов проводимости. Электрические свойства технических Fe, Co, Ni показаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Характеристики некоторых материалов

материал	R , мкОм·м	Температурный коэффициент электрического сопротивления, $10^{-3} K^{-1}$
Fe	0,097 (20°C)	6,2
Co	0,32 (500°C)	13,8 (500°C)
Ni	0,68 (0-100°C)	6,7

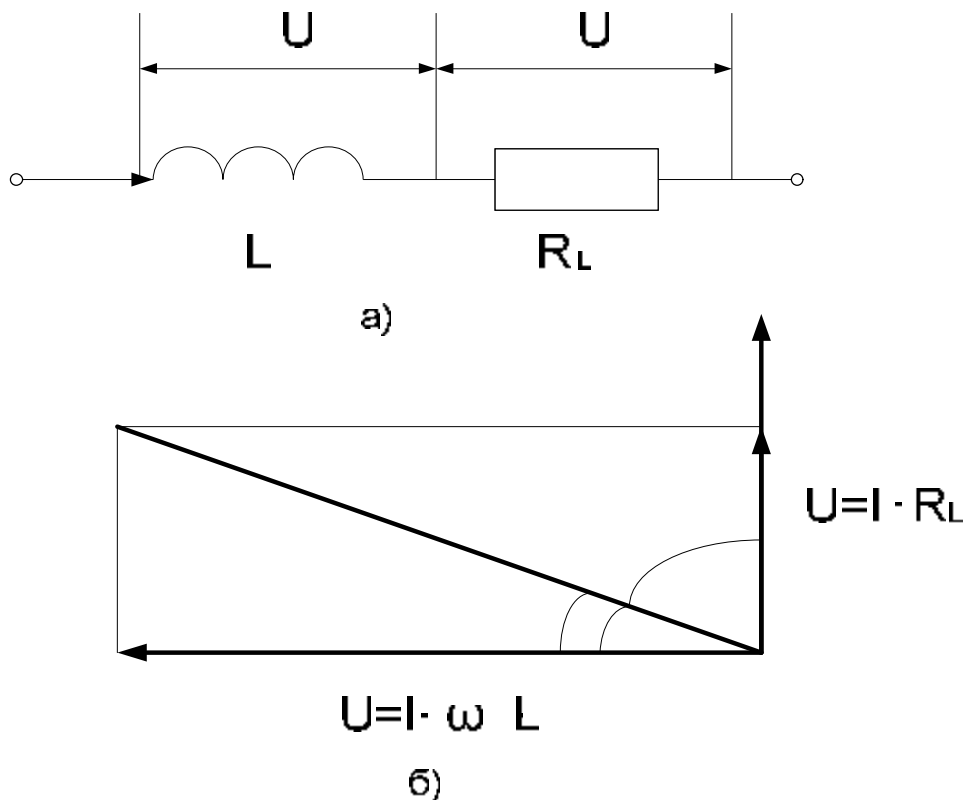


Рис.5.9. Схема замещения а) и векторная диаграмма б) индуктивной катушки с сердечником из магнитного материала

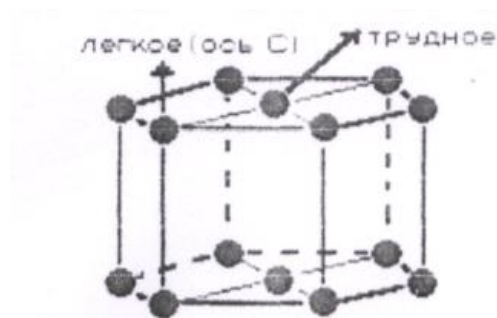


Рис.5.10 Кристаллическая структура направления плоскости, перпендикулярной легкого и трудного намагничивания

В чистых монокристаллических образцах металлов наблюдается значительная анизотропия электросопротивления. Так, в монокристаллах кобальта в направлении оси C $\rho_c = 0,103$ мкОм м, а в этой оси $\rho_p = 0,055$ мкОм м монокристалла кобальта по рисунку 5.6.

В ферритах по сравнению с металлическими ферромагнетиками удельное электрическое сопротивление много выше, сопоставимо с r полупроводников и может меняться в широких пределах в зависимости от состава, типа элементов структуры, вида примесей. Так для феррита иттрия удельное сопротивление $10^{10} - 10^{12}$ Ом·м, для феррита никеля $10^3 - 10^5$ Ом·м, для феррита лития 1-10 Ом·м. Энергия активации проводимости ферритов находится в

пределах 0,2 - 2 эВ. В ферритах часто наблюдается полярная (прыжковая) проводимость, обусловленная перескоком локализованных электронов из одного состояния в другое. Поляроны – квазичастицы, образованные локализованными на ионах электронами вместе с окружающим их полем поляризации. В случае поляронов мало радиуса энергия ионизации примесного центра 0,2-0,6 эВ.

5.8 Классификация магнитных материалов

Все вещества при рассмотрении магнитных свойств принято называть **магнетиками**, когда они способны под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться).

По своим магнитным свойствам **магнетики** подразделяются на три основные группы: диамагнетики; парамагнетики; ферромагнетики.

Количественной характеристикой намагниченого состояния вещества служит векторная величина – намагниченность **J**.

Диамагнетиками называются вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном направлению вектора магнитной индукции поля. К диамагнетикам относятся вещества, магнитные моменты атомов, молекул или ионов которых в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю. Диамагнетиками являются инертные газы, молекулярный водород и азот, цинк, медь, золото, висмут, парафин и многие другие органические и неорганические соединения.

В случае отсутствия магнитного поля диамагнетик немагнитен, поскольку в данном случае магнитные моменты электронов взаимно компенсируются, и суммарный магнитный момент атома равен нулю.

Наряду с диамагнитными веществами существуют и **парамагнитные** вещества, – вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля. У парамагнитных веществ при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты электронов не компенсируют друг друга, и атомы (молекулы) парамагнетиков всегда обладают магнитным моментом. Однако вследствие теплового движения молекул их магнитные моменты ориентированы беспорядочно, поэтому парамагнитные вещества магнитными свойствами не обладают. При внесении парамагнетиков во внешнее магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по полю (полной ориентации препятствует тепловое движение атомов). Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и уси-

ливающее его. При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля ориентация магнитных моментов вследствие теплового движения нарушается и парамагнетик размагничивается.

Особый класс **магнетиков** образуют вещества, способные обладать намагниченностью в отсутствии внешнего магнитного поля. По своему наиболее распространенному представлению (железо) их называют **ферромагнетиками**. Ферромагнетиками называются твердые вещества, обладающие при не слишком высоких температурах самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, изменения температуры. Ферромагнетики в отличие от слабомагнитных диа- и парамагнетиков являются сильномагнитными средами: внутреннее магнитное поле в них может в сотни и тысячи раз превосходить внешнее поле. Ферромагнитные материалы в большой или меньшей степени обладают магнитной анизотропией, т.е. свойством намагничиваться с различной степенью трудности в различных направлениях. Магнитные свойства ферромагнитных материалов сохраняются до тех пор, пока их температура не достигнет значения, называемого точкой Кюри. При температурах выше точки Кюри ферромагнетик ведет себя во внешнем магнитном поле как парамагнитное вещество. Он не только теряет свои ферромагнитные свойства, но у него изменяется теплоемкость, электропроводимость и некоторые другие физические характеристики. При намагничивании ферромагнетиков происходит небольшое изменение их линейных размеров, т.е. увеличение или уменьшение их длины с одновременным уменьшением или увеличением поперечного сечения. Это явление называется **магнитострикцией**, оно зависит от строения кристаллической решетки ферромагнетика. Ферромагнетики при температурах ниже точки Кюри обладают спонтанной намагниченностью независимо от наличия внешнего намагничивающего поля. Однако многие ферромагнитные материалы при температурах ниже точки Кюри не намагничены.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов ориентированы хаотически и компенсируют друг друга, поэтому результирующий магнитный момент ферромагнетика равен нулю, т.е. ферромагнетик не намагничен.

Внешнее магнитное поле ориентирует по полю магнитные моменты не отдельных атомов, как в парамагнетике, а целых областей спонтанной намаг-

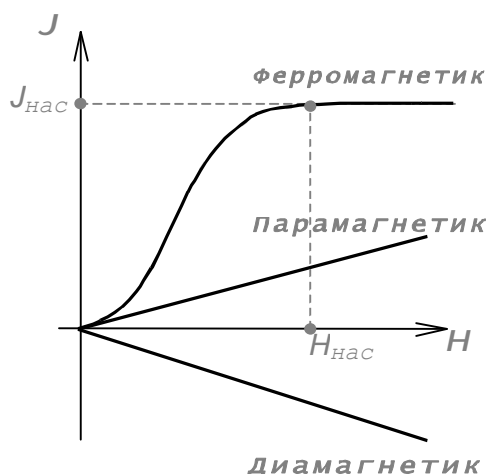


Рис.5.11 Кривые зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля

ниченности. Поэтому с ростом H намагниченность J рисунок 5.11 и магнитная индукция B уже в слабых полях растет довольно быстро.

Показанное на рисунке 5.11 намагничивание такого образца (ферромагнетик) в магнитном поле, напряженность H которого медленно

увеличивается, происходит за счет двух процессов: смещения границ доменов и вращения магнитных моментов доменов.

Процесс **смещения границ доменов** приводит к росту размеров тех доменов, которые самопроизвольно намагничены в направлениях, близких к направлению вектора H . Процесс **вращения магнитных моментов доменов**

по направлению H играет основную роль только в области, близкой к насыщению (т.е. при H близких к H_s). Допустим, что кольцевой магнитопровод из ферромагнитного материала не намагничен и тока в витках катушки нет, т.е. $B=0$ и $H=0$ (начало координат на рис. 5.12). При постепенном увеличении намагничивающего тока, т.е. МДС (магнито - движущая сила), а следовательно, и напряженности поля от нуля до некоторого наибольшего значения магнитная индукция увеличивается по кривой начального намагничивания (Oa) и достигает соответствующего максимального значения B_a . Если затем ток и напряженность поля уменьшаются, то и магнитная индукция уменьшается, при соответствующих значениях напряженности магнитная индукция несколько больше, чем при увеличении напряженности. Кривая изменения магнитной индукции (участок ab на рисунке 5.12) располагается выше кривой начального намагничивания. При нулевых значениях тока и напряженности поля магнитная индукция имеет некоторое значение B_r , называемое остаточной индукцией (отрезок Ob на рисунке 5.12).

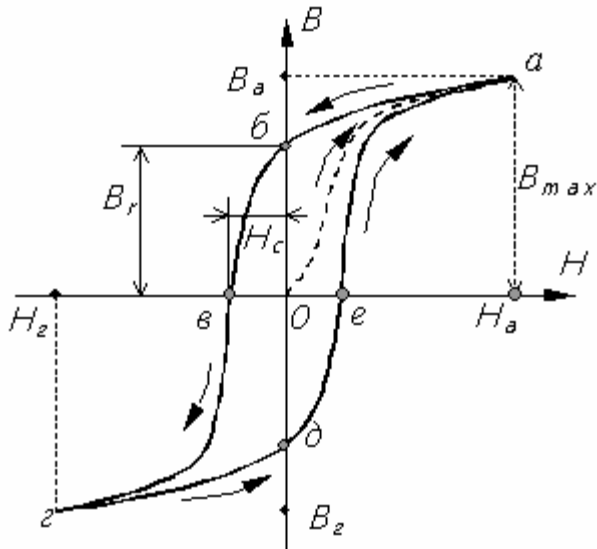


Рис.5.12 Кривая изменения магнитной индукции

Таким образом, магнитная индукция в ферромагнитном материале зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется гистерезисом. Оно обусловлено как бы внутренним трением, возникающим при изменении ориентации магнитных моментов доменов. При изменении направления намагничивающего тока, а, следовательно, и направления напряженности поля и постепенном увеличении тока

обратного направления напряженность поля достигает значения H_c , называемого коэрцитивной силой (отрезок $Oв$), при котором магнитная индукция $B=0$. При дальнейшем увеличении тока и напряженности поля магнитопровод намагничивается в противоположном направлении и при напряженности поля $H_r = -H_a$ магнитная индукция достигнет значения $B_r = -B_a$. Затем при уменьшении тока и напряженности поля до нуля магнитная индукция B_d становится равной $-B_b$. Наконец, при следующем изменении направления тока и напряженности поля и увеличения ее до прежнего значения H_a магнитная индукция увеличится также до прежнего значения B_a . Рассмотренный цикл перемагничивания ферромагнетика по кривой $абвгдеа$ называется гистерезисным циклом (петлей гистерезиса).

Такая симметричная замкнутая петля гистерезиса по рисунку 5.12 получается в действительности только после нескольких перемагничиваний с увеличением тока до значения I_a . При первых циклах перемагничивания петля несимметричная и незамкнутая. Наибольшая замкнутая петля, которая может быть получена для данного ферромагнитного материала, называется предельной на рисунке 5.13. При напряженности поля $H > H_{max}$ получается уже безгистерезисный участок кривой $B(H)$.

Если для данного ферромагнитного материала, выбирая различные наибольшие значения тока I_a , получить несколько симметричных петель гистерезиса по рисунку 5.13 и соединить вершины петель, то получим кривую, называемую основной кривой намагничивания, близкую к кривой начального намагничивания.

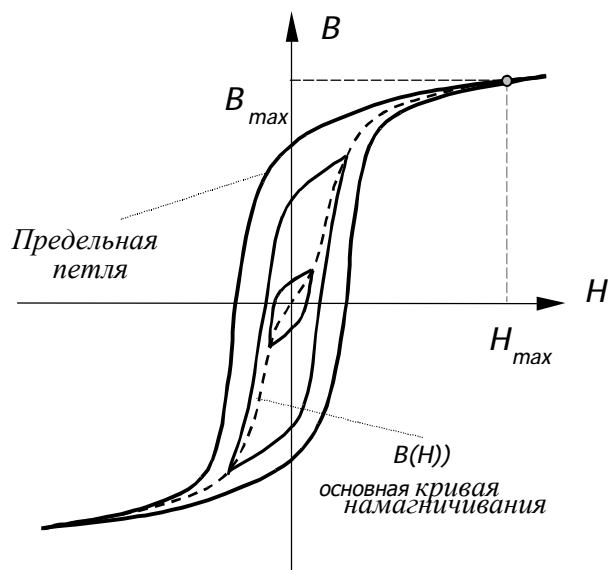


Рис.5.13 Гистерезисные петли при различных токах намагничивания

Циклическое перемагничивание можно применить для размагничивания магнитопровода, т.е. для уменьшения остаточной индукции о нулевого значения. С этой целью магнитопровод подвергают воздействию изменяющегося по направлению

и постепенно уменьшающегося магнитного поля.

и постепенно уменьшающегося магнитного поля.

Периодическое перемагничивание связано с затратой энергии, которая, превращаясь в тепло, вызывает нагрев магнитопровода. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затраченной при одном цикле перемагничивания. Энергия, затраченная на процесс перемагничивания, называется потерями от гистерезиса. Мощность потерь на циклическое перемагничивание, выражаемая обычно в ваттах на килограмм, зависит от материала, максимальной магнитной индукции и числа циклов перемагничивания в секунду или, что тоже, частоты перемагничивания.

Ферромагнитные материалы делятся на две группы: магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы применяются в качестве магнитопроводов (сердечников) в устройствах и приборах, где магнитный поток постоянный (полюсные башмаки и сердечники измерительного механизма) или переменный (например, магнитопровод трансформатора). Они обладают низким значением коэрцитивной силы H_c (ниже 400 А/м), высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями от гистерезиса. Намагничивание магнитно-мягких материалов происходит в основном за счет смещение междоменных границ, а в **магнитно-твердых** – за счет вращения вектора намагниченности (в магнитно-твердых материалах на основе редкоземельных эле-

ментов преобладают процессы смещения). К этой группе материалов относятся: техническое железо и низкоуглеродистые стали, листовые электротехнические стали, железоникелевые сплавы с высокой проницаемостью (пермаллой) и оксидные ферромагнетики – ферриты и оксиферы.

Пермаллой – это сплавы различного процентного содержания железа и никеля, а некоторые из них, кроме того, молибдена, хрома, кремния, алюминия. Ферритами называют ферромагнитные материалы, получаемые из смеси окислов железа, цинка и других элементов. При изготовлении магнитопроводов смесь размалывают, прессуют и отжигают при температуре около 1200 °С; таким образом, получают магнитопроводы нужной формы. Ферриты обладают очень большим удельным сопротивлением, вследствие чего потери из-за вихревых токов чрезвычайно малы и их можно применять при высокой частоте. **Ферриты** обладают значительной начальной магнитной проницаемостью, незначительной индукцией насыщения (0,18 – 0,32 Тл) и малой коэрцитивной силой (8 – 80 А/м).

Магнитодиэлектрики – это материалы, получаемые из смеси мелкозернистого ферромагнитного порошка с диэлектриком (поливинилхлорид, полиэтилен). Смесь формуют, прессуют и запекают; в результате мельчайшие частицы ферромагнетика оказываются разделенными электроизолирующей пленкой из немагнитного материала.

Ферриты и магнитодиэлектрики широко применяются в качестве сердечников в аппаратуре проводной и радиосвязи, в магнитных усилителях, вычислительных машинах и в других областях техники.

Магнито - мягкие материалы намагничиваются в относительно слабых магнитных полях и обладают высокими значениями начальной μ_n и максимальной μ_{max} магнитных проницаемостей, малым значением коэрцитивной силы H_c . Значения B_{max} - максимальной магнитной индукции – соответствует намагниченности насыщения ферромагнетиков.

Для характеристики **магнитно-твердых** материалов используют обычно ту часть кривой гистерезиса, которая лежит во втором квадранте, а в первом изображают изменение удельной магнитной энергии от индукции. Как показано на рисунке 5.14. Магнитная энергия в воздушном зазоре постоянного магнита будет максимальна при некоторых значениях H_d и B_d . Условие

$$W = (B_d \cdot H_d) / 2 = W_{MAX}, \text{ Дж/м}^2$$

определяет наилучшее использование магнита и является важнейшим параметром, характеризующим качество материала. Множитель $1/2$ иногда опускается. Коэффициент выпуклости

$$\eta = (B \cdot H)_{MAX} / (B_r \cdot H_c)$$

Характеризует форму кривой размагничивания – степени прямоугольности. Для магнитно – твердых материалов. Используемых в различных областях современной техники $H_c = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6 \text{ А/м}$, $(BH/2)_{\text{MAX}} = 0,5 - 200 \text{ кДж/м}^3$, $(BH/2)_{\text{MAX}} = 1 - 400 \text{ кДж/м}^3$.

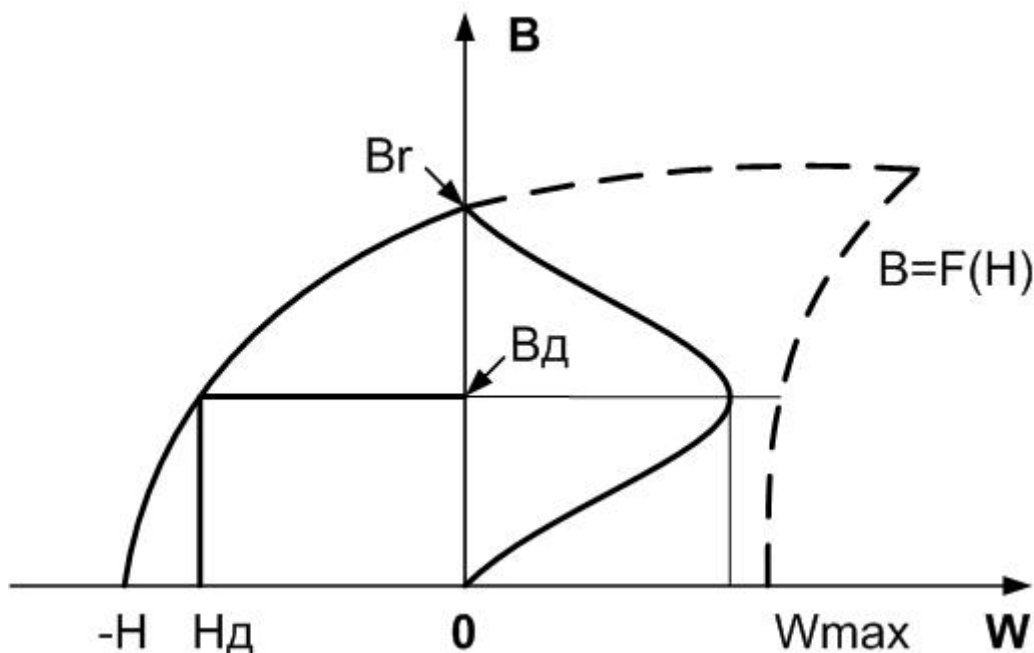


Рис.5.14 Зависимость магнитной энергии W от индукции B

Магнитно-твердые материалы предназначены для изготовления постоянных магнитов самого различного назначения. Эти материалы характеризуются большой коэрцитивной силой и большой остаточной индукцией. К магнитно-твердым материалам относятся: углеродистые, вольфрамовые, хромистые и кобальтовые стали.

5.9 Пермаллои

Пермаллои – железоникелевые сплавы с высокой проницаемостью в слабых полях. По составу выделяют **низконикелевые** (40-50%Ni) и **высоконикелевые** (72-80%). Такое подразделение обусловлено смещением магнитных электрических характеристик в зависимости от процентного содержания никеля. Обе группы пермаллоев для улучшения электромагнитных свойств легируются различными элементами, например молибденом, хромом, медью и некоторыми другими элементами. Плавка осуществляется в вакууме или нейтральных газах. Тонкие листы и ленты выпускаются или штампуются хо-

лоднокатанными с последующим отжигом для получения высоких магнитных свойств. Поверхность ленты для навивки (при изготовлении тороидальных сердечников) и последующего отжига покрывается тонким слоем окислов кремния, магния или алюминия способом катафореза или осаждением из суспензии, жидкой фазой которой является легко испаряющаяся жидкость, например ацетон. В процессе сборки и эксплуатации сердечников из пермаллоя не допустимы механические напряжения (удары, рихтование, сдавливание обмоткой и другие) из-за ухудшения магнитных характеристик.

Высокие магнитные свойства пермаллоев, их способность легко намагничиваться объясняют близостью к нулю констант кристаллографической анизотропии и намагниченности насыщения, но это же приводит и к большей чувствительности магнитных свойств от внешних напряжений

5.10 Механические, магнитные и электрические свойства магнитомягких ферритов

Механические свойства как и у керамики - твердость, хрупкость, недопустимость обработки резанием. При спекании - усадка от 10 до 20%. Хорошо шлифуются и полируются абразивными материалами, режутся алмазным инструментом. Наиболее широко в качестве магнитомягких ферритов применяют никель-цинковые и марганец-, цинковые ферриты, представляющие собой твердые растворы замещения, образованные простыми ферритами NiFe_2O_4 и MnFe_2O_4 являющиеся ферромагнетиками, с немагнитным ZnFe_2O_4 . В переменных полях для оценки допустимого частотного диапазона ферриты кроме μ характеризуются $\text{tg } \delta$ - тангенсом угла магнитных потерь. Для ферритов потерями на вихревые токи и гистерезис в области слабых полей можно пренебречь.

При повышении частоты, начиная с некоторой, характерной для данной марки феррита значения, $\text{tg } \delta$ возрастает более резко, при этом уменьшается. Эту частоту называют критической $f_{\text{кр}}$. Частоту, при которой $\mu_{\text{нач}}$ уменьшается до 0.7 от ее значения $f=0$ называют граничной – $f_{\text{гр}}$. Причина уменьшения и роста $\text{tg } \delta$ связывается со сложными резонансными и релаксационными процессами. Зависимости μ и $\text{tg } \delta$ от частоты в логарифмическом масштабе для разных марок никель-цинкового феррита показана на рисунке. Цифра в обозначении марки феррита означает величину начальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{нач}}$.

Магнитные и электрические свойства трех марок никель-цинковых ферритов приведены в таблице ρ ферритов в зависимости от химического состава и термической обработки изменяется от 10 до 10^8 Ом м. Основным недостатком ферритов по сравнению с металлическими магнитными материалами - малое значение их магнитной проницаемости. Некоторые типы изде-

лий из магнитомягких ферритов показаны на рисунке.

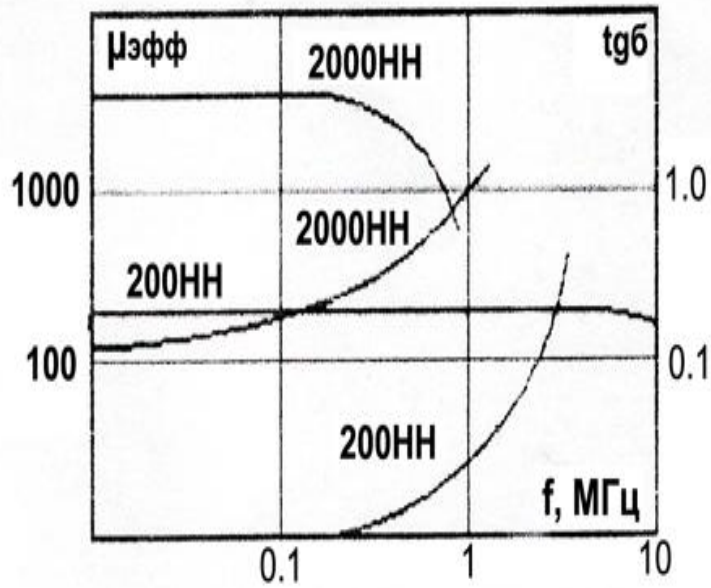


Рис.5.15 Зависимости эффективной магнитной проницаемости $\mu_{\text{эфф}}$ и тангенса угла магнитных потерь $\text{tg}\delta$ от частоты f для различных марок ферритов

Магнитные и электрические свойства трех марок никель-цинковых ферритов приведены в таблице 5.2. В зависимости от химического состава и термической обработки изменяется от 10 до 10^8 Ом м. Основным недостатком ферритов по сравнению с металлическими магнитными материалами является малое значение их магнитной проницаемости. Некоторые типы изделий из магнитомягких ферритов показаны на рисунке 5.2.

Таблица 5.2 Характеристики некоторых магнитомягких материалов

Марка феррита	$\mu_{\text{макс}}$	H , А/м (при $\mu_{\text{макс}}$)	$f_{\text{кр}}$, МГц	ρ , Ом м	T_k , °С
2000НН	7000	12	0.2	10	70
200 НН	300	160	3.0	10^3	120
10 ВЧ	40	3700	250	10^8	500

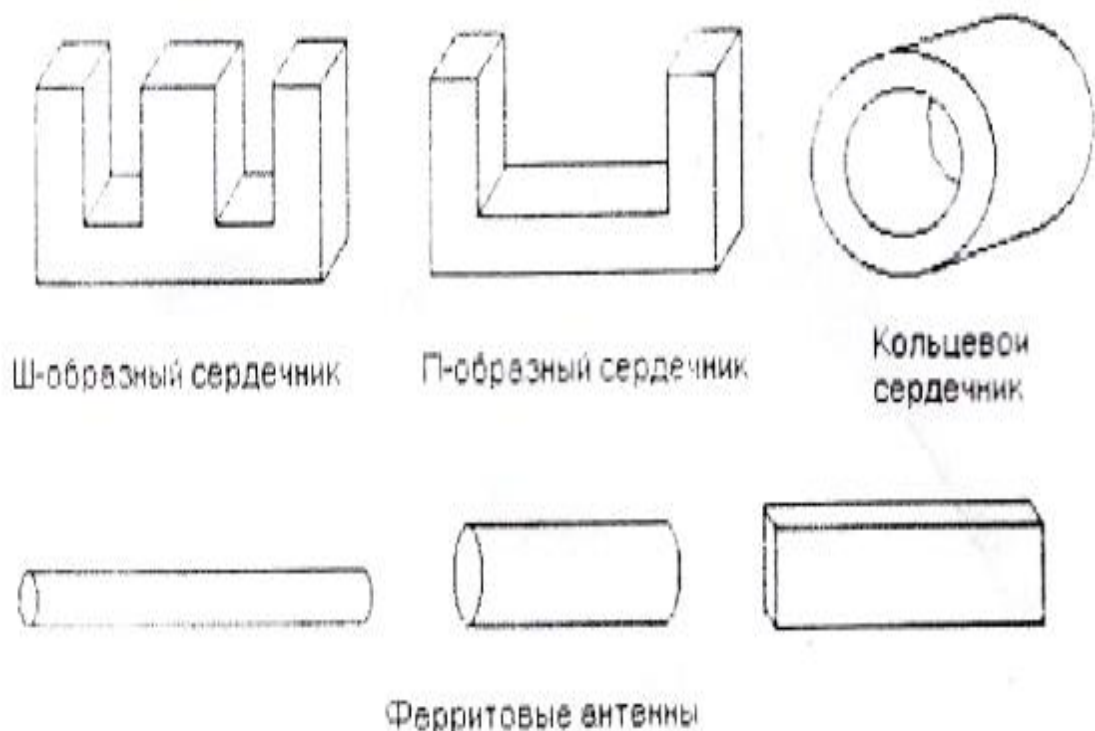


Рис.5.16 Типы изделий из магнитомягких материалов

5.11 Специальные магнитные материалы.

Материалы с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД), применяемые для изготовления запоминающих устройств (ЗУ). Емкость отдельного устройства (типа) на ЦМД может составлять 10^5 бит. Чем меньше H_c , тем выше быстродействие ЦМД - устройства. Обычно H_c должна быть не больше 10 А/м. Основные материалы с ЦМД устройства приведены в таблице 5.3.

5.12 Аморфные магнитомягкие материалы (АММ)

Аморфные магнитомягкие материалы (АММ) являются магнетиками с неупорядоченным расположением атомов, получаемом наиболее часто в результате быстрой закалки расплава со скоростью охлаждения 10^4 - 10^6 град/с. Аморфные тонкие пленки с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД) можно получать катодным распылением или вакуумным напылением редкоземельных и переходных металлов. Металлические аморфные сплавы содержат 75-85% одного или нескольких переходных металлов (Fe, Co, Ni) и 15-25% стеклообразователя, в качестве которого используют бор, углерод, кремний, фосфор. По магнитным свойствам АММ близка к электротехническим сталям и пермаллоям. Наиболее перспективные сплавы - железоникелевые, высококобальтовые и высокожелезистые. Для получения оптимальных свойств применяют термомагнитную обработку, что позволяет повысить B_s и прямоугльность петли гистерезиса.

Таблица 5.3 Свойства материалов устройства с ЦМД

Материал	Свойства, особенности техноло-
Ортоферриты RFeO ₃ R - редко-земельный элемент (Y, Sm, Eu, Er, Yb)	Высокая подвижность доменных границ, прозрачность в красном свете ($\lambda = 0.6$ мкм). Плотность информации не велика. $10^3 - 10^4$ бит/см ²
Ферриты гранаты R ₃ Fe ₅ O ₁₂	Плотность информации выше $10^5 - 10^6$ бит/см ² , но подвижность доменных границ ниже, чем у ортоферритов. Применяются в виде монокристаллических
Аморфные магнит. пленки сплав. Cd-Co, CdFe	Плотность информации до 10^9 бит/см ² . Относительно низкая стоимость. Низкая термостабильность и низкое эл. сопротивление - недостатки.
Гексагональные ферриты BaFe ₁₂ O ₁₉) и др.	Высокая намагниченность насыщения. Субмикронное ЦМД, однако низкая подвижность ограничивает применение.

Магнитные свойства двух промышленных сплавов после термообработки показаны в таблице 5.4.

Таблица 5.4 Характеристики и магнитные свойства сплавов

Марка	B _s , Тл	μ _{макс}	H _c ,	B _r /B _s при	ρ,
45НПР-А	0.78	310000	1.6	0.93	1.4
44НМР-А	0.88	750000	0.56	0.72	1.6

АММ имеют повышенную твердость и коррозионную стойкость. Удельное сопротивление **АММ** в **3-5 раз** больше, чем у кристаллических,

Применение: магнитные экраны, сердечники малогабаритных трансформаторов, магнитных усилителей, головки магнитозаписывающих устройств.

5.13 Магнитодиэлектрики

Как и ферриты являются высокочастотными магнитными материалами. По сравнению с ферритами имеют более стабильные свойства, но по ряду электромагнитных параметров уступают ферритам. Получаются по технологии аналогичной технологии пластмасс. МД состоят из мелкоизмельченного ферромагнетика, частицы которого изолированы и скреплены немагнитным материалом. В качестве ферромагнетика наиболее часто используют альсифер, карбонильное железо, пермаллой, в качестве связки как органические материалы такие как бакелит, полистирол, шеллак, так и неорганические -

жидкое стекло, стеклоэмали и другие. Прессование изделий из МД - колец, сердечников и т.д. производится при давлениях $(14-20) \cdot 10^2$ МПа ($14-20$ Т/см²), чем выше давление, тем выше магнитная проницаемость.

Примеры магнитных характеристик промышленных магнитодиэлектриков показаны в таблице 5.5.

Таблица 5.5 Магнитные характеристики магнитодиэлектриков

Основа магнитодиэлектрика	Марка	$\mu_{нач}$	Пределы линейности тангенса угла потерь	
			На частоте f , МГц	на величине H , А/м
Альсифер	ТЧ-90	79-91	до 0.5	до 240
	ТЧ-22	19-24	$\gg 20$	$\gg 1200$
Карбонильное	Р-10	$\mu_{эфф}$	100	2400
		2.9		
	Р-100	1.55	100	

5.14 Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы применяются в основном для изготовления постоянных магнитов многих устройств в электро- и радиотехнике, автоматике, приборостроении, электронике. По сравнению с электромагнитами постоянного тока имеют ряд преимуществ, главные из которых: повышенная работоспособность; экономия материалов и потребления энергии; экономическая и техническая выгода применения.

Для получения высокой коэрцитивной силы в магнитных материалах кроме выбора химического состава используют технологии, оптимизирующие кристаллическую структуру и затрудняющие процесс перемагничивания - это закалка сталей на мартенсит, дисперсионное твердение сплавов, создание высоких внутренних механических напряжений, посторонних включений при высокой магнитострикций и других. В результате затрудняются процессы смещения доменных границ. У высококоэрцитивных сплавов магнитная текстура создается путем их охлаждения в сильном магнитном поле.

5.15 Сплавы на основе железа - никеля - алюминия

Сплавы на основе железа никеля - алюминия применяют в основном легированные медью и кобальтом. Высококобальтовые сплавы с содержанием Со более 15% используют обычно с магнитной и кристаллической текстурой. Намагничивание этих сплавов происходит главным образом за счет процессов вращения векторов намагничивания. Эти сплавы отличаются высокой твердостью и хрупкостью, поэтому магниты из них изготавливают методом литья. Обрабатывается шлифовкой, в том числе с применением алмазного инструмента, ультразвука и др. Самые дешевые бескобальтовые сплавы ЮНД и другие, но магнитные свойства у них относительно низки. ЮНДК-15 и ЮНДК-18 магнитоизотропные сплавы с относительно высокими магнитными свойствами. Сплавы ЮНД с 24% Со имеют высокие магнитные свойства в направлении магнитной текстуры, полученной при термомагнитной обработке. ЮНДК-35Т5БА обладают наибольшей энергией W_{\max} ($W_{\max}=35-40$ кДж/м³). ЮНДК-40Т8 -титанистый сплав, применяемый в сильно разомкнутых системах. Имеет наиболее высокую коэрцитивную силу.

5.16 Металлокерамические магниты

Получают методами порошковой металлургии из сплавов Fe-Ni-Al-Co и из деформируемых сплавов Cu-Ni-Co, Cu-Ni-Fe, Fe-Co-Mo, Pt-Co и Ag-Mn-Al.

Механическая прочность их в 3-6 раз выше, чем у литых магнитов, но пористость в 3-5% снижает W_{\max} на 10-20%.

5.17 Магнитотвердые ферриты

Применяются главным образом феррит бария $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, феррит кобальта $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и феррит стронция $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. Высокая H_c этих материалов связана с малым размером кристаллических зерен и сильной магнитокристаллической анизотропией. Магниты из ферритов можно использовать при высоких частотах, что связано с высоким удельным сопротивлением. У бариевых ферритов, например $\rho=10^4 - 10^7$ Ом*м, Промышленность выпускает бариевые изотропные (БИ) и бариевые анизотропные (БА) магниты, получаемые прессованием в магнитном поле. Анизотропные магниты обладают более высокими магнитными свойствами (W_{\max}, H_c). По сравнению с литыми бариевые магниты имеют много большую H_c и малую B_s , отличаются высокой стабильностью при воздействии магнитных полей, различных механических воздействий, структурного старения. Стоимость магнитов из ферритов почти в 10 раз меньше, чем у магнитов из сплава ЮНДК-24. Недостатки - большая хрупкость и твердость, сильная зависимость магнитных свойств от температуры.

5.18 Сплавы на основе редкоземельных металлов (РЗМ)

Сплавы на основе РЗМ обладают очень высокими значениями H_c и W_{max} . Наибольший интерес представляют соединения RCo_5 и R_2Co_{17} , где R - редкоземельный металл. Для бинарных соединений этой группы $W_{max} = 190$ кДж/м³, для тройных сплавов типа $R_2(Co_{1-x}Fe_x)$, где $x < 0.6$ на основе самария и празеодима $W_{max} = 240$ кДж/м³ (теоретическое значение).

Магниты из этих сплавов получают наиболее часто жидкофазным спеканием из порошков. Например, магниты на основе $SmCo_5$ спекаются после прессования при температуре 1100 °С в течение 30 минут в атмосфере чистого аргона.

ГЛАВА 6. ОПТОВОЛОКОННАЯ СВЯЗЬ

6.1 Особенности оптических систем связи.

Тема об оптоволоконной линии связи является весьма актуальной на данный момент времени. Многие фирмы создают телевизоры, телефоны, магнитофоны, компьютера и многое другое, то есть – бытовую технику, которая упрощают жизнь человека. Но для внедрения новых технологий нужно изменять или улучшать старое. В пример этому можно привести наши линии связи на коаксиальном (медном) кабеле. Их скорость мала, даже для передачи видео информации, из одного места в другое, удалённое на большое расстояние, она не годится. А волоконная оптика как раз то, что нам нужно - её скоростью передачи информации очень большая. Низкие потери при передаче сигнала позволяет прокладывать значительные по дальности участки кабеля без установки дополнительного оборудования. Имеет хорошую помехозащищенность, легкость прокладки и долгие сроки работы кабеля практически в любых условиях.

Волоконно-оптические линии связи - это вид связи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно". Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Основания так считать вытекают из ряда особенностей, присущих оптическим волноводам.

6.2 Физические особенности.

Широкополосность оптических сигналов, обусловленная чрезвычайно высокой несущей частотой. Это означает, что по оптической линии связи

можно передавать информацию со скоростью порядка 1.1 Терабит/с. Говоря другими словами, по одному волокну можно передать одновременно 10 миллионов телефонных разговоров и миллион видеосигналов. Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга. Кроме того, в оптическом волокне могут распространяться световые сигналы двух разных поляризаций, что позволяет удвоить пропускную способность оптического канала связи. На сегодняшний день предел по плотности передаваемой информации по оптическому волокну не достигнут. Очень малое (по сравнению с другими средами) затухание светового сигнала в волокне. Лучшие образцы российского волокна имеют затухание 0.22 дБ/км на длине волны 1.55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без регенерации сигналов.

6.3. Технические особенности.

Волокно изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди. Оптические волокна имеют диаметр около 1 – 0,2 мм, то есть очень компактны и легки, что делает их перспективными для использования в авиации, приборостроении, в кабельной технике. Стекланные волокна - не металл, при строительстве систем связи автоматически достигается гальваническая развязка сегментов. Применяя особо прочный пластик, на кабельных заводах изготавливают самонесущие подвесные кабели, не содержащие металла и тем самым безопасные в электрическом отношении. Такие кабели можно монтировать на мачтах существующих линий электропередач, как отдельно, так и встроенные в фазовый провод, экономя значительные средства на прокладку кабеля через реки и другие преграды.

Системы связи на основе оптических волокон устойчивы к электромагнитным помехам, а передаваемая по световодам информация защищена от несанкционированного доступа. Волоконно-оптические линии связи нельзя подслушать неразрушающим способом. Всякие воздействия на волокно могут быть зарегистрированы методом мониторинга (непрерывного контроля) целостности линии. Теоретически существуют способы обойти защиту путем мониторинга, но затраты на реализацию этих способов будут столь велики, что превзойдут стоимость перехваченной информации.

Для обнаружения перехватываемого сигнала понадобится перестраиваемый интерферометр Майкельсона специальной конструкции. Причем, видность интерференционной картины может быть ослаблена большим количеством сигналов, одновременно передаваемых по оптической системе связи. Можно распределить передаваемую информацию по множеству сигналов или передавать несколько шумовых сигналов, ухудшая этим условия перехвата информации. Потребуется значительный отбор мощности из волокна, чтобы несанкционированно принять оптический сигнал, а это вмешательство легко зарегистрировать системами мониторинга. Важное свойство

оптического волокна - долговечность. Время жизни волокна, то есть сохранение им своих свойств в определенных пределах, превышает 25 лет, что позволяет проложить оптико-волоконный кабель один раз и, по мере необходимости, наращивать пропускную способность канала путем замены приемников и передатчиков на более быстродействующие. Есть в волоконной технологии и свои недостатки: при создании линии связи требуются активные высоконадежные элементы, преобразующие электрические сигналы в свет и свет в электрические сигналы. Необходимы также оптические коннекторы (соединители) с малыми оптическими потерями и большим ресурсом на подключение-отключение. Точность изготовления таких элементов линии должна соответствовать длине волны излучения, то есть погрешности должны быть порядка доли микрона. Поэтому производство таких компонентов оптических линий связи очень дорогостоящее. Другой недостаток заключается в том, что для монтажа оптических волокон требуется дорогостоящее технологическое оборудование. а) инструменты для оконцовки, б) коннекторы, в) тестеры, г) муфты и спайс-касеты

6.4. Оптическое волокно

Промышленность многих стран освоила выпуск широкой номенклатуры изделий и компонентов ВОЛС. Следует заметить, что производство компонентов ВОЛС, в первую очередь оптического волокна, отличается высокой степенью концентрации. Важнейший из компонентов ВОЛС - оптическое волокно. Для передачи сигналов применяются два вида волокна: одномодовое и многомодовое. Своё название волокна получили от способа распространения излучения в них. Волокно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления. В одномодовом волокне диаметр световодной жилы порядка 8-10 мкм, то есть, сравним с длиной световой волны. При такой геометрии в волокне может распространяться только один луч (одна мода). В многомодовом волокне размер световодной жилы порядка 50-60 мкм, что делает возможным распространение большого числа лучей (много мод). Оба типа волокна характеризуются двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Затухание обычно измеряется в дБ/км и определяется потерями на поглощение и на рассеяние излучения в оптическом волокне. Потери на поглощение зависят от чистоты материала, потери на рассеяние зависят от неоднородностей показателя преломления материала. Затухание зависит от длины волны излучения, вводимого в волокно. В настоящее время передачу сигналов по волокну осуществляют в трех диапазонах: 0.85 мкм, 1.3 мкм, 1.55 мкм, так как именно в этих диапазонах кварц имеет повышенную прозрачность. Другой важнейший параметр оптического волокна - дисперсия. Дисперсия - это рассеяние во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала. Существуют три типа дисперсии: модовая, материальная и волноводная. Модовая дисперсия - присуща многомодовому волокну и обусловлена наличием большого числа мод, время распространения которых различно. Материальная дисперсия - обусловлена зависимостью по-

казателя преломления от длины волны. Волноводная дисперсия - обусловлена процессами внутри моды и характеризуется зависимостью скорости распространения моды от длины волны. Поскольку светодиод или лазер излучает некоторый спектр длин волн, дисперсия приводит к уширению импульсов при распространении по волокну и тем самым порождает искажения сигналов. При оценке пользуются термином "полоса пропускания" - это величина, обратная к величине уширения импульса при прохождении им по оптическому волокну расстояния в 1 км. Измеряется полоса пропускания в МГц*км. Из определения полосы пропускания видно, что дисперсия накладывает ограничение на дальность передачи и на верхнюю частоту передаваемых сигналов. Если при распространении света по многомодовому волокну, как правило, преобладает модовая дисперсия, то одномодовому волокну присущи только два последних типа дисперсии. Затухание и дисперсия у разных типов оптических волокон различны. Одномодовые волокна обладают лучшими характеристиками по затуханию и по полосе пропускания, так как в них распространяется только один луч. Однако, одномодовые источники излучения в несколько раз дороже многомодовых. В одномодовое волокно труднее ввести излучение из-за малых размеров световодной жилы, по этой же причине одномодовое волокно сложно сращивать с малыми потерями. Оконцевание одномодовых кабелей оптическими разъемами также обходится дороже. Многомодовые волокна более удобны при монтаже, так как в них размер световодной жилы в несколько раз больше, чем в одномодовых волокнах. Многомодовый кабель проще оконцевать оптическими разъемами с малыми потерями (до 0,3 дБ) в стыке. На многомодовое волокно рассчитаны излучатели на длину волны 0,85 мкм - самые доступные и дешевые излучатели, выпускаемые в очень широком ассортименте. Но затухание на этой длине волны у многомодовых волокон находится в пределах 3-4 дБ/ км и не может быть существенно улучшено. Полоса пропускания у многомодовых волокон достигает 800 МГц*км, что приемлемо для локальных сетей связи, но не достаточно для магистральных линий.

6.5 Волоконно-оптический кабель

Вторым важнейшим компонентом, определяющим надежность и долговечность ВОЛС, является волоконно-оптический кабель (ВОК). На сегодня в мире несколько десятков фирм, производящих оптические кабели различного назначения. Наиболее известные из них: AT&T, General Cable Company (США); Sincor (ФРГ); BICC Cable (Великобритания); Les cables de Lion (Франция); Nokia (Финляндия); NTT, Sumitomo (Япония), Pirelli(Италия).

Определяющими параметрами при производстве ВОК являются условия эксплуатации и пропускная способность линии связи. По условиям эксплуатации кабели подразделяют на: монтажные, станционные, зонные, магистральные. Первые два типа кабелей предназначены для прокладки внутри зданий и сооружений. Они компактны, легки и, как правило, имеют небольшую строительную длину. Кабели последних двух типов предназначены для

прокладки в колодцах кабельных коммуникаций, в грунте, на опорах вдоль ЛЭП, под водой. Эти кабели имеют защиту от внешних воздействий и строительную длину более двух километров. Для обеспечения большой пропускной способности линии связи производятся ВОК, содержащие небольшое число (до 8) одномодовых волокон с малым затуханием, а кабели для распределительных сетей могут содержать до 144 волокон как одномодовых, так и многомодовых, в зависимости от расстояний между сегментами сети. При изготовлении ВОК в основном используются два подхода: конструкции со свободным перемещением элементов конструкции с жесткой связью между элементами. По видам конструкций различают кабели повивной скрутки, пучковой скрутки, кабели с профильным сердечником, а также ленточные кабели. Существуют многочисленные комбинации конструкций ВОК, которые в сочетании большим ассортиментом применяемых материалов позволяют выбрать исполнение кабеля, наилучшим образом удовлетворяющее всем условиям проекта, в том числе - стоимостным.

Особый класс образуют кабели, встроенные в грозотрос. Отдельно рассмотрим способы сращивания строительных длин кабелей. Сращивание строительных длин оптических кабелей производится с использованием кабельных муфт специальной конструкции. Эти муфты имеют два или более кабельных ввода, приспособления для крепления силовых элементов кабелей и одну или несколько сплайс-пластин. Сплайс-пластина - это конструкция для укладки и закрепления сращиваемых волокон разных кабелей.

6.6 Строительство и наладка ВОЛС.

ВОЛС внутри одного здания. В этом случае для связи применяется двухволоконный ОК (типа " Лапша"), который при необходимости может быть проложен в трубке под полом или вдоль стен в декоративных коробах. Все работы могут быть произведены самим заказчиком, если поставляемый кабель будет оконцован соответствующими коннекторами. ВОЛС между зданиями строится с прокладкой ВОК либо по колодцам кабельных коммуникаций, либо путем подвеса ВОК между опорами. В этом случае необходимо обеспечить сопряжение толстого многоволоконного кабеля с оптическими трансиверами. Для этого используют кабельные муфты, в которых производится разделка концов ВОК, идентификация волокон и оконцевание волокон коннекторами, соответствующими выбранным трансиверам. Эту работу можно выполнить несколькими способами.

Возможны и другие способы стыковки ВОК с оптическими трансиверами. У каждого способа есть свои достоинства и недостатки. В практике специалистов фирмы "ВИМКОМ ОПТИК" получил распространение третий способ, так как он экономичен, надежен, обеспечивает малые вносимые оптические потери за счет применения розеток и коннекторов с керамическими элементами, а также удобен для пользователей. Особо следует сказать о необходимости оптического кросс-коннектора. Он предназначен для установки на стене или любой вертикальной поверхности. Оптические кроссы фирмы

АМП могут иметь емкость от 6 до 64 портов типа SC, FC или ST. Возможна комбинация портов различных типов внутри кросса.

Многоразовый механический соединитель оптических волокон КОРЛИНК (Corelink) предназначен для оперативного ремонта волоконно-оптических линий; для сращивания оптического кабеля, как в стационарных, так и в полевых условиях; для тестирования оптического волокна. КОРЛИНК используется для механического сращивания одномодовых и многомодовых волокон диаметром 125 мкм. Он позволяет многократно соединять оптические волокна с минимальными затратами и за минимальное время. КОРЛИНК может быть использован для соединения волокон с диаметром буферного покрытия 250 мкм и 900 мкм в любых сочетаниях. Прозрачный корпус позволяет визуально контролировать процесс монтажа. Кроме того, есть возможность более точной ориентации волокон для уменьшения потерь. Основные достоинства это простая и экономичная технология монтажа; малые габариты; быстрое и надежное соединение одномодовых и многомодовых волокон; многократное использование; малые потери. Вносимое затухание < 0,1dB Обратное отражение -55dB Рабочая температура -40 до 80° С

Габаритные размеры 51x7,6x3,3mm

Количество повторных циклов соединения не менее 10 Среднее время монтажа 30 секунд.

Для быстрого соединения волокон сейчас используются специально разработанные фирмой 3М механические "сплайсы" (splice). Это пластиковые устройства размерами 40x7x4 мм, состоящие из двух частей: корпуса и крышки. Внутри корпуса находится специальный желоб, в который с разных сторон вставляются соединяемые волокна. Затем надевается крышка, являющаяся одновременно замком. Особая конструкция "сплайса" надежно центрирует волокна. Получается герметичное и качественное соединение волокон с потерями на стыке ~ 0.1 dB. Такие "сплайсы" особенно удобны при быстром восстановлении повреждений ВОЛС. Время на соединение двух волокон не превышает 30 секунд после того как волокна подготовлены (снято защитное покрытие, сделан строго перпендикулярный скол). Монтаж ведется без применения клея и специального оборудования, что очень удобно при работе в труднодоступном месте (например, в кабельном колодце).

За последние годы разработано несколько способов сращивания оптических волокон. Универсальным считается способ сращивания волокон путем сварки на специальном аппарате. Такие аппараты производят фирмы: ВІСС(Великобритания), Ericsson (Швеция), Fujikura, Sumitomo(Япония). Высокая стоимость сварочных аппаратов стала причиной создания альтернативных технологий сращивания оптических волокон. Монтаж оптических линий связи фирма "ВИМКОМ ОПТИК" проводит с помощью сварочного аппарата фирмы "Sumitomo" type 35 SE. Этот аппарат позволяет сваривать любые типы волокон в ручном и автоматическом режиме, тестирует волокно перед сваркой, устанавливает оптимальные параметр работы, оценивает качество поверхностей волокон перед сваркой, измеряет потери в месте соединений волокон и, если это необходимо, дает команду повторить сварку.

Кроме этого аппарат защищает место сварки специальной гильзой и проверяет на прочность сварное соединение. Аппарат позволяет сваривать одномодовые и многомодовые волокна с потерями 0.01dB, что является превосходным результатом. В аппаратах других конструкций, например ВСС, волокно изгибается, и в месте изгиба свариваемого волокна водится излучение лазера, которое регистрируется в месте изгиба второго свариваемого волокна фотоприемником. При таком способе измерений волокно подвергается чрезмерной деформации изгиба, что может привести к образованию трещин на этом участке волокна. Sumitomo проводит измерения неразрушающим способом на основе обработки видеoinформации по специально разработанным алгоритмам.

Для некоторых специальных применений оптические волокна выпускаются с особым покрытием оболочки или со сложным профилем показателя преломления на границе "жила-оболочка". В такие волокна очень трудно ввести зондирующее излучение в области изгиба. Для аппаратов Sumitomo работа со специальными волокнами не вызывает затруднений. Подобные аппараты довольно дороги, но мы работаем именно на таких аппаратах. Этим достигаются две цели: 1) высокое качество сварки, 2) высокая скорость работ, что немаловажно при выполнении ответственных заказов (срочная ликвидация аварии на магистральной линии связи).

В процессе монтажа ВОЛС осуществляется тестирование линии с помощью оптического рефлектометра. Модель 7920 Helios – это современный оптический рефлектометр, основанный на принципе открытой архитектуры. Прибор имеет промежуточные размеры между мини- и большими рефлектометрами, имеет встроенный дисковод 3,5" (формата MS-DOS) для хранения и последующей обработки результатов измерений, встроенный принтер, электролюминесцентный дисплей. Helios предназначен для работы, как в полевых, так и в лабораторных условиях на всех видах волоконно-оптических трасс. Helios обладает повышенным быстродействием и позволяет проводить все необходимые измерения при максимальном динамическом диапазоне менее чем за 1 минуту. Он автоматически подбирает параметры измерений

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеева Н.Д., Лифанов В.Н. Электротехническое материаловедение. /Учебное пособие. - Владивосток, 1996.-76 с.
2. Агеева Н.Д., Лифанов В.Н. Электротехническое материаловедение. /Метод. указ. к лабораторным работам. - Владивосток: ДВГТУ, 1995. – 40 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: /Учебник для вузов. –Л.: Энергоатомиздат, 1985. -304 с.
4. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т./Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - М.: Энергия. Т.1 -1986. - 368 с.; Т.2 - 1987. - 464 с.; Т.3 - 1988. -768 с.
5. Казарновский Д.М., Тареев Б.М.. Испытание электроизоляционных материалов. - Л.: Энергия, 1980. - 214 с.
6. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. - М.: Энергия, 1982. - 320 с.
7. Штофа Ян. Электротехнические материалы в вопросах и ответах /Перевод со словацкого. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 200 с.
8. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. Курс общей физики. — М.: Высшая школа, 1989г.
9. В. И. Иверонова и др. Физический практикум. — М.: Физико-математическая литература, 1962г.
10. В. С. Попов. Теоретическая электротехника. — М.: Энергоатомиздат, 1990г.
11. Т. И. Трофимова. Курс физики. — М.: Высшая школа, 1998г.
12. Д. Джанколи. Физика. Том II. — М.: Мир, 1989г.
13. Лифанов В.Н. Электрическое старение изоляции во время испытания ее повышенным напряжением полупериода 50 Гц. /В сб. Тр. конфер. ISEE –99 ,Изоляция – 99. – С.-Петербург.: С.-ПГТУ, 1999.
14. Лифанов В.Н., Лобанов М.П. Испытание изоляции крупных электрических машин повышенным напряжением /Деп. науч. работы – М.: ВИНТИ, 1988, № 1. N 936-эт.
15. Лифанов В.Н. Разрушающий метод испытания высоковольтной изоляции напряжением полупериода 50 Гц /Деп. науч. работы. – М.: ВИНТИ, 1988. № 2863-эн 77. Информэнерго.
16. Лифанов В.Н. Высоковольтное устройство для контроля качества изоляции //Внедрение мероприятий по снижению потерь и повышению устойчивости в энергетике Приморья /Прим. краев. упр. ВНТОЭ и Э. - Владивосток, 1988.
17. Александров Г.Н., Иванов В.Л. Изоляция электрических аппаратов. - Л.: ЭАИ, 1984.- 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. ДИЭЛЕКТРИКИ

1.1.	Общее положение	9
1.2.	Поляризация диэлектриков	10
1.3.	Диэлектрическая проницаемость	12
1.4.	Электропроводность диэлектриков	17
1.5.	Диэлектрические потери в диэлектриках	24
1.5.1.	Общие понятия	24
1.5.2.	Схема замещения диэлектрика	27
1.5.3.	Виды диэлектрических потерь	27
1.5.4.	Факторы, влияющие на диэлектрические потери	31
1.6.	Пробой диэлектриков	32
1.7.	Электрический пробой твердых диэлектриков	39
1.7.1.	Одно- и многокомпозиционные изоляционные конструкции	39
1.7.2.	Теории электрического пробоя	40
1.7.3.	Кратковременная и одноминутная электрическая прочность	42
1.7.4.	Факторы, влияющие на электрическую прочность диэлектрика	44
1.7.5.	Пробой твердых диэлектриков в эксплуатации	45
1.7.6.	Частичные разряды в изоляции	45
1.7.7.	Электрическое старение при длительном воздействии рабочего напряжения	47
	ГЛАВА 2. КОНТРОЛЬ ЗА КАЧЕСТВОМ ИЗОЛЯЦИИ	
2.1.	Качество изоляции	48
2.2.	Испытание изоляции повышенным напряжением	49
2.3.	Неразрушающий метод контроля изоляции	52

2.3.1.	Измерение сопротивления изоляции или сквозной проводимости	53
2.3.2.	Измерение угла диэлектрических потерь	53
2.3.3.	Измерение емкостных характеристик	54
2.3.4.	Измерение частичных разрядов	55
ГЛАВА 3. ПРОВОДНИКИ		
3.1.	Классификация проводников	56
3.2.	Электропроводность металлов	57
3.3.	ТермоЭДС проводников	60
3.4.	Материалы высокой проводимости	61
3.5.	Криопроводники и сверхпроводники	63
3.6.	Материалы высокого сопротивления	65
3.7.	Тензометры	68
3.8.	Контактные материалы	68
3.9.	Припои, флюсы, контактолы	71
3.10.	Неметаллические проводники	73
ГЛАВА 4. ПОЛУПРОВОДНИКИ		
4.1.	Терминология и основные понятия	73
4.2.	Зонная структура полупроводников	74
4.3.	Жидкие полупроводники	75
4.4.	Проводимость полупроводников	76
4.5.	Примесная проводимость	77
4.6.	Токи в полупроводниках	78
4.7.	Использование полупроводников	78
4.8.	Полупроводниковые диоды	79
4.9.	Характеристики идеального диода на основе p-n перехода	79
4.10.	Транзисторы	80
ГЛАВА 5. ФЕРРМАГНЕТИЗМ		
5.1.	Природа ферромагнетизма	82
5.2.	Доменная структура	83
5.3.	Структура ферромагнетиков	84
5.4.	Магнитострикционная деформация	85
5.5.	Магнитная проницаемость	86
3.6.	Потери в магнитных материалах	88
5.7.	Электрические свойства магнитных материалов	90
5.8.	Классификация магнитных материалов	92
ГЛАВА 6 ОПТИКОВОЛОКОННАЯ СВЯЗЬ		
6.1.	Особенности оптических систем связи	106
6.2.	Физические особенности	106
6.3.	Технические особенности	107
6.4.	Оптическое волокно	108
6.5.	Волоконно-оптический кабель	109
6.6.	Строительство и наладка ВОЛС	110
ЛИТЕРАТУРА		113