

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГУМАНИТАРНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»**

Дудов М.Х.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Методические указания к контрольной работе  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
заочной формы обучения

г. Черкесск, 2018 г.

Рассмотрено на заседании кафедры «Электроснабжение»

Протокол № от 20 г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом СевКавГГТА.

Протокол № от 20 г.

Рецензенты:

Эркенов Н.Х. – к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение»

Гурин А. В. – к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение»

Дудов М.Х. Электротехническое и конструкционное материаловедение:  
методические указания для контрольной работы студентов  
направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
всех форм обучения /Дудов М.Х. – Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2018. – 56 с.

В учебно-методическом пособии приведены необходимые теоретические сведения по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Представлены задания для контрольной работы студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

## Содержание

Введение	3
Раздел 1. Проводниковые и изоляционные материалы	
Тема 1.1. Виды и особенности химической связи	4
Тема 1.2. Свойства и особенности проводников	5
Тема 1.3. Материалы высокой проводимости	11
Раздел 2. Изоляционные материалы	
Тема 2.1. Виды поляризации диэлектриков	15
Тема 2.2. Диэлектрические потери	18
Тема 2.3. Электропроводность диэлектриков	22
Тема 2.4. Пробой диэлектриков	26
Тема 2.5. Тепловые свойства диэлектриков	27
Раздел 3. Полупроводниковые материалы	
Тема 3.1. Виды полупроводниковых материалов	35
Тема 3.2. Классификация полупроводников	36
Тема 3.3. Методы определения типа электропроводности	36
Тема 3.4. Управление электропроводностью полупроводников	37
Раздел 4. Магнитные материалы	
Тема 4.1. Виды магнитных материалов	39
Тема 4.2. Классификация магнетиков	40
Тема 4.3. Магнитная проницаемость	40
Тема 4.4. Ферромагнитные материалы	42
Тема 4.5. Потери на гистерезис	45
Примеры решения задач	49
Задания к контрольной работе	53
Рекомендуемая литература	55

## Введение

Целями освоения дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение» являются:

- формирование у студентов знаний и умений по применению различных электротехнических материалов в системах электроснабжения и в электротехническом оборудовании промышленных предприятий;

Задачи курса:

- познакомить обучающихся с разнообразными материалами, с возможностью применения их в электроэнергетике, требованиями к ним и основными характеристиками;
- научить принимать и обосновывать технические решения по применению различных электротехнических материалов;
- приобретение студентами прочных знаний и практических навыков в области, определяемой основной целью курса.

## Раздел 1. Проводниковые материалы

### Тема 1.1. Виды и особенности химической связи

Газы, жидкие и твердые тела состоят из атомов, молекул или ионов. Размеры атомов около 0,1 нм. В зависимости от строения внешних электронных оболочек атомов могут образовываться различные виды связи. Наиболее часто встречаются молекулы, в которых существуют ковалентные и ионные химические связи.

Ковалентная связь возникает при обобществлении электронов двумя соседними атомами. Молекулы, в которых центры одинаковых по величине положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются неполярными. Если же в отдельных молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга, то такие молекулы называются полярными или дипольными. Полярная молекула характеризуется дипольным моментом, который определяется произведением заряда и расстояния между центрами положительного и отрицательного зарядов.

Второй вид связи – ионная связь – определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами. Твердые тела ионной структуры характеризуются повышенной механической прочностью и относительно высокой температурой плавления. Типичными примерами ионных кристаллов являются галогениды щелочных металлов.

Третий вид связи – металлическая связь, которая приводит также к образованию твердых кристаллических тел. Металлы можно рассматривать как системы, построенные из расположенных в узлах решетки положительно заряженных ионов, находящихся в «газе» свободных электронов. Притяжение между положительными атомными остовами и электронами является причиной монолитности металла. Наличием свободных электронов объясняется высокая электропроводность и теплопроводность металла, что также является причиной блеска металлов. Ковкость металла объясняется перемещением и скольжением отдельных слоев атомных остовов.

Четвертый вид связи – молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса). Такая связь существует в некоторых веществах между молекулами с ковалентными внутримолекулярными связями. Межмолекулярное притяжение в этом случае обуславливается согласованным движением валентных электронов в соседних молекулах. В любой момент времени электроны максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительным зарядам. При этом силы притяжения валентных электронов положительно заряженными остовами соседних молекул оказываются сильнее сил взаимного отталкивания электронов внешних орбит. Связь Ван-дер-Ваальса наблюдается между молекулами некоторых веществ, например парафина, имеющих низкую температуру плавления, свидетельствующую о непрочности их кристаллической решетки.

Кристаллическая решетка – присущее кристаллическому состоянию вещества регулярное расположение частиц (атомов, ионов, молекул), характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях.

Причина образования каким-либо элементом или соединением данной пространственной решетки в основном зависит от размеров атома и электронной конфигурации его внешних оболочек.

Известно, что наиболее высоким как ближним (в пределах элементарной ячейки), так и дальним (на больших расстояниях) порядком расположения частиц отличаются химические соединения, находящиеся в твердом (кристаллическом) состоянии. Говорить о той или иной степени ближнего и дальнего порядка расположения частиц можно лишь для твердых растворов кристаллических веществ, а также стеклообразного состояния.

Упорядоченное и неупорядоченное состояние можно наблюдать и у высокомолекулярных – полимерных материалов. Практически полное отсутствие порядка в расположении частиц должно быть у аморфных тел.

В электротехнике широко применяются материалы как с упорядоченным, так и неупорядоченным строением.

«Дефекты» строения кристаллической решетки, определяющие особые физические свойства вещества, широко используются для получения самых различных материалов, которые применяются, в частности, в люминесцентной технике (кристаллофосфоры для осветительных целей, оптические преобразователи, светящиеся краски и др.)

К дефектам кристаллического твердого тела относятся любые нарушения периодичности электростатического поля кристаллической решетки: наличие посторонних примесей, механически напряженные участки, дополнительные кристаллографические плоскости (дислокации, трещины, поры) и т. д.

По своей природе перечисленные дефекты могут быть или тепловыми или «биографическими». Последние связаны с технологическим процессом получения данного материала.

## Тема 1.2. Свойства и особенности проводников

В качестве проводников электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы.

Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены металлы высокой проводимости, имеющие удельное сопротивление  $\rho$  при нормальной температуре не более 0,05 мкОм·м, и сплавы высокого сопротивления, имеющие  $\rho$  при нормальной температуре не менее 0,3 мкОм·м. Металлы высокой проводимости используются для проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов и т. п. Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. п.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Для большинства металлов температура плавления высока; только ртуть, имеющая температуру плавления около минус 39 °С, может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре. Другие металлы являются жидкими проводниками при повышенных температурах.

Механизм прохождения тока в металлах – как в твердом, так и в жидком состоянии – обусловлен движением (дрейфом) свободных электронов под воздействием электрического поля; поэтому металлы называют проводниками с электронной электропроводностью или проводниками первого рода. Проводниками второго рода, или электролитами, являются растворы (в частности, водные) кислот, щелочей и солей. Прохождение тока через эти вещества связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов в соответствии с законами Фарадея, вследствие чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза. Ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода. Примером могут служить соляные закалочные ванны с электронагревом.

Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, носящую название плазмы.

Классическая электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных (свободных) электронов. В свободное состояние от каждого атома металла переходит от одного до двух электронов. К электронному газу применялись представления и законы статистики обычных газов. При изучении хаотического (теплового) и направленного под действием силы электрического поля движения электронов был выведен закон Ома. При столкновениях электронов с узлами кристаллической решетки энергия, накопленная при ускорении электронов в электрическом поле, передается металлической основе проводника, вследствие чего он нагревается. Рассмотрение этого вопроса привело к выводу закона Джоуля–Ленца. Таким образом, электронная теория металлов дала возможность аналитически описать и объяснить найденные ранее экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах. Оказалось возможным также объяснить и связь между электропроводностью и теплопроводностью металлов. Кроме того, некоторые опыты подтвердили гипотезу об электронном газе в металлах, а именно:

1. При длительном пропускании электрического тока через цепь, состоящую из одних металлических проводников, не наблюдается проникновения атомов одного металла в другой.

2. При нагреве металлов до высоких температур скорость теплового движения свободных электронов увеличивается, и наиболее быстрые из них могут вылетать из металла, преодолевая силы поверхностного потенциального барьера.

3. В момент неожиданной остановки быстро двигавшегося проводника происходит смещение электронного газа по закону инерции в направлении движения. Смещение электронов приводит к появлению разности потенциалов на концах заторможенного проводника, и стрелка подключенного к ним измерительного прибора отклоняется по шкале.

4. Исследуя поведение металлических проводников в магнитном поле, установили, что вследствие искривления траектории электронов в металлической пластинке, помещенной в поперечное магнитное поле, появляется поперечная ЭДС и изменяется электрическое сопротивление проводника.

Однако выявились и противоречия некоторых выводов теории с опытными данными. Они состояли в расхождении температурной зависимости удельного сопротивления, наблюдаемой на опыте и вытекающей из положений теории; в несоответствии теоретически полученных значений теплоемкости металлов опытными данным. Наблюдаемая теплоемкость металлов меньше теоретической и такова, как будто электронный газ не поглощает теплоту при нагреве металлического проводника. Эти противоречия удалось преодолеть, рассматривая некоторые положения с позиций квантовой механики. В отличие от классической электронной теории в квантовой механике принимается, что электронный газ в металлах при обычных температурах находится в состоянии вырождения. В этом состоянии энергия электронного газа почти не зависит от температуры, т. е. тепловое движение почти не изменяет энергию электронов.

Поэтому на нагрев электронного газа теплота не затрачивается, что и обнаруживается при измерении теплоемкости металлов. В состоянии, аналогичное обычным газам, электронный газ приходит при температуре порядка тысяч градусов. Представляя металл как систему, в которой положительные ионы скрепляются посредством свободно движущихся электронов, легко понять природу всех основных свойств металлов: пластичности, ковкости, хорошей теплопроводности и высокой электропроводности.

К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов, относятся: 1) удельная проводимость  $\gamma$  или обратная ей величина – удельное сопротивление  $\rho$ , 2) температурный коэффициент удельного сопротивления  $\text{TK}_\rho$ , 3) коэффициент теплопроводности  $\gamma_T$ , 4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), 5) работа выхода электронов из металла, 6) предел прочности при растяжении  $\sigma_p$  и относительное удлинение перед разрывом  $\Delta/l$ .

Удельная проводимость и удельное сопротивление проводников. Связь плотности тока (в амперах на квадратный метр) и напряженности электрического поля (в вольтах на метр) в проводнике дается известной формулой:

$$J = \gamma E$$

(дифференциальная форма закона Ома); здесь  $\gamma$  (в сименсах на метр) параметр проводникового материала, называемый его удельной проводимостью, в соответствии с законом Ома у металлических проводников не зависит от напряженности электрического поля  $E$  при изменении последней в весьма широких пределах. Величина  $\rho = 1/\gamma$ , обратная удельной проводимости и называемая удельным сопротивлением, для имеющего сопротивление  $R$  проводника длиной  $l$  с постоянным поперечным сечением  $S$  вычисляется по формуле

$$\rho = RS/l.$$

Удельное сопротивление измеряется в омметрах. Для измерения  $\rho$  проводниковых материалов разрешается пользоваться внесистемной единицей  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ; очевидно, что проволока из материала длиной 1 м с поперечным сечением 1  $\text{мм}^2$  имеет сопротивление в Омах, численно равное  $\rho$  материала в  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ . Вместо единицы  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  предпочтительно применять равную ей по размеру единицу СИ  $\text{мкОм} \cdot \text{м}$ . Связь между названными единицами удельного сопротивления:

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

Диапазон значений удельного сопротивления  $\rho$  металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: от 0,016 для серебра и до примерно 10  $\text{мкОм} \cdot \text{м}$  для железохромоалюминиевых сплавов, т. е. он занимает всего три порядка. Удельная проводимость металлических проводников согласно классической теории металлов может быть выражена следующим образом:

$$\gamma = (e^2 n_0 \lambda) / (2m v_T),$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n_0$  – число свободных электронов в единице объема металла;  $\lambda$  – средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки;  $m$  – масса электрона;  $v_T$  – средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

Преобразование выражения на основе положений квантовой механики приводит к формуле

$$\gamma = K n_0^{2/3} \lambda,$$

где  $K$  – численный коэффициент; остальные обозначения – прежние.

Для различных металлов скорости хаотического теплового движения электронов  $v_T$  (при определенной температуре) примерно одинаковы. Незначительно различаются также и концентрации свободных электронов (например, для меди и никеля это различие меньше 10 %). Поэтому значение удельной проводимости (или удельного сопротивления) в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике, которая, в свою очередь, определяется структурой проводникового материала. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления; приме-

си, искажая решетку, приводят к увеличению  $\rho$ . К такому же выводу можно прийти, исходя из волновой природы электронов. Рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием около четверти длины электронной волны. Нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн. В металлическом проводнике, где длина волны электрона около 0,5 нм, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов, и, следовательно, приводит к росту  $\rho$  материала.

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов.

Число носителей заряда (концентрация свободных электронов) в металлическом проводнике при повышении температуры практически остается неизменным. Однако вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т. е. уменьшается средняя длина свободного пробега электрона, уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 1). Иными словами, температурный коэффициент удельного сопротивления металлов (кельвин в минус первой степени)

$$TK_{\rho} = \alpha_{\rho} = (1/\rho)(d\rho/dT)$$

положителен. Согласно выводам электронной теории металлов значения  $TK_{\rho}$  чистых металлов в твердом состоянии должны быть близки к температурному коэффициенту расширения идеальных газов, т. е.  $1/273 = 0,0037 \text{ K}^{-1}$  (повышенными значениями  $TK_{\rho}$  обладают некоторые металлы, в том числе ферромагнитные металлы – железо, никель и кобальт).

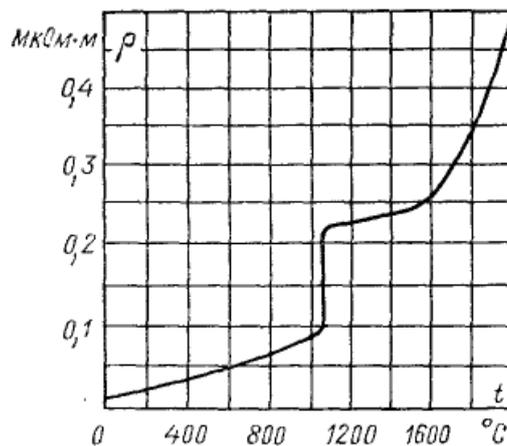


Рисунок 1 - Зависимость удельного сопротивления меди от температуры. Скачок соответствует температуре плавления меди 1083°C.

При изменении температуры в узких диапазонах на практике допустима кусочно-линейная аппроксимация зависимости  $\rho(T)$ ; в этом случае принимают, что

$$\rho_2 = \rho_1[1 + \alpha_{\rho}(T_2 - T_1)],$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления проводникового материала при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно;  $\alpha_{\rho}$  – так называемый средний темпера-

турный коэффициент удельного сопротивления данного материала в диапазоне температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

Теплопроводность металлов.

За передачу теплоты через металл в основном ответственны те же свободные электроны, которые определяют и электропроводность металлов и число которых в единице объема металла весьма велико. Поэтому, как правило, коэффициент теплопроводности  $\gamma_T$  металлов намного больше, чем коэффициент теплопроводности диэлектриков. Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше удельная электрическая проводимость у металла, тем больше должен быть и его коэффициент теплопроводности. Легко также видеть, что при повышении температуры, когда подвижность электронов в металле и соответственно его удельная проводимость уменьшаются, отношение коэффициента теплопроводности металла к его удельной проводимости  $\gamma_T/\gamma$  должно возрастать. Математически это выражается законом Видемана–Франца–Лоренца:

$$\gamma_T/\gamma = L_0 \cdot T,$$

где  $T$  – термодинамическая температура, К;  $L_0$  – число Лоренца, равное  $L_0 = \pi^2 k^2 / 3e^2$ .

Подставляя в формулу значения постоянной Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К и заряда электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, получаем  $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$  В<sup>2</sup>/К<sup>2</sup>.

Закон Видемана–Франца–Лоренца выполняется (в области температур, близких к нормальной или несколько повышенных) для большинства металлов (исключение составляют марганец и бериллий).

Термоэлектродвижущая сила.

При соприкосновении двух различных металлических проводников (или полупроводников) между ними возникает контактная разность потенциалов. Причина появления этой разности потенциалов заключается в различии значений работы выхода электронов из различных металлов, а также в том, что концентрация электронов, а следовательно, и давление электронного газа у разных металлов и сплавов могут быть неодинаковыми. Из электронной теории металлов следует, что контактная разность потенциалов между металлами А и В равна

$$U_{AB} = U_B - U_A + (kT/e) \cdot \ln(n_{0A}/n_{0B}),$$

где  $U_A$  и  $U_B$  – потенциалы соприкасающихся металлов;  $n_{0A}$  и  $n_{0B}$  – концентрации электронов в металлах А и В;  $k$  – постоянная Больцмана;  $e$  – абсолютная величина заряда электрона.

Если температуры «спаев» одинаковы, то сумма разности потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Иначе обстоит дело, когда один из спаев имеет температуру  $T_1$ , а другой – температуру  $T_2$  (рис. 2).

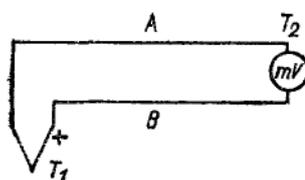


Рисунок 2 - Схема термопары.

В этом случае между спаями возникает термо-ЭДС, равная

$$U = U_{AB} - U_{BA} = U_B - U_A + (kT/e) \cdot \ln(n_{0A}/n_{0B}) + U_A - U_B + (kT/e) \cdot \ln(n_{0A}/n_{0B}) = \\ = (k/e)(T_1 - T_2) \cdot \ln(n_{0A}/n_{0B}),$$

что можно записать в виде

$$U = \psi(T_1 - T_2),$$

где  $\psi$  – постоянный для данной пары проводников коэффициент термо-ЭДС, т. е. термо-ЭДС пропорциональна разности температур спаев.

Провод, составленный из двух изолированных друг от друга проволок из различных металлов или сплавов (термопара), применяют для измерения температур. В термопарах используются проводники, имеющие большой и стабильный коэффициент термо-ЭДС. Наоборот, для обмоток измерительных приборов и резисторов стремятся применять проводниковые материалы и сплавы с возможно меньшим коэффициентом термо-ЭДС относительно меди, чтобы избежать появления в измерительных схемах паразитных термо-ЭДС, которые могли бы вызвать ошибки при точных измерениях.

### Тема 1.3. Материалы высокой проводимости

К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь и алюминий.

Медь. Преимущества меди, обеспечивающие ей широкое применение в качестве проводникового материала, следующие:

1) малое удельное сопротивление (из всех материалов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь);

2) достаточно высокая механическая прочность;

3) удовлетворительная в большинстве случаев стойкость по отношению к коррозии (медь окисляется на воздухе даже в условиях высокой влажности значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах;

4) хорошая обрабатываемость (медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра);

5) относительная легкость пайки и сварки.

Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом. Это важнейший представитель так называемых легких металлов (т. е. металлов с плотностью менее  $5 \text{ Мг/м}^3$ ); плотность литого алюминия около 2,6, а прокатанного –  $2,7 \text{ Мг/м}^3$ . Таким образом, алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди. Температурный коэффициент расширения, удельная теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем меди. Вследствие высоких значений удельной теплоемкости и теплоты плавления для нагрева алюминия до температуры плавления и перевода в расплавленное состояние требуется большая затрата теплоты, чем для нагрева и расплавления такого же количества меди, хотя температура плавления алюминия ниже, чем меди.

Алюминий обладает пониженными по сравнению с медью свойствами – как механическими, так и электрическими. При одинаковых сечении и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного, в  $0,028 : 0,0172 = 1,63$  раза. Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод такого же электрического сопротивления, как и медный, нужно взять его сечение в 1,63 раза большим.

Для электротехнических целей используют алюминий, содержащий не более 0,5 % примесей, марки А1. Еще более чистый алюминий марки АВ00 (не более 0,03 % примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, электродов и корпусов оксидных конденсаторов. Алюминий наивысшей чистоты АВ0000 имеет содержание примесей, не превышающее 0,004 %. Разные примеси в различной степени снижают удельную проводимость у алюминия. Добавки Ni, Si, Zn или Fe при содержании их 0,5 % снижают  $\gamma$  отожженного алюминия не более чем на 2 – 3 %. Более заметное действие оказывают примеси Cu, Ag и Mg, при том же массовом содержании снижающие  $\gamma$  алюминия на 5 – 10 %. Очень сильно снижают  $\gamma$  алюминия добавки Ti и Mn.

Алюминий весьма активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов и делает невозможной пайку алюминия обычными методами. Для пайки алюминия применяются специальные пасты-припой или используются ультразвуковые паяльники. В местах контакта алюминия и меди возможна гальваническая коррозия. Если область контакта подвергается действию влаги, то возникает местная гальваническая пара с довольно высоким значением ЭДС, причем полярность этой пары такова, что на внешней поверхности контакта ток идет от алюминия к меди и алюминиевый проводник может быть сильно разрушен коррозией. Поэтому места соединения медных проводников с алюминиевыми должны тщательно защищаться от увлажнения (покрытием лаками и тому подобными способами).

Иногда, например для замены свинца в защитных кабельных оболочках, используется алюминий с содержанием примесей не более 0,01 % (вместо 0,5 % для обычного проводникового алюминия). Такой особо чистый алюминий сравнительно с обычным более мягок и пластичен и притом обладает повышенной стойкостью по отношению к коррозии.

Сталеалюминиевый провод, широко применяемый в линиях электропередачи, представляют собой сердечник, свитый из стальных жил и обвитый снаружи алюминиевой проволокой. В проводах такого типа механическая прочность определяется главным образом стальным сердечником, а электрическая проводимость – алюминием. Увеличенный наружный диаметр сталеалюминиевого провода по сравнению с медным на линиях передачи высокого напряжения является преимуществом, так как уменьшается опасность возникновения короны вследствие снижения напряженности электрического по-

ля на поверхности провода. На рис. 3 приведены некоторые характеристики сталеалюминиевого провода марки АС.

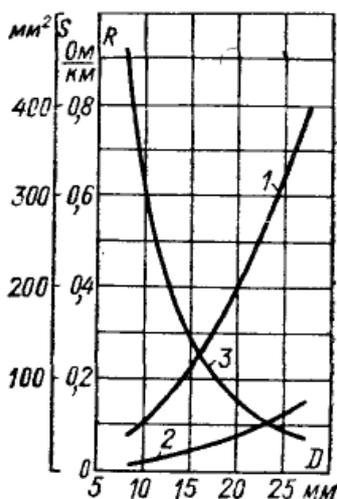


Рисунок 3 - Зависимость полного сечения сталеалюминиевого провода марки АС (кривая 1), сечения стального сердечника (кривая 2) и активного электрического сопротивления (при частоте 50 Гц) единицы длины провода (кривая 3) от внешнего диаметра провода  $D$ .

Железо (сталь) как наиболее дешевый и доступный металл, обладающий к тому же высокой механической прочностью, представляет большой интерес для использования в качестве проводникового материала. Однако даже чистое железо имеет значительно более высокое сравнительно с медью и алюминием удельное сопротивление (около  $0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ); значение  $\rho$  стали, т. е. железа с примесью углерода и других элементов, еще выше.

При переменном токе в стали как в ферромагнитном материале заметно сказывается поверхностный эффект, поэтому в соответствии с известными законами электротехники активное сопротивление стальных проводников переменному току выше, чем постоянному току. Кроме того, при переменном токе в стальных проводниках появляются потери мощности на гистерезис. В качестве проводникового материала обычно применяется мягкая сталь с содержанием углерода  $0,10 - 0,15 \%$ , имеющая предел прочности при растяжении  $\sigma_p = 700 - 750 \text{ МПа}$ , относительное удлинение перед разрывом  $\Delta l/l = 5 - 8 \%$  и удельную проводимость  $\gamma$ , в  $6 - 7$  раз меньшую по сравнению с медью. Такую сталь используют в качестве материала для проводов воздушных линий при передаче небольших мощностей. В подобных случаях применение стали может оказаться достаточно выгодным, так как при малой силе тока сечение провода определяется не электрическим сопротивлением, а его механической прочностью.

Сталь как проводниковый материал используется также в виде шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог и пр. Для сердечников сталеалюминиевых проводов воздушных линий электропередачи применяется особо прочная стальная проволока, имеющая  $\sigma_p = 1200 - 1500 \text{ МПа}$  и  $\Delta l/l = 4 - 5 \%$ . Обычная сталь обладает малой стойкостью к коррозии: даже при нормальной температуре, особенно в условиях повышенной влажности, она

быстро ржавеет; при повышении температуры скорость коррозии резко возрастает. Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более стойкого материала. Обычно для этой цели применяют покрытие цинком. Непрерывность слоя цинка проверяется опусканием образца провода в 20 %-ный раствор медного купороса; при этом на обнаженной стали в местах дефектов оцинковки откладывается медь в виде красных пятен, заметных на общем сероватом фоне оцинкованной поверхности провода. Железо имеет высокий температурный коэффициент удельного сопротивления. Поэтому тонкую железную проволоку, помещенную для защиты от окисления в баллон, заполненный водородом или иным химически неактивным газом, можно применять в бареттерах, т. е. в приборах, использующих зависимость сопротивления от силы тока, нагревающего помещенную в них проволоку, для поддержания постоянства силы тока при колебаниях напряжения.

Контрольные вопросы:

1. Что такое ковалентная связь?
2. Чем объясняется высокая электропроводность и теплопроводность металлов?
3. Какие материалы относятся к классу проводников?
4. Чем обусловлена высокая электропроводность проводников?
5. Как можно классифицировать проводники?
6. Что такое температурный коэффициент удельного сопротивления?

Задания:

1. Объясните природу связи Ван-дер-Ваальса.
2. Что такое дефекты кристаллической решетки?
3. Какие факторы и почему влияют на удельное электрическое сопротивление?
4. Что такое термо-э.д.с., в чем причина ее возникновения?
5. Для каких материалов и почему важно учитывать линейное расширение при нагревании?
6. Какие факторы и почему влияют на удельное электрическое сопротивление?

## Раздел 2. Изоляционные материалы

### Тема 2.1. Виды поляризации диэлектриков

Существуют два основных вида поляризации диэлектриков:

поляризация под воздействием электрического поля практически мгновенная, вполне упругая, без рассеяния энергии, т. е. без выделения теплоты;

поляризация, совершаемая не мгновенно, а нарастающая и убывающая замедленно и сопровождаемая рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. его нагреванием. Такой вид поляризации называют релаксационной поляризацией.

К первому виду поляризации относятся электронная и ионная, остальные механизмы принадлежат к релаксационной поляризации. Особым механизмом поляризации является резонансная, наблюдаемая в диэлектриках при весьма высоких частотах.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около  $10^{-15}$  с). Диэлектрическая проницаемость вещества с чисто электронной поляризацией численно равна квадрату показателя преломления света  $n$ . Изменение диэлектрической проницаемости диэлектрика с электронной поляризацией при изменении температуры обуславливается лишь изменением его плотности. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерей энергии.

Ионная поляризация характерна для твердых тел с ионным строением и обуславливается смещением упруго-связанных ионов. С повышением температуры она усиливается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении.

Время установления ионной поляризации около  $10^{-13}$  с.

Дипольно-релаксационная поляризация для краткости называется дипольной, отличается от электронной и ионной тем, что она связана с тепловым движением частиц. Дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации.

Дипольная поляризация возможна, если молекулярные силы не препятствуют диполям ориентироваться вдоль поля. С увеличением температуры молекулярные силы ослабевают, вязкость вещества понижается, что должно усиливать дипольную поляризацию, однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому с увеличением температуры дипольная поляризация сначала возрастает (пока ослабление молекулярных сил сказывается сильнее, чем возрастание хаотического теплового движения), а затем, когда хаотическое движение становится интенсивнее, дипольная поляризация с ростом температуры начинает падать.

Поворот диполей в направлении поля в вязкой среде требует преодоления некоторого сопротивления, а потому дипольная поляризация связана с потерями энергии. В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что в быстропеременных полях диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и дипольная поляризация при повышенных частотах приложенного напряжения может полностью исчезать.

Промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полей диполей после его снятия уменьшится вследствие теплового движения в 2,7 раза по сравнению с первоначальным значением, называют временем релаксации.

Дипольная поляризация свойственна полярным газам и жидкостям. Этот вид поляризации может наблюдаться также и в твердых полярных органических веществах, но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже не поворотом самой молекулы, а поворотом имеющихся в ней радикалов по отношению к молекуле. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильной группы ОН.

В кристаллах с молекулярной решеткой и слабыми Ван-дер-Ваальсовыми связями возможна ориентация и более крупных частиц.

Ионно-релаксационная поляризация наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых ионных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов. В этом случае слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотического теплового движения смещаются в направлении поля.

После снятия электрического поля ионно-релаксационная поляризация постепенно ослабевает по экспоненциальному закону, а с повышением температуры – заметно усиливается.

Электронно-релаксационная поляризация отличается от электронной и ионной и возникает вследствие возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок.

Электронно-релаксационная поляризация характерна для диэлектриков с высоким показателем преломления, большим внутренним полем и электронной электропроводностью; например, диоксид титана, некоторые соединения на основе оксидов металлов переменной валентности – титана, ниобия, висмута.

Следует отметить высокое значение диэлектрической проницаемости, которое может быть при электронно-релаксационной поляризации, а также наличие максимума в температурной зависимости  $\epsilon_r$ .

Миграционная поляризация понимается как дополнительный механизм поляризации, проявляющийся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. Эта поляризация проявляется при низких частотах и связана со значительным рассеянием электрической энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т. д.

При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, образуя большие поляризованные области. В слоистых материалах на границах раздела слоев и в приэлектродных слоях может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов.

В веществах с самопроизвольной поляризацией имеются отдельные области (домены), обладающие электрическим моментом в отсутствие внешнего поля. Однако при этом ориентация электрических моментов в разных доменах различна. Наложение внешнего поля способствует преимущественной ориентации электрических моментов доменов в направлении поля, что дает эффект очень сильной поляризации. В отличие от других видов поляризации при некотором значении напряженности внешнего поля наступает насыщение, и дальнейшее усиление поля уже не вызывает возрастания интенсивности поляризации. Поэтому диэлектрическая проницаемость при спонтанной поляризации зависит от напряженности электрического поля. В температурной зависимости  $\epsilon_r$  наблюдается один или несколько максимумов. В переменных электрических полях материалы с самопроизвольной поляризацией характеризуются значительным рассеянием энергии, т. е. выделением теплоты.

Все диэлектрики по виду подразделяются на несколько групп.

К первой группе можно отнести диэлектрики, обладающие в основном только электронной поляризацией, например неполярные и слабополярные твердые вещества в кристаллическом и аморфном состояниях (парафин, сера, полистирол), а также неполярные и слабополярные жидкости и газы (бензол, водород и др.).

Ко второй группе относятся диэлектрики, обладающие одновременно электронной и дипольно-релаксационной поляризациями.

Сюда принадлежат полярные (дипольные) органические, полужидкие и твердые вещества (масляно-канифольные компаунды, эпоксидные смолы, целлюлоза, некоторые хлорированные углеводороды и т. п.)

Третью группу составляют твердые неорганические диэлектрики с электронной, ионной и ионно-электронно-релаксационной поляризациями. В этой группе целесообразно выделить две подгруппы материалов ввиду существенного различия их электрических характеристик:

диэлектрики с электронной и ионной поляризациями;

диэлектрики с электронной, ионной и релаксационными поляризациями.

К первой подгруппе преимущественно относятся кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов (кварц, слюда, каменная соль, корунд, рутил). Ко второй подгруппе принадлежат неорганические стекла, материалы, содержащие стекловидную фазу (фарфор, микалекс), и кристаллические диэлектрики с неплотной упаковкой частиц в решетке.

Четвертую группу составляют сегнетоэлектрики, характеризующиеся спонтанной, электронной, ионной и электронно-ионно-релаксационной поляризациями (сегнетова соль, титанат бария и др.)

Под влиянием электрического поля связанные электрические заряды диэлектрика смещаются в направлении действующих на них сил и тем больше, чем выше напряженность поля. При снятии электрического поля заряды возвращаются в прежнее состояние. В полярных диэлектриках, содержащих дипольные молекулы, воздействие электрического поля вызывает еще и ориентацию диполей в направлении поля; при отсутствии поля диполи дезориентируются вследствие теплового движения.

Большинство диэлектриков характеризуется линейной зависимостью электрического смещения от напряженности электрического поля, созданного в диэлектрике. Особую группу составляют диэлектрики, в которых с изменением напряженности поля смещение меняется нелинейно, обнаруживая насыщение при некотором значении напряженности поля. Такие диэлектрики называются сегнетоэлектриками.

Наименование «сегнетоэлектрик» связано с тем, что нелинейность поляризации впервые была обнаружена у сегнетовой соли.

Любой диэлектрик с нанесенными на него электродами, включенный в электрическую цепь, может рассматриваться как конденсатор определенной емкости.

Заряд конденсатора, как известно, равен

$$Q = CU,$$

где  $C$  – емкость конденсатора;  $U$  – приложенное напряжение.

Заряд  $Q$  при заданном значении приложенного напряжения складывается из заряда  $Q_0$ , который присутствовал бы на электродах, если бы их разделял вакуум, и заряда  $Q_d$ , который обусловлен поляризацией диэлектрика, фактически разделяющего электроды:

$$Q = Q_0 + Q_d.$$

Одной из важнейших характеристик диэлектрика является его относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$ . Эта величина представляет собой отношение заряда  $Q$ , полученного при некотором напряжении на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду  $Q_0$ , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум:

$$\epsilon_r = Q/Q_0 = (Q_0 + Q_d)/Q_0 = 1 + Q_d/Q_0.$$

Из выражения следует, что относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества больше единицы и равна единице только для вакуума.

## Тема 2.2. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материале обнаруживается сквозной ток, обусловленный проводимостью.

При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество материала характеризуется, как указывалось выше, значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозного тока, возникают дополнительные причины, вызывающие потери в диэлектрике.

Диэлектрические потери в электроизоляционном материале можно характеризовать рассеиваемой мощностью, отнесенной к единице объема, или удельными потерями; чаще для оценки способности диэлектрика рассеивать мощность в электрическом поле пользуются углом диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол, дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига  $\varphi$  между током и напряжением в емкостной цепи. Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на  $90^\circ$ , при этом угол диэлектрических потерь  $\delta$  будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига и тем больше угол  $\delta$  и  $\operatorname{tg} \delta$ .

Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Даже если напряжение, приложенное к диэлектрику, недостаточно велико для того, чтобы за счет диэлектрических потерь мог произойти недопустимый перегрев, то и в этом случае большие диэлектрические потери могут принести существенный вред, увеличивая, например, активное сопротивление колебательного контура, в котором использован данный диэлектрик.

Природа диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах различна в зависимости от агрегатного состояния вещества. Диэлектрические потери могут обуславливаться сквозным током или, как указывалось при рассмотрении явления поляризации, активными составляющими токов смещения. При изучении диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно характеризовать это явление поляризации кривыми, представляющими зависимость электрического заряда на электродах конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения (рис. 4). При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения (рис. 4, а) и такой диэлектрик называется линейным. Если в линейном диэлектрике наблюдается замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает вид эллипса (рис. 4, б). Площадь этого эллипса пропорциональна количеству энергии, которая поглощается диэлектриком за один период изменения напряжения.

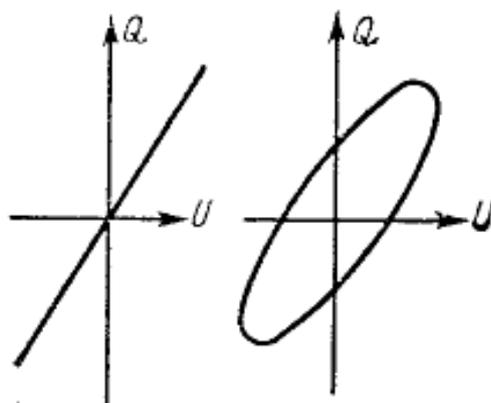


Рисунок 4 - Зависимость заряда от напряжения для линейного диэлектрика без потерь (а), с потерями (б).

В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь от сквозной электропроводности и потерь от замедленной поляризации, возникают диэлектрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызваны наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, оксидов железа; они значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале.

При высоких напряжениях потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектрика, особенно интенсивно происходящей при высоких частотах.

Выражение для мощности, рассеиваемой в диэлектрике:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

где  $P_a$  – активная мощность, Вт;  $U$  – напряжение, В;  $\omega$  – угловая частота;  $C$  – емкость, Ф.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационной поляризацией: в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери обусловлены нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля.

В температурной зависимости тангенса угла релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества. При этой температуре время релаксации частиц диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного переменного электрического поля. Если температура такова, что время ре-

лаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения, то тепловое движение частиц будет менее интенсивным, и потери уменьшатся; если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полупериода изменения напряжения, то интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

Диэлектрические потери, наблюдаемые в сегнетоэлектриках, связаны с явлением спонтанной поляризации. Поэтому потери в сегнетоэлектриках значительны при температурах ниже точки Кюри, когда наблюдается спонтанная поляризация. При температурах выше точки Кюри потери в сегнетоэлектриках уменьшаются. Электрическое старение сегнетоэлектрика со временем сопровождается некоторым уменьшением потерь.

К диэлектрическим потерям, обусловленным поляризацией, следует отнести также так называемые резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при высоких частотах. Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля.

Резонансные потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура не влияет на положение максимума.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную проводимость. Тангенс угла диэлектрических потерь в этом случае можно вычислить по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon_r f \rho}.$$

Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты поля;  $\operatorname{tg} \delta$  уменьшается с частотой по гиперболическому закону.

Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с температурой по экспоненциальному закону:

$$P_{aT} = A \exp(-b/T),$$

где  $A, b$  – постоянные материала.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации данного газа. Ионизационные потери можно вычислить по формуле

$$P_{a.u} = A_1 f (U - U_u)^2,$$

где  $A_1$  – постоянный коэффициент;  $f$  – частота поля;  $U$  – приложенное напряжение;  $U_u$  – напряжение, соответствующее началу ионизации.

Формула справедлива при  $U > U_{и}$  и линейной зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от  $E$ . Ионизационное напряжение зависит от давления, при котором находится газ, поскольку развитие ударной ионизации молекул связано с длиной свободного пробега носителей заряда.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в миканитах, микалексе и т. д.

Ввиду разнообразия структуры неоднородных диэлектриков и особенностей содержащихся в них компонентов не существует общей формулы расчета диэлектрических потерь этого вида.

### Тема 2.3. Электропроводность диэлектриков

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления равновесного состояния протекают во времени, создавая токи смещения в диэлектриках. Токи смещения упругосвязанных зарядов при электронной и ионной поляризациях столь кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических диэлектриков, называют абсорбционными токами. При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они протекают в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению сквозных токов. Ток утечки в техническом диэлектрике представляет собой сумму сквозного тока и тока абсорбции. Для плотностей токов можно записать

$$J_{ум} = J_{ск} + J_{аб}.$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения  $D$ :

$$J_{см} = \frac{\partial D}{\partial \tau} \approx J_{аб},$$

обусловленного мгновенными (электронными, ионными) и замедленными смещениями зарядов.

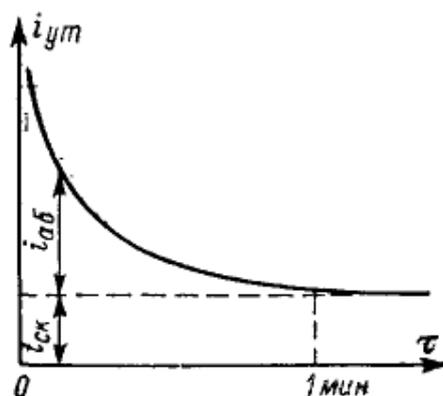


Рисунок 5 - Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени.

Как видно из рис. 5, после завершения процессов поляризации через диэлектрик протекает только сквозной ток. Токи смещения необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков ввиду того, что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только сквозной ток, но и сопровождающий его ток абсорбции, вследствие чего может создаться неправильное представление о большой проводимости. Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току, сопровождающемуся выделением тепла и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только сквозным током, но и активными составляющими абсорбционных токов.

Поскольку при определении абсорбционных токов даже замедленных видов поляризации возникают некоторые трудности, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на ток, измеренный через одну минуту после включения напряжения и принимаемый за сквозной ток.

Для твердых электроизоляционных материалов необходимо различать объемную и поверхностную проводимость.

Для плоского образца материала в однородном поле удельное объемное сопротивление (Ом·метр) рассчитывается по формуле

$$\rho = RS/h,$$

где  $R$  – объемное сопротивление образца, Ом,  $S$  – площадь электрода, м<sup>2</sup>;  $h$  – толщина образца, м.

Удельное поверхностное сопротивление равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через квадрат, от одной его стороны к противоположной.

Удельное поверхностное сопротивление (в Омах) рассчитывается по формуле

$$\rho_s = R_s d/l,$$

где  $R_s$  – поверхностное сопротивление образца материала, Ом, между параллельно поставленными электродами шириной  $d$ , отстоящими друг от друга на расстояние  $l$ .

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению изоляции, складывается из объемной и поверхностной проводимостей.

Электропроводность изоляционных материалов обуславливается состоянием вещества: газообразным, жидким или твердым, а также зависит от влажности и температуры окружающей среды. Некоторое влияние на проводимость диэлектриков оказывает также напряженность поля в образце, при которой проводится измерение.

При длительной работе под напряжением ток через твердые и жидкие диэлектрики с течением времени может уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение тока со временем говорит о том, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшалась за счет электрической очистки образца. Увеличение тока со временем говорит об участии в нем зарядов, являющихся структурными элементами самого материала, и о протекающем в нем под напряжением необратимом процессе старения, способном постепенно привести к разрушению – пробоем диэлектрика.

Произведение сопротивления изоляции диэлектрика конденсатора и его емкости принято называть постоянной времени саморазряда конденсатора:

$$\tau_0 = R_{из} C$$

Таким образом, определив постоянную времени как время, по истечении которого напряжение на выводах конденсатора уменьшится вследствие саморазряда в  $e = 2,7$  раза, зная вид материала (а следовательно, и его диэлектрическую проницаемость) и предполагая наличие только объемного тока утечки, можно оценить удельное сопротивление использованного диэлектрика.

Поверхностная электропроводность обусловлена присутствием влаги или загрязнений на поверхности диэлектрика. Вода отличается значительной удельной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы была обнаружена заметная проводимость, определяемая в основном толщиной этого слоя. Однако, поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностную электропроводность обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика.

Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому относительная влажность является важнейшим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Особенно резкое уменьшение удельного поверхностного сопротивления наблюдается при относительной влажности, превышающей 70–80 %.

Удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем меньше полярность вещества, чем чище поверхность диэлектрика и чем лучше она отполирована. Наиболее высокими значениями удельного поверхностного сопротивления обладают неполярные диэлектрики, поверхность которых не сма-

чивается водой. Особенно резкое понижение удельного поверхностного сопротивления можно наблюдать у полярных диэлектриков, частично растворимых в воде, у которых на поверхности образуется пленка электролита. Кроме того, к поверхности полярных диэлектриков легко прилипают различные загрязнения.

Низкие значения удельного поверхностного сопротивления имеют и объемно-пористые материалы, так как процесс поглощения влаги толщиной материала стимулирует также и образование поверхностных пленок воды.

Удельное поверхностное сопротивление церезина, являющегося неполярным диэлектриком, существенно выше по сравнению с  $\rho_s$  щелочного стекла и фенопласта и не зависит от влажности окружающей среды (рис. 6).

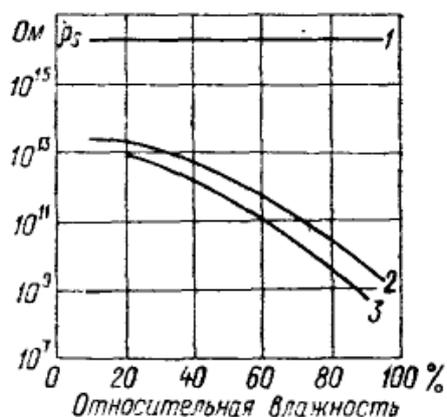


Рисунок 6 - Зависимость удельного поверхностного сопротивления от относительной влажности для различных диэлектриков: 1 – церезин; 2 – щелочное стекло; 3 – фенопласт.

Загрязнение поверхности некоторых диэлектриков уменьшает их удельное поверхностное сопротивление.

Стремясь повысить удельное поверхностное сопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности: промывку (водой, растворителями), прокаливание при температуре 600–700°C.

Наиболее эффективной является очистка поверхности изделия, не впитывающего воду, продолжительным кипячением в дистиллированной воде. Пропитка поверхностных слоев детали церезином не обеспечивает достаточной устойчивости значений  $\rho_s$  при высокой влажности ввиду возможности проникновения влаги в микропоры поверхности изделия сквозь защитные покрытия. Покрытие керамики и стекол кремнийорганическими лаками значительно повышает удельное поверхностное сопротивление изделий во влажной среде. В итоге можно сделать следующие выводы. Зависимость удельной поверхностной проводимости от влажности обуславливается наличием на поверхности диэлектрика диссоциирующих на ионы веществ, вода, адсорбируемая поверхностью, способствует их выявлению. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то путем их удаления можно получать высокие значения удельного поверхностного сопротивления при любой влажности воздуха. Если вещества, диссоциирующие на ионы,

являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

#### Тема 2.4. Пробой диэлектриков

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектрика или нарушения его электрической прочности. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – электрической прочностью диэлектрика.

Пробивное напряжение обозначается  $U_{пр}$  и измеряется чаще всего в киловольтах. Электрическая прочность определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр} = U_{пр}/h,$$

где  $h$  – толщина диэлектрика.

Удобные для практических целей численные значения электрической прочности диэлектриков получаются, если пробивное напряжение выражать в киловольтах, а толщину диэлектрика – в миллиметрах. Тогда электрическая прочность будет в киловольтах на миллиметр. Для сохранения численных значений и перехода к единицам системы СИ можно пользоваться единицей МВ/м:

$$1 \text{ МВ/м} = 1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м}.$$

Пробой газа обуславливается явлением ударной и фотонной ионизации. Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов. Одним из главнейших факторов, способствующих пробоем жидкостей, является наличие в них посторонних примесей. Пробой твердых тел может вызываться как электрическим, так и тепловым процессами, возникающими под действием поля.

Явление электрического пробоя связано с электронными процессами в диэлектрике, возникающими в сильном электрическом поле и приводящими к внезапному резкому местному возрастанию плотности электрического тока к моменту пробоя.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле, что приводит к росту активного тока и дальнейшему увеличению нагрева диэлектрика вплоть до его термического разрушения.

При длительном действии напряжения пробой может быть вызван электрохимическими процессами, происходящими в диэлектрике под воздействием электрического поля.

Таблица 1 Электрическая прочность некоторых твердых диэлектриков в однородном поле при частоте 50 Гц.

Материал	$E_{пр}$ , МВ/м	Особенности структуры
Стекло	100 – 300	Однородные плотные диэлектрики и слоистые, если силовые линии поля перпендикулярны слоям
Каменная соль	100 – 150	
Слюда	100 – 200	
Пропитанная бумага	100 – 300	
Органические плёнки (полистирол, фторопласт)	100 – 200	
Керамика	10 – 30	Неоднородные по структуре диэлектрики с закрытыми или сообщающимися между собой капиллярами
Микалекс	10 – 15	
Пластические массы с наполнителем (фенолформальдегидные, аминопласты)	8 - 15	
Пористая керамика	3 – 5	Диэлектрики с открытыми крупными порами
Дерево	4 – 5	
Непропитанная кабельная бумага	3 – 7	

## Тема 2.5. Тепловые свойства диэлектриков

К важнейшим тепловым свойствам диэлектриков относятся нагревостойкость, холодостойкость, теплопроводность и тепловое расширение.

**Нагревостойкость.** Способность диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения его свойств. В зависимости от значений допустимых в эксплуатации температур диэлектрики различают по классам нагревостойкости. Нагревостойкость неорганических диэлектриков определяют, как правило, по началу существенного изменения электрических свойств, например, по заметному росту  $\operatorname{tg} \delta$  или снижению удельного электрического сопротивления. Нагревостойкость оценивают соответствующими значениями температуры, при которой появились эти изменения. Нагревостойкость органических диэлектриков часто определяют по началу механических деформаций растяжения или изгиба, погружению иглы в материал под давлением при нагреве. Однако и для них возможно определение нагревостойкости по электрическим характеристикам.

В качестве примера давно существующего способа оценки нагревостойкости электроизоляционных материалов можно отметить способ Мартенса. По этому способу нагревостойкость синтетических веществ органического происхождения (пластмасс) характеризуют таким значением температуры, при котором изгибающее напряжение, равное 5 МПа, вызывает заметную деформацию испытуемого образца. При этом скорость повышения температуры должна составлять около 1 К/мин. Как видим, метод Мартенса является условным методом определения кратковременной нагревостойкости по изменению механических свойств материала.

Существуют другие способы оценки температуры размягчения электроизоляционных материалов, например способ кольца и шара. Испытуемый материал (битум или другие подобные ему пластичные легкоплавкие вещества) заливают в металлическое кольцо и помещают на него стальной шарик определенного диаметра; отмечается температура, при которой испытуемый материал настолько размягчается, что шарик может его продавить и пройти сквозь кольцо. Легко видеть, что этот способ определения температуры размягчения условный, так как форма и размеры образца, характер и значение механической нагрузки, скорость возрастания температуры и предельные деформации выбираются произвольно.

Температурой вспышки называют температуру жидкости, при нагреве до которой смесь паров ее с воздухом вспыхивает при поднесении к ней небольшого пламени. Температура воспламенения – еще более высокая температура, при которой при поднесении пламени испытуемая жидкость загорается.

Эти характеристики представляют особый интерес при оценке качества трансформаторного масла, а также растворителей, применяемых в производстве электроизоляционных лаков.

Наивысшая допустимая рабочая температура определяется на основании тщательного изучения кратковременной и длительной нагревостойкости материала с учетом коэффициента запаса, зависящего от условий эксплуатации, необходимой степени надежности и срока службы изоляции.

Необратимое ухудшение качества изоляции лишь при длительном воздействии повышенной температуры вследствие медленно протекающих химических процессов называется тепловым старением изоляции. Старение может проявляться, например, у лаковых пленок и целлюлозных материалов в виде повышения твердости и хрупкости, образования трещин и т. п. Для проверки стойкости электроизоляционных материалов к тепловому старению образцы этих материалов длительно выдерживают при сравнительно невысокой температуре, не вызывающей немедленного разрушения материала, а затем их свойства сравнивают со свойствами исходного материала. При прочих равных условиях скорость теплового старения органических полимеров значительно возрастает с повышением температуры, подчиняясь общим закономерностям температурного изменения скорости химических реакций (теория Аррениуса–Эйринга). Продолжительность старения (считая, например, от момента начала снижения механической прочности до момента получения заданной доли ее начального значения) связана с температурой старения  $T$  следующей зависимостью:

$$\ln \tau = A/T + B,$$

где  $A$  и  $B$  – величины, постоянные для данного материала и данных условий теплового старения.

Таким образом, зависимость (в логарифмическом масштабе) от величины, обратной температуре старения, должна выражаться прямой линией.

В большинстве случаев наклон этих прямых таков, что уменьшение вдвое продолжительности старения  $\tau$  соответствует повышению температуры

старения в среднем на 10 К. Аналогичные зависимости наблюдаются для срока жизни (т. е. продолжительности работы до выхода из строя) изоляции электрических машин и других электроизоляционных конструкций.

Помимо температуры существенное влияние на скорость старения могут оказать изменение давления воздуха или концентрации кислорода, присутствие озона, являющегося более сильным окислителем, чем кислород, а также различных химических реагентов, ускоряющих или замедляющих старение. Тепловое старение образца ускоряется под действием ультрафиолетовых лучей, электрического поля, механических нагрузок и т.п.

Возможность повышения рабочей температуры изоляции для практики чрезвычайно важна. В электрических машинах и аппаратах повышение нагревостойкости, которая обычно определяется нагревостойкостью электрической изоляции, позволяет получить более высокую мощность при неизменных габаритах или же при сохранении мощности достичь уменьшения габаритных размеров и стоимости изделия. Повышение рабочей температуры особенно важно для тяговых и крановых электродвигателей, самолетного электрооборудования и других передвижных устройств, где в первую очередь, необходимо уменьшить массу и габаритные размеры. С вопросами о допустимой температуре тесно связаны меры пожарной безопасности и взрывобезопасности. Наконец, в электрических печах и нагревательных приборах, в электросварочной аппаратуре, в осветительных устройствах, электронных и ионных приборах значительной мощности высокая рабочая температура электрической изоляции определяется особенностями работы всего устройства.

ГОСТ 8865–70 предусматривает в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии разделение электроизоляционных материалов для электрических машин, трансформаторов и аппаратов на классы нагревостойкости, для которых фиксируются наибольшие допустимые рабочие температуры при использовании этих материалов в электрооборудовании общего применения, длительно (в течение нескольких лет) работающего в нормальных для данного вида электрооборудования эксплуатационных условиях:

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Наибольшая допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	>180

При указанных температурах обеспечиваются технико-экономически целесообразные сроки службы электрооборудования. В особых случаях (электрооборудование с весьма коротким сроком службы) возможно некоторое повышение рабочих температур соответствующих электроизоляционных материалов по сравнению с приведенными.

К классу Y относятся волокнистые материалы на основе целлюлозы и шелка (пряжа, ткани, ленты, бумаги, картоны, древесина), если они не пропитаны и не погружены в жидкий электроизоляционный материал.

К классу A относятся те же самые органические волокнистые материалы, будучи пропитанными лаками, либо компаундами, или же погруженными

в жидкий электроизоляционный материал, т. е. защищенными от непосредственного соприкосновения с кислородом воздуха, который ускоряет тепловое старение материалов (провод с хлопчатобумажной изоляцией в пропитанной лаком обмотке электрической машины или же в погруженной в электроизоляционное масло обмотке маслонаполненного трансформатора; лакоткани на хлопчатобумажной или шелковой основе и масляных или битумно-масляных лаках; лакобумаги на тех же лаках). К классу А относятся также полиамидные пленки, литые полиамидные смолы, изоляция эмаль-проводов на масляно-смоляных и поливинилацеталевых лаках и т. п.

К классу Е принадлежат пластические массы с органическим наполнителем и терморезистивным связующим типа фенолформальдегидных и подобных им смол (гетинакс, текстолит), полиэтилентерефталатные пленки, эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы и компаунды, изоляция эмалированных проводов на полиуретановых и эпоксидных лаках и т. д. Таким образом, к классам нагревостойкости Y, A и E относятся главным образом чисто органические электроизоляционные материалы.

В класс В входят материалы, для которых характерно большое содержание неорганических компонентов, например шипаная слюда, асбестовые и стекловолоконистые материалы в сочетании с органическими связующими и пропитывающими материалами; таковы большинство миканитов (в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой), стеклолакоткани, стеклотекстолиты на фенолформальдегидных терморезистивных смолах, эпоксидные компаунды с неорганическими наполнителями и т. п.

К классу F принадлежат миканиты, изделия на основе стекловолокна без подложки или с неорганической подложкой, с применением органических связующих и пропитывающих материалов повышенной нагревостойкости: эпоксидных, терморезистивных полиэфирных, кремнийорганических.

Материалы класса H получают при использовании кремнийорганических смол особо высокой нагревостойкости.

К классу нагревостойкости С относятся чисто неорганические материалы, не содержащие склеивающих или пропитывающих органических составов (слюда, стекло и стекловолоконистые материалы, кварц, асбест, микалекс, непропитанный асбоцемент, нагревостойкие (на неорганических связующих) миканиты и т. п.). Из всех органических электроизоляционных материалов к классу нагревостойкости С относятся только политетрафторэтилен (фторопласт).

Вопрос об отнесении того или иного электроизоляционного материала или комбинации электроизоляционных материалов к определенному классу нагревостойкости требует длительных и трудоемких испытаний образцов материалов на тепловое старение в условиях, наиболее приближающихся к тем условиям, в которых эти материалы будут находиться в эксплуатации.

Для некоторых электроизоляционных материалов, в особенности хрупких (стекла, керамические материалы), весьма важна стойкость по отношению к резким сменам температуры (термоударам), в результате которых в материале могут образовываться трещины.

Холодостойкость. Во многих случаях эксплуатации изоляции, скажем, изоляции оборудования открытых подстанций, полевой аппаратуры связи, важна холодостойкость, т. е. способность изоляции выдерживать воздействие низких температур (например, до  $-70^{\circ}\text{C}$ ) без недопустимого ухудшения ее свойств. При низких температурах, как правило, электрические свойства изоляционных материалов улучшаются, однако многие материалы, гибкие и эластичные в нормальных условиях, при низких температурах становятся весьма хрупкими и жесткими, что создает затруднения для работы изоляции. Испытания электроизоляционных материалов и изделий из них на действие низких температур нередко проводятся при одновременном воздействии вибраций.

Теплопроводность. Теплопроводность – один из видов переноса теплоты от более нагретых частей к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры. Практическое значение теплопроводности объясняется тем, что теплота, выделяющаяся вследствие потерь мощности в окруженных электрической изоляцией проводниках в магнитопроводах, а также вследствие диэлектрических потерь в изоляции, переходит в окружающую среду через различные материалы. Теплопроводность влияет на электрическую прочность при тепловом пробое и на стойкость материала к импульсным тепловым воздействиям. Теплопроводность материалов характеризуют коэффициентом теплопроводности  $\gamma_T$  (табл. 2), входящим в уравнение Фурье:

$$\Delta P_T = \gamma_T (dT/dl) \Delta S,$$

где  $\Delta P_T$  – мощность теплового потока сквозь площадку  $\Delta S$ , нормальную к потоку;  $dT/dl$  – градиент температуры.

Таблица 2 Значения коэффициентов теплопроводности некоторых диэлектриков.

Материал	$\gamma_T$ , Вт/(м·К)	Материал	$\gamma_T$ , Вт/(м·К)
Воздух (в небольших зазорах)	0,05	Плавленый кварц	1,25
Битумы	0,07	Фарфор	1,6
Бумага	0,1	Стеатит	2,2
Лакоткань	0,13	Диоксид титана	6,5
Текстолит	0,25	Кристаллический кварц	12,5
Гетинакс	0,35	Алюмооксид	30,0
Вода	0,58	Оксид бериллия	218,0

Значения  $\gamma_T$  электроизоляционных материалов за исключением оксида бериллия меньше, чем большинства металлов. Наименьшими значениями обладают пористые электроизоляционные материалы с воздушными включениями. При пропитке, а также при уплотнении материалов давлением  $\gamma_T$  увеличивается. Как правило, кристаллические диэлектрики имеют более высокие значения  $\gamma_T$ , чем аморфные. Кроме того,  $\gamma_T$  зависит от температуры.

Тепловое расширение диэлектриков, как и других материалов, оценивают температурным коэффициентом линейного расширения (ТК  $l$ ), измеряемым в  $\text{K}^{-1}$ :

$$TK \ l = \alpha_l = (1/l)(dl/dT).$$

Материалы, обладающие малыми значениями ТК, имеют, как правило, наиболее высокую нагревостойкость и наоборот.

В качестве примера в табл. 3 приведены средние ТК некоторых материалов при температуре 20 – 100 °С.

Таблица 3 Температурные коэффициенты линейного расширения.

Материал	Коэффициент линейного теплового расширения	
	$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$
1	2	3
Алмаз	1.1	0.6
Алюминий	22.2	12.3
Бетон	14.5	8.0
Бронза	18.0	10.0
Вольфрам	4.3	2.4
Германий	6.1	3.4
Гранит	7.9	4.4
Графит, чистый	7.9	4.4
Древесина, пихта, ель	3.7	2.1
Древесина дуба, параллельно волокнам	4.9	2.7
Древесина дуба , перпендикулярно волокнам	5.4	3.0
Древесина, сосна	5	2.8
Железо, чистое	12.0	6.7
Железо, литое	10.4	5.9
Золото	14.2	8.2
Известняк	8	4.4
Каменная кладка	4.7 - 9.0	2.6 - 5.0
Кварц	0.77 - 1.4	0.43 - 0.79
Керамическая плитка (черепица)	5.9	3.3
Кирпич	5.5	3.1
Констанан (сплав)	18.8	10.4
Корунд, спеченный	6.5	3.6
Кремний	5.1	2.8
Латунь	18.7	10.4
Лед	51	28.3

окончание таблицы 3		
1	2	3
Литий	46	25.6
Медь	16.6	9.3
Молибден	5	2.8
Мрамор	5.5 - 14.1	3.1 - 7.9
Нейлон, универсальный	72	40
Неодим	9.6	5.3
Никель	13.0	7.2
Окись алюминия	5.4	3.0
Олово	23.4	13.0
Платина	9.0	5.0
Полиамид (РА)	110	61.1
Поливинилхлорид (PVC)	50.4	28
Поликарбонат (PC)	70.2	39
Поликарбонат - армированный стекловолокном	21.5	12
Полипропилен - армированный стекловолокном	32	18
Полиуретан (PUR), жесткий	57.6	32
Полиэтилен (PE)	200	111
Свинец	28.0	15.1
Свинцово-оловянный сплав	11.6	6.5
Серебро	19.5	10.7
Слюда	3	1.7
Сталь	13.0	7.3
Стекло витринное (зеркальное, листовое)	9.0	5.0
Титан	8.6	4.8
Фарфор	3.6-4.5	2.0-2.5
Фенольно-альдегидный полимер без добавок	80	44.4
Цемент	10.0	6.0
Шифер	10.4	5.8
Штукатурка	16.4	9.2
Эпоксидная смола , литая резина и незаполненные продукты из них	55	31

Как видно из таблицы 3, органические диэлектрики имеют резко повышенные ТК / по сравнению с неорганическими диэлектриками.

Контрольные вопросы:

1. Что такое диэлектрическая проницаемость?
2. Какими параметрами характеризуют потери мощности в диэлектриках?
3. Что такое диэлектрические потери?
4. Что такое угол диэлектрических потерь?
5. Что такое токи смещения?
6. Почему в технических диэлектриках возникает ток утечки?

Задания:

1. Как происходит процесс поляризации диэлектриков?
2. Почему вольтамперная характеристика сегнетоэлектрических конденсаторов нелинейна?
3. Какой диэлектрик называется линейным?
4. Какие потери энергии называют резонансными?
5. От чего зависит электрическая прочность диэлектрика?
6. Что называется тепловым старением изоляции?

## Раздел 3 Полупроводниковые материалы

### Тема 3.1 Виды полупроводниковых материалов

Большая группа веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков (табл. 4), относится к полупроводникам. Электропроводность полупроводников в большой степени зависит от внешних энергетических воздействий, а также от различных примесей, иногда в ничтожных количествах присутствующих в теле собственного полупроводника.

Таблица 4 Удельное сопротивление электротехнических материалов различных классов при 20 °С и постоянном напряжении.

Класс материалов	$\rho$ , Ом·м	Знак $\alpha_p$	Тип электропроводности
Проводники	$10^{-8} - 10^{-5}$	+	Электронная
Полупроводники	$10^{-6} - 10^8$	-	Электронная
Диэлектрики	$10^7 - 10^{16}$	-	Ионная и электронная

Управляемость электропроводностью полупроводников посредством температуры, света, электрического поля, механических усилий положена в основу принципа действия соответственно терморезисторов (термисторов), фоторезисторов, нелинейных резисторов (варисторов), тензорезисторов и т.д.

Наличие у полупроводников двух типов электропроводности – электронной (n) и электронно-дырочной (p) позволяет получить полупроводниковые изделия с p – n-переходом. Сюда относятся различные типы как мощных, так и маломощных выпрямителей, усилителей и генераторов. Полупроводниковые системы могут быть с успехом использованы для преобразования различных видов энергии в энергию электрического тока с такими значениями коэффициента преобразования, которые делают полупроводниковые преобразователи сравнимыми с существующими преобразователями других типов, а иногда и превосходящими их. Примерами полупроводниковых преобразователей могут служить солнечные батареи и термоэлектрические генераторы. При помощи полупроводников можно понизить температуру на несколько десятков градусов. В последние годы особое значение приобрело рекомбинационное свечение при низком напряжении постоянного тока электронно-дырочных переходов, которые используются для создания источников света.

Полупроводники могут служить также нагревательными элементами (силитовые стержни), индикаторами радиоактивных излучений, с их помощью также можно измерять напряженность магнитного поля (преобразователи Холла) и т. д.

## Тема 3.2 Классификация полупроводников

Используемые в практике полупроводники могут быть подразделены на простые полупроводники (их основной состав образован атомами одного химического элемента) и сложные полупроводниковые композиции, основной состав которых образован атомами двух или большего числа химических элементов. В настоящее время изучаются также стеклообразные и жидкие полупроводники. Простых полупроводников существует около десятка, они приведены в табл. 5.

Таблица 5 Простые электронные полупроводники.

Элемент	Группа в таблице Менделеева	Ширина запрещенной зоны		Элемент	Группа в таблице Менделеева	Ширина запрещенной зоны	
		эВ	$\times 10^{-19}$ Дж			эВ	$\times 10^{-19}$ Дж
Бор	III	1,1	1,76	Сера	VI	2,5	4
Кремний	IV	1,12	1,79	Селен	VI	1,7	2,72
Германий	IV	0,72	1,15	Теллур	VI	0,36	0,58
Фосфор	V	1,5	2,4	Йод	VII	1,25	2
Мышьяк	V	1,2	1,92				

Примечание. В некоторых модификациях свойствами полупроводников обладают еще олово (серое), сурьма и углерод.

В современной технике особое значение приобрели кремний, германий и частично селен. Сложными полупроводниками являются соединения элементов различных групп таблицы Менделеева, соответствующие общим формулам  $A^{IV}B^{IV}$  (например, SiC),  $A^{III}B^{V}$  (InSb, GaAs, GaP),  $A^{II}B^{IV}$  (CdS, ZnSe), а также некоторые оксиды (например,  $Cu_2O$ ) и вещества сложного состава. К полупроводниковым композициям можно отнести материалы с полупроводящей или проводящей фазой из карбида кремния и графита, сцепленных керамической или другой связкой. Наиболее распространенными из них являются тирит, силит и др.

## Тема 3.3 Методы определения типа электропроводности

Оба типа электропроводности полупроводников представляют собой реальные физические процессы, в чем легко убедиться при помощи опытов. Сущность метода определения типа электропроводности испытуемого полупроводника по изменению знака поперечной ЭДС Холла поясняется на рис. 7, а. Если поместить пластину из полупроводника во внешнее поперечное магнитное поле  $H$  и приложить в направлении длины ее разность потенциалов, создающую электрическое поле  $E$ , то вследствие смещения движущихся носителей заряда к одной из граней пластинки возникает поперечная ЭДС, измеряемая вольтметром  $V$ . Направление смещения зарядов определяется по правилу «левой руки», относящемуся к техническому направлению тока.

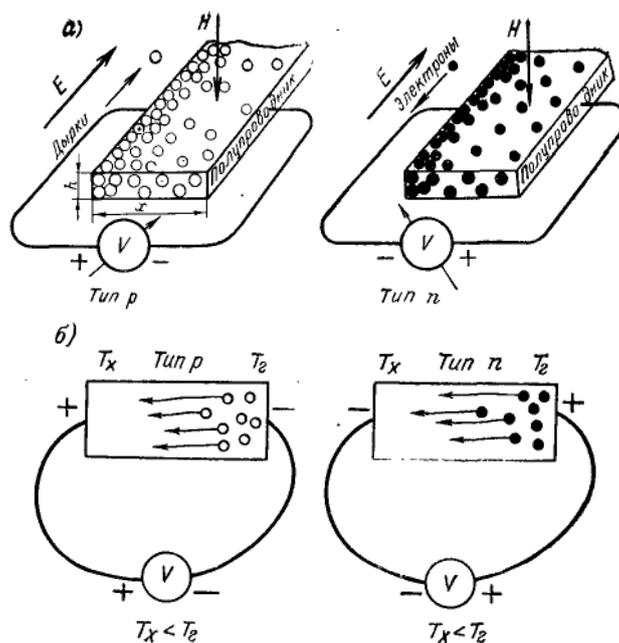


Рисунок 7 - Определение типа электропроводности полупроводников: а – при помощи эффекта Холла; б – при помощи нагрева одного из концов испытуемого полупроводника.

Из рисунка видно, что при изменении типа электропроводности меняется и направление отклонения указателя вольтметра. Другой метод состоит в нагреве одного конца испытуемого полупроводника, как показано на рис. 7, б. При этом, если испытывается полупроводник р-типа, то в нагретом конце за счет затраты тепловой энергии большее число электронов будет переброшено из заполненной зоны на акцепторные уровни примесей по сравнению с холодным концом. Из горячего конца в холодный начнется диффузия дырок, и он окажется заряженным отрицательно по отношению к холодному концу.

При испытании полупроводника n-типа на горячем конце за счет затраты внешней тепловой энергии будет освобождено большее число электронов, чем на холодном конце, и начнется их диффузия к холодному концу, где их в свободном состоянии было меньше. Вследствие ухода электронов горячий конец заряжается положительно, а холодный – отрицательно.

Для полупроводников с одним типом носителей заряда справедливы равенства

$$\gamma = e n_0 \mu_n \text{ или } \gamma = e p_0 \mu_p.$$

### Тема 3.4 Управление электропроводностью полупроводников

Концентрация носителей заряда и их подвижность являются характеристическими параметрами полупроводника. Измерение удельной проводимости полупроводников позволяет определить только произведение этих двух параметров. Для их разделения можно воспользоваться эффектом Холла. Смещение носителей заряда в поперечном направлении в полупроводнике прекратится, когда сила Лоренца уравнивается силой возникшего поперечного электрического поля сместившихся зарядов:

$$\left. \begin{aligned} ev_{cp}B &= eE_x; \quad E_x x = U_x; \\ I &= n_0 S v_{cp} e = n_0 x h v_{cp} e. \end{aligned} \right\}$$

Или

$$U_x = \frac{1}{en_0} \frac{IB}{h} = X \frac{IB}{h}.$$

Поперечная ЭДС  $U_x$ , ток  $I$ , магнитная индукция  $B$  и толщина полупроводниковой пластинки  $h$  легко могут быть измерены, что позволяет вычислить значение коэффициента Холла  $X$ . В системе СИ коэффициент Холла измеряется в кубических метрах на кулон. Значение коэффициента, получаемое по формуле, справедливо только для вырожденных полупроводников, с очень большой концентрацией примеси, при которой энергия активации ее практически равна нулю и можно не учитывать распределения носителей заряда по скоростям, что и допускалось при выводе формул. Более точное значение коэффициента Холла для полупроводников с различной концентрацией примеси будет отличаться от получаемого по формуле множителем  $A$ . Для полупроводников различных групп (с атомной, ионной решетками) численное значение  $A$  изменяется от единицы до двух в зависимости от механизма рассеяния носителей при различных температурах (например, для германия  $A = 1,18$ ). Таким образом, для полупроводников  $n$ -типа

$$X = -A/(|e| n_0).$$

Для дырочных полупроводников легко получить аналогичное выражение, отличающееся знаком и включающее в себя концентрацию носителей  $p$ . Используя эти уравнения, можно находить численные значения концентрации и подвижности носителей зарядов в полупроводниках.

Вышеприведенные формулы относились к полупроводникам резко выраженного  $n$ - или  $p$ -типа, у которых концентрация неосновных носителей пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией основных носителей. Если концентрация неосновных носителей такова, что они начинают заметно влиять на движение частиц в полупроводнике, находящемся в магнитном поле, то необходимо учитывать оба типа носителей. Расчет коэффициента Холла с учетом двух типов носителей получается более сложным:

$$X = \frac{A}{|e|} \frac{n_0 \left( \frac{u_n}{u_p} \right)^2 - p_0}{\left( n_0 \frac{u_n}{u_p} + p_0 \right)^2}.$$

В германии и кремнии подвижность электронов заметно превышает подвижность дырок. У образца  $p$ -типа любого из этих материалов с большой концентрацией примесей при низкой температуре коэффициент Холла будет положительным (при  $n_0 > 0$ ). При повышении температуры до состояния компенсации и дальше знак коэффициента Холла становится отрицательным из-за большей подвижности электронов, хотя концентрация дырок все еще превышает концентрацию электронов.

Эффект Холла интересен не только как основа метода определения характеристик полупроводниковых материалов, но и как принцип действия некоторых полупроводниковых приборов, использующихся, например, для из-

мерения напряженности магнитного поля, перемножения двух величин и других целей.

Вопросы для самопроверки:

1. Поясните наличие у полупроводников двух типов электропроводности.
2. Чем обусловлена фотопроводимость полупроводников?
3. Что называют эффектом Холла?
4. Что такое дырочный полупроводник?

Вопросы и задания для самостоятельной работы:

1. В чем отличие между внутренним и внешним фотоэффектом?
2. Методы определения типа электропроводности полупроводников.
3. Что такое темновое сопротивление, от чего зависит его величина?
4. Как определить концентрацию и подвижность носителей заряда?

## Раздел 4 Магнитные материалы

### Тема 4.1 Виды магнитных материалов

По магнитным свойствам материалы подразделяются на слабомагнитные (диамагнетики и парамагнетики) и сильномагнитные (ферромагнетики и ферримагнетики).

Диамагнетиками являются вещества с магнитной проницаемостью  $\mu < 1$ , значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся водород, инертные газы, большинство органических соединений, каменная соль и некоторые металлы (медь, цинк, серебро, золото, ртуть), а также висмут, галлий, сурьма.

К парамагнетикам относятся вещества с магнитной проницаемостью  $\mu > 1$ , также не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся кислород, оксид азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

Диамагнетики и парамагнетики имеют магнитную проницаемость, близкую к единице, и по магнитным свойствам нашли себе ограниченное применение в технике.

У сильномагнитных материалов  $\mu > 1$  и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

В качестве магнитных материалов техническое значение имеют ферромагнитные вещества и ферримагнитные химические соединения (ферриты).

Ферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов больше нуля.

Антиферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю.

Ферромагнетик кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Магнитные свойства материалов обусловлены внутренними скрытыми формами движения электрических зарядов, представляющими собой элементарные круговые токи. Такими круговыми токами являются: вращение электронов вокруг собственных осей – электронные спины и орбитальное вращение электронов в атомах.

## Тема 4.2 Классификация магнетиков

Диамагнетиками являются вещества с магнитной проницаемостью  $\mu < 1$ , значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся водород, инертные газы, большинство органических соединений, каменная соль и некоторые металлы (медь, цинк, серебро, золото, ртуть), а также висмут, галлий, сурьма.

К парамагнетикам относятся вещества с магнитной проницаемостью  $\mu > 1$ , также не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся кислород, оксид азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

Диамагнетики и парамагнетики имеют магнитную проницаемость, близкую к единице, и по магнитным свойствам нашли себе ограниченное применение в технике.

У сильномагнитных материалов  $\mu > 1$  и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

В качестве магнитных материалов техническое значение имеют ферромагнитные вещества и ферромагнитные химические соединения (ферриты).

Ферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов больше нуля.

Антиферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю.

Ферромагнетик кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Магнитные свойства материалов обусловлены внутренними скрытыми формами движения электрических зарядов, представляющими собой элементарные круговые токи. Такими круговыми токами являются: вращение электронов вокруг собственных осей – электронные спины и орбитальное вращение электронов в атомах.

## Тема 4.3 Магнитная проницаемость

Относительная магнитная проницаемость определяется по основной кривой намагничивания как отношение индукции  $B$  к напряженности маг-

нитного поля  $H$  в данной точке кривой намагничивания с учетом магнитной постоянной  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м:

$$\mu_r = B/\mu_0 H.$$

В дальнейшем (как и для диэлектрической проницаемости) для краткости изложения будем просто писать – магнитная проницаемость.

Магнитную проницаемость  $\mu_{rH}$  при  $H \approx 0$  называют начальной проницаемостью, определяя ее при очень слабых полях, около 0,1 А/м. Наибольшее значение магнитной проницаемости носит наименование максимальной проницаемости и обозначается  $\mu_{r\text{макс}}$ .

При сильных полях в области насыщения магнитная проницаемость стремится к единице.

Магнитную проницаемость, определяемую как производная от магнитной индукции по напряженности магнитного поля в данной точке основной кривой намагничивания, деленной на магнитную постоянную, называют дифференциальной магнитной проницаемостью.

Характеристикой ферромагнетиков в переменных магнитных полях является динамическая магнитная проницаемость  $\mu_{r\sim}$ , представляющая собой отношение наибольшего значения индукции к наибольшему значению напряженности магнитного поля.

С увеличением частоты переменного поля динамическая магнитная проницаемость уменьшается из-за инерционности магнитных процессов (рис. 8).

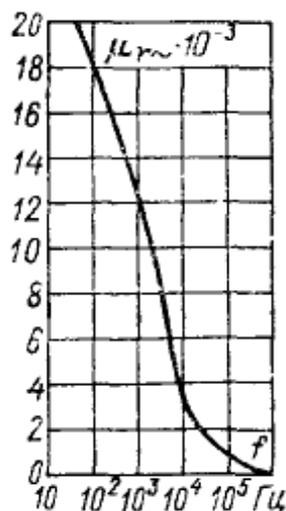


Рисунок 8 - Зависимость динамической магнитной проницаемости пермаллоя от частоты в слабом поле ( $H = 0,8$  А/м).

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от температуры, как показано на рис. 9, переходя через максимум при температурах, близких к температуре (точке) Кюри. Для чистого железа точка Кюри составляет 768 °С, для никеля 358 °С, для кобальта 1131 °С. При температурах выше точки Кюри области спонтанного намагничивания нарушаются тепловым движением и материал перестает быть магнитным. Для характеристики изменения магнитной проницаемости при изменении температуры пользуются температурным коэффициентом магнитной проницаемости ( $K^{-1}$ ):

$$\text{TK } \mu_r = \alpha_{\mu_r} = \frac{1}{\mu_r t} \frac{d\mu_r}{dt},$$

определяемым так же, как и температурный коэффициент других характеристик.

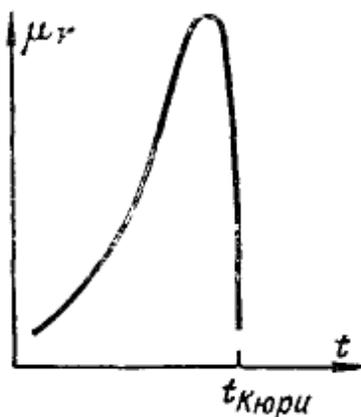


Рисунок 9 - Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от температуры.

#### Тема 4.4 Ферромагнитные материалы

Явление ферромагнетизма связано с образованием внутри некоторых материалов ниже определенной температуры (точки Кюри) таких кристаллических структур, при которых в пределах макроскопических областей, называемых магнитными доменами, электронные спины оказываются ориентированными параллельно друг другу и одинаково направленными. Таким образом, характерным для ферромагнитного состояния вещества является наличие в нем самопроизвольной (спонтанной) намагниченности без приложения внешнего магнитного поля. Однако, хотя в ферромагнетике и образуются самопроизвольно намагниченные области, но направления магнитных моментов отдельных доменов получаются самыми различными, как это вытекает из принципа минимума свободной энергии системы. Магнитный поток такого тела во внешнем пространстве будет равен нулю. Возможные размеры доменов для некоторых материалов составляют около  $0,001 - 10 \text{ мм}^3$  при толщине пограничных слоев между ними в несколько десятков – сотен атомных расстояний. У особо чистых материалов размеры доменов могут быть и больше. Существование доменов удалось показать экспериментально. При очень медленном перемагничивании ферромагнитного образца в телефоне, соединенном через усилитель с катушкой, охватывающей образец, можно различать отдельные щелчки, связанные непосредственно со скачкообразными изменениями индукции. На полированной поверхности намагничиваемого образца ферромагнетика можно обнаружить появление типичных узоров, образующихся с помощью осаждения тончайшего ферромагнитного порошка на границах отдельных доменов; эти узоры получили название фигур Акулова (рис. 10).

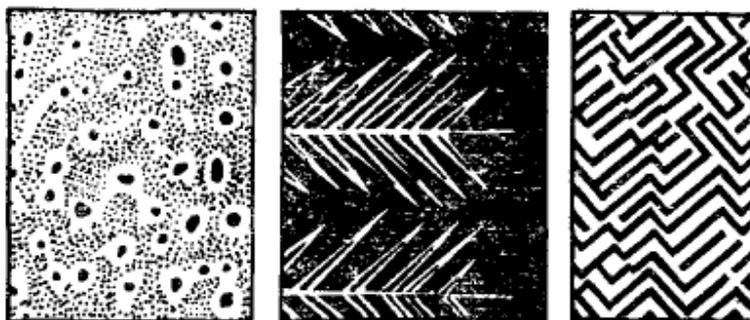


Рисунок 10 - Очертания доменов различных ферромагнетиков (фигуры Акулова).

Монокристаллы ферромагнитных веществ характеризуются магнитной анизотропией, выражающейся в различной легкости намагничивания вдоль разных осей. На рис. 11 показаны направления легкого, среднего и трудного намагничивания в монокристаллах трех основных ферромагнитных элементов: железа, никеля, кобальта.

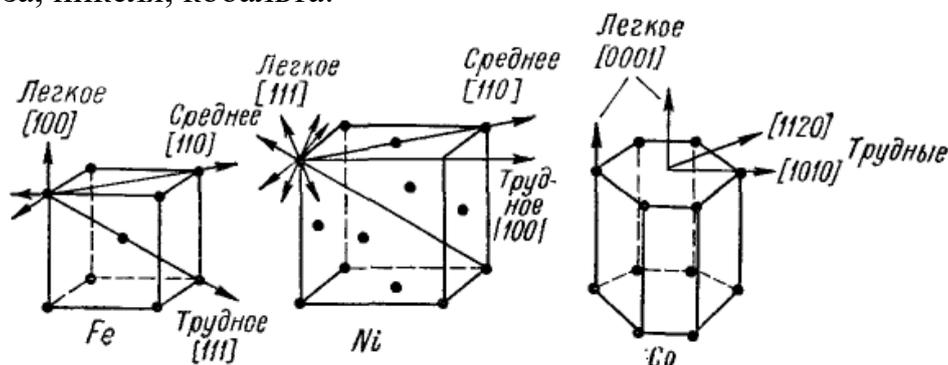


Рисунок 11 - Направления легкого, среднего и трудного намагничивания в монокристаллах железа, никеля, кобальта.

Из рис. 11 видно, что направлением легкого намагничивания для ячейки монокристалла железа будет ребро куба, а наиболее трудного – диагональ; для ячейки никеля направление вдоль ребра куба будет соответствовать, наоборот, направлению трудного намагничивания. В тех случаях, когда анизотропия в поликристаллических магнетиках выражена достаточно резко, принято говорить, что ферромагнетик обладает магнитной текстурой. Получение заданной магнитной текстуры имеет большое значение и используется в технике для создания в определенном направлении повышенных магнитных характеристик материала.

Процесс намагничивания ферромагнитного материала под влиянием внешнего магнитного поля сводится:

1) к росту тех доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением поля, и к уменьшению размеров других доменов (процесс смещения границ доменов);

2) к повороту магнитных моментов в направлении внешнего поля (процесс ориентации).

Магнитное насыщение достигается тогда, когда рост доменов прекратится и магнитные моменты всех спонтанно намагниченных микрокристал-

лических участков окажутся ориентированными в направлении поля. Схема ориентации спинов в доменах приведена на рис. 12.

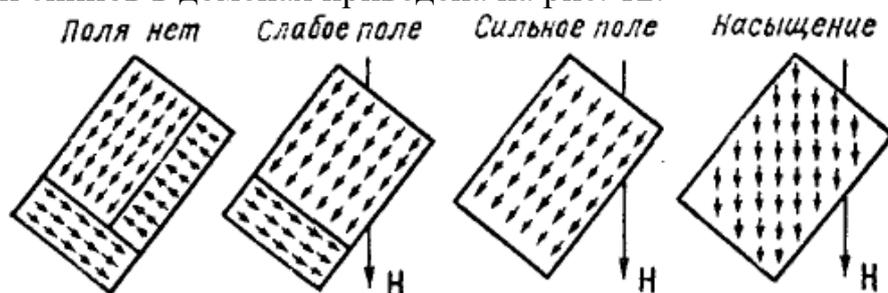


Рисунок 12 - Схема ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика.

При намагничивании ферромагнитных монокристаллов наблюдается изменение их линейных размеров; это явление носит название магнитострикции. Магнитострикция монокристалла железа различна для разных направлений в кристалле. Монокристалл железа сжимается в направлении намагничивания. Магнитострикция наблюдается и у поликристаллических материалов. Из трех основных ферромагнитных элементов (Fe, Ni, Co) наибольшей магнитострикцией обладает никель (рис. 13). Знак магнитострикционной деформации у различных материалов может быть как положительным (растяжение в направлении поля), так и отрицательным; изменение знака может наблюдаться также у одного и того же материала (например, железа) при изменении напряженности магнитного поля.

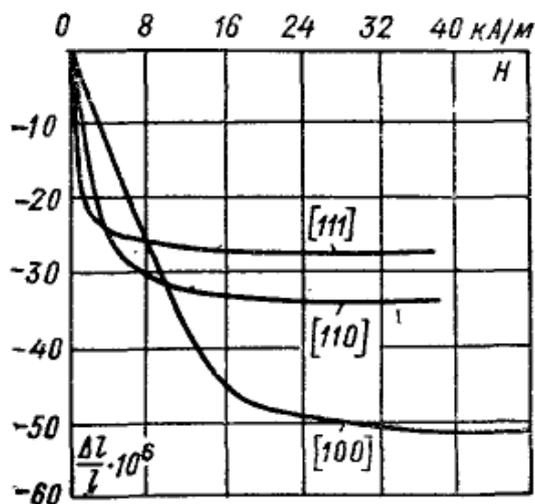


Рисунок 13 - Кривые магнитострикционной деформации никеля по трем направлениям в кристалле.

Протекание процессов намагничивания ферромагнитного материала практически характеризуют кривыми намагничивания  $B(H)$ , имеющими сходный характер для всех ферромагнетиков (рис. 14).

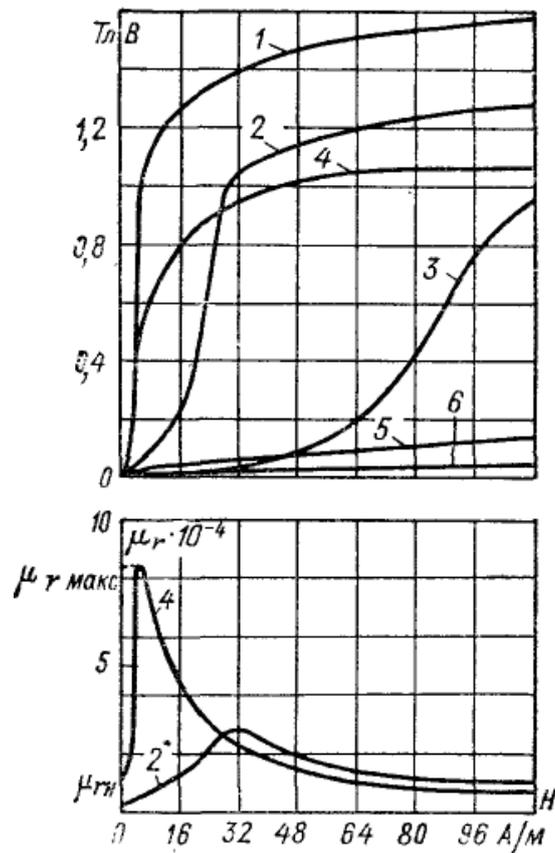


Рис. 9-5

Рисунок 14 - Кривые зависимости магнитной индукции (кривые намагничивания) и относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  от напряженности внешнего магнитного поля: 1 – железо особо чистое; 2 – железо чистое (99,98 % Fe); 3 – железо технически чистое (99,92 % Fe); 4 – пермаллой (78 % Ni); 5 – никель; 6 – сплав железо – никель (26 % Ni).

#### Тема 4.5 Потери на гистерезис

Если медленно производить намагничивание ферромагнетика во внешнем магнитном поле, а затем, начиная с какой-либо точки основной кривой намагничивания, начать уменьшать напряженность поля, то индукция будет также уменьшаться, но не по основной кривой, а с отставанием, вследствие явления гистерезиса. При увеличении поля противоположного направления образец может быть размагничен, перемагничен и при новой перемене направления магнитного поля индукция снова может вернуться в исходную точку, характеризовавшую намагничивание образца, т. е. будет описана кривая, представляющая собой петлю гистерезисного цикла перемагничивания. В зависимости от различных значений напряженности внешнего магнитного поля можно построить семейство петель гистерезиса, как это показано на рис. 15.

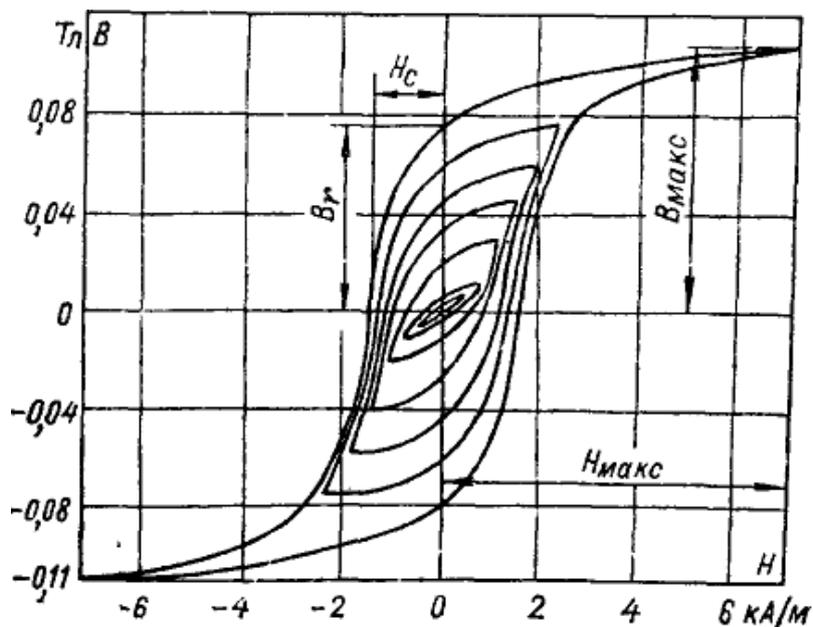


Рисунок 15 - Гистерезисные петли при различных предельных значениях напряженности внешнего магнитного поля.

Выберем из этих циклов предельный цикл, при котором достигается намагничивание материала до насыщения  $B_{\text{макс}}$ . Значение  $B$  при  $H = 0$  в процессе размагничивания образца, намагниченного до насыщения, называется остаточной индукцией  $B_r$ . Для того чтобы уменьшить индукцию от значения  $B_r$  до нуля, необходимо приложить обратно направленную напряженность поля  $H_c$ , называемую задерживающей (коэрцитивной) силой.

Материалы с малым значением  $H_c$  и большой магнитной проницаемостью называются магнитомягкими материалами. Материалы с большой коэрцитивной силой и сравнительно малой проницаемостью называются магнитотвердыми материалами.

Внутренние напряжения в кристаллической решетке ферромагнетика препятствуют при намагничивании росту доменов и ориентации их магнитных моментов в направлении поля. С увеличением внутренних напряжений магнитная проницаемость уменьшается, а коэрцитивная сила возрастает. Внутренние напряжения возникают при холодной деформации в результате прокатки,ковки, протяжки, изгибания и т. п. Отдельные кристаллы дробятся, вытягиваются, вследствие чего возникает сложная система внутренних напряжений. В качестве примера на рис. 16 приведена зависимость коэрцитивной силы трансформаторной стали от толщины листа при неизменном составе стали и температуре  $20^\circ\text{C}$ .

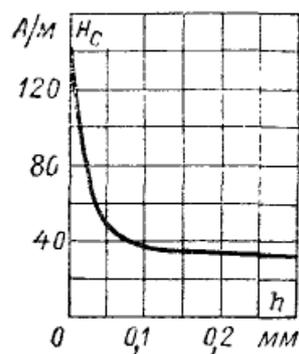


Рисунок 16 - Зависимость коэрцитивной силы трансформаторной стали от толщины листа.

Для восстановления первоначальных магнитных свойств магнитные материалы подвергают отжигу, который снимает внутренние напряжения и вызывает рекристаллизацию зерен. Магнитные свойства зависят от размера зерна. Поверхностные слои зерен вследствие искажения строения кристаллов характеризуются повышенной коэрцитивной силой. При мелкозернистом строении суммарная поверхность зерен в единице объема больше, чем при крупнозернистом материале, поэтому в материале, состоящем из мелких зерен, влияние поверхностных искажений слоев сказывается сильнее и у него коэрцитивная сила больше. Внутренние напряжения нередко связаны с наличием в материале различных загрязнений, например кислорода в чистом железе, примесей или присадок кобальта, хрома, вольфрама. Используя примеси, усложняющие кристаллическую решетку, вводя технологическую операцию закалки, добиваясь нужной ориентации структуры доменов в магнитном поле, получают магнитотвердые материалы. При перемагничивании ферромагнетиков в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии. Они обусловлены потерями на гистерезис и динамическими потерями. Динамические потери вызываются вихревыми токами, индуцированными в массе магнитного материала. Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления ферромагнетика. Чем выше удельное сопротивление ферромагнетика, тем меньше потери на вихревые токи.

Потери на гистерезис для каждого материала могут быть определены по площади статической петли гистерезиса с учетом масштабов по осям и частоты тока. Для вычисления потерь на гистерезис за один цикл в единице объема вещества была предложена эмпирическая формула

$$W_{H1} = \eta B_{\max}^n,$$

где  $\eta$  – коэффициент, зависящий от материала;  $B_{\max}$  – максимальная индукция, достигаемая в течение цикла;  $n$  – показатель степени, равный 1,6 – 2.

Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_H = \eta B_{\max}^n fV,$$

где  $f$  – частота тока;  $V$  – объем ферромагнетика.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_f = \xi B_{\text{макс}}^2 f^2 V,$$

где  $\xi$  – коэффициент, зависящий от типа ферромагнетика (в частности, от его удельного сопротивления) и его формы; остальные величины те же.

Поскольку  $P_f$  зависит от второй степени частоты, а  $P_H$  – от первой степени, при высоких частотах приходится учитывать в первую очередь величину  $P_f$ , т. е. потери на вихревые токи.

В цепях переменного тока рассеяние мощности в катушках индуктивности иногда оценивают тангенсом угла магнитных потерь. Тороидальную катушку индуктивности с сердечником из магнитного материала, собственной емкостью и сопротивлением обмотки которой можно пренебречь, представим в виде схемы, состоящей из последовательно соединенных индуктивности  $L$  и сопротивления  $r_1$ , эквивалентного всем видам потерь мощности в магнетике (рис. 17); для этого случая из векторной диаграммы получим

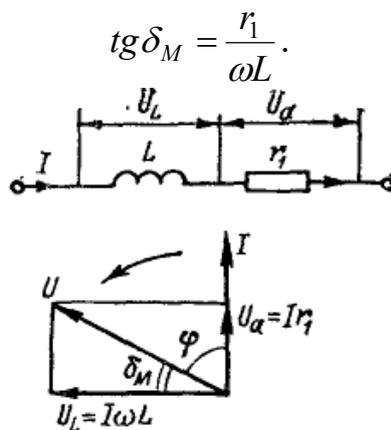


Рисунок 17 - Эквивалентная схема и векторная диаграмма катушки индуктивности с магнитным сердечником.

Контрольные вопросы:

1. Какие вещества называют диамагнетиками?
2. Какие материалы относят к классу ферромагнетиков?
3. Назовите области применения ферромагнетиков.
4. Что такое относительная магнитная проницаемость?
5. Как происходит процесс намагничивания ферромагнетиков?
6. Что называют коэрцитивной силой?

Задания:

1. Как и от каких факторов зависит магнитная проницаемость?
2. В чем причина сильных магнитных свойств ферромагнетиков?
3. Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от температуры, почему?
4. Как и от каких факторов зависит магнитная проницаемость?
5. Что такое магнитомягкие и магнитотвердые ферромагнетики? Которые из них обладают меньшими потерями и почему?

6. Какие потери возникают в ферромагнетике при его периодическом перемагничивании?

Примеры решения задач

1. Лампа с вольфрамовой нитью рассчитана на мощность 40 Вт и напряжение 220 В. Какие сопротивление и ток имеет лампа в холодном состоянии и при рабочей температуре 2500° С?

Мощность лампы

$$P = UI = \frac{U^2}{r},$$

Тогда сопротивление одной лампы

$$r_t = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} = \frac{48400}{40} = 1210 \text{ Ом.}$$

Сопротивление холодной нити (при 20° С) определим по формуле

$$r_t = r(1 + \alpha\Delta t),$$

откуда

$$r = \frac{r_t}{1 + \alpha\Delta t} = \frac{1210}{1 + 0,004(2500 - 20)} = \frac{1210}{10,92} = 118 \text{ Ом.}$$

Через нить лампы в горячем состоянии проходит ток

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} = 0,18 \text{ А.}$$

Ток при включении равен:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{118} = 1,86 \text{ А.}$$

При включении ток примерно в 10 раз больше, чем ток горячей лампы.

2. Электрический паяльник мощностью 100 Вт должен нагреваться с 20 до 200°С. Сколько времени будет длиться нагрев, если рабочий элемент выполнен из материала с удельной теплоемкостью  $c = 0,093$  ккал/кг·°С и весит 200 г?

Необходимое количество тепла

$$Q = Gc(t_2 - t_1) = 200 \cdot 0,093 \cdot 180 = 3348 \text{ кал.}$$

Так как

$$Q = 0,24Pt,$$

то

$$t = \frac{Q}{0,24P} = \frac{3348}{0,24 \cdot 100} = 139 \text{ сек.}$$

3. В индукционной печи надо расплавить 100 кг меди. Сколько электроэнергии для этого необходимо? Какую мощность должна иметь печь, что-

бы медь расплавилась за 2 ч? Удельная теплоемкость меди  $c = 0,093$  ккал/кг $^{\circ}$ С, температура плавления  $1\ 083^{\circ}$ С, удельная теплота плавления  $41$  ккал/кг. К.п.д. печи  $85\%$ . Для нагрева  $100$  кг меди до точки плавления необходимо

$$Q_n = Gc(t_2 - t_1) = 100 \cdot 0,093 \cdot (1083 - 20) = 9886 \text{ ккал.}$$

Для расплавления  $100$  кг меди после нагрева до температуры плавления необходимо

$$Q_{пл} = G \cdot 41 = 100 \cdot 41 = 4100 \text{ ккал.}$$

При  $\eta = 85\%$  количество тепла, необходимое для нагрева и плавления  $100$  кг меди, равно:

$$Q = \frac{Q_n + Q_{пл}}{\eta} = \frac{13986}{0,85} = 16454 \text{ ккал.}$$

Для получения этого количества тепла необходима электрическая энергия

$$W = \frac{Q}{860} = \frac{16454}{860} = 19,13 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Мощность индукционной печи равна:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{19,3}{2} = 9,56 \text{ кВт.}$$

4. Нужно отхромировать  $200$  фар, из которых на каждую требуется  $3$  г хрома. Какой ток необходим, чтобы эта работа была выполнена за  $10$  ч (электрохимический эквивалент хрома  $A = 0,18$  мг/А $\cdot$ сек)?

$$I = \frac{G}{At} = \frac{200 \cdot 3 \cdot 1000}{0,18 \cdot 10 \cdot 3600} = 92,6 \text{ А.}$$

5. Определить емкость конденсатора, состоящего из двух пластин, каждая из которых имеет площадь  $S = 120$  см $^2$ . Пластины разделены слоем воздуха толщиной  $d = 0,5$  см.

$$C = \varepsilon \frac{S}{4\pi d} \cdot 1,11 = \frac{120 \cdot 1,11}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,5} = 21,2 \text{ пФ.}$$

6. Зазор между пластинами конденсатора заполнен слоями электрокартона и слоем слюды одинаковой толщины. Напряжение между пластинами конденсатора  $10$  кВ. Электрокартон имеет диэлектрическую проницаемость  $2$ , а слюда  $8$ . Как распределится напряжение  $U$  между слоями изоляции и какую напряженность будет иметь электрическое поле в отдельных слоях?

Напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на одинаковых по толщине слоях диэлектриков будут обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{8}{2} = 4.$$

$$U_1 = 4U_2;$$

$$U = U_1 + U_2,$$

имеем два уравнения с двумя неизвестными. Первое уравнение подставим во второе:

$$U = 4U_2 + U_2 = 5U_2.$$

Отсюда

$$5U_2 = 10000 \text{ В},$$

$$U_2 = 2000 \text{ В}.$$

$$U_1 = 4U_2 = 8000.$$

Хотя слои диэлектриков имеют одинаковую толщину, нагружены они неодинаково. Диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью менее нагружен и наоборот.

Напряженность электрического поля  $E$  в слоях диэлектриков равна:

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{8000}{0,2} = 40000 \text{ В/см};$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{2000}{0,2} = 10000 \text{ В/см}.$$

Неодинаковость диэлектрической проницаемости приводит к увеличению напряженности электрического поля. Если бы весь зазор был заполнен только одним диэлектриком, например слюдой или электрокартоном, напряженность электрического поля была бы меньше, так как она была бы распределена по всему зазору совершенно равномерно:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{U_1 + U_2}{d_1 + d_2} = \frac{10000}{0,4} = 25000 \text{ В/см}.$$

Поэтому необходимо избегать применения сложной изоляции с сильно различающимися диэлектрическими проницаемостями. По той же причине опасность возникновения пробоя увеличивается при образовании в изоляции воздушных пузырей.

7. Напряженность магнитного поля в катушке  $H = 500$  А/м. Какова будет магнитная индукция, если в катушку введем сердечник из трансформаторной стали, относительная магнитная проницаемость которой  $\mu_r = 2400$ ?

Магнитная индукция в катушке без сердечника

$$B_e = \mu_0 H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 = 0,000625 \text{ Тл};$$

индукция в сердечнике из трансформаторной стали

$$B_c = \mu H = \mu_0 \mu_r H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2400 \cdot 500 = 1,5 \text{ Тл}.$$

8. Каков будет магнитный поток  $\Phi$  в предшествующем примере, если сечение сердечника  $S = 4 \text{ см}^2$ ?

$$\Phi = BS = 1,5 \cdot 0,0004 = 0,0006 \text{ Вб.}$$

9. По прямому проводу протекает ток  $I = 100 \text{ А}$ . Каковы будут напряженность магнитного поля и индукция в воздухе на расстоянии  $10 \text{ см}$  от провода?

$$\begin{aligned} Iw &= Hl; \\ I \cdot 1 &= H \cdot 2\pi r; \\ H &= \frac{I}{2\pi r} = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 10} = 1,59 \text{ А/см} = 159 \text{ А/м}; \\ B &= 0,4\pi H \approx 1,25H \approx 2 \text{ Гс} = 0,0002 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

10. Какой ток проходит через катушку без сердечника, имеющую индуктивность  $L = 60 \text{ мГн}$ , если она подключена к сети с переменным напряжением  $220 \text{ В}$  с частотой  $f = 50 \text{ Гц}$ ? Какой будет ток, если в катушку вложен сердечник с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r = 1000$ ?

$$I = \frac{U}{x_L} = \frac{U}{2\pi f L} = \frac{220}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,06} = \frac{220}{18,84} = 11,68 \text{ А.}$$

Ток в катушке с сердечником

$$I = \frac{U}{2\pi f L \mu_r},$$

т. е. ток будет в  $\mu_r$  раз меньше:

$$I = 11,68 : 1000 = 0,01168 \text{ А} = 11,68 \text{ мА.}$$

## Задания к контрольной работе

Подробно рассмотреть одну из тем и решить задачу.  
Вариант выбрать по последней цифре номера зачётной книжки.

- Тема 1 Виды и особенности химической связи
- Тема 2 Классификация проводниковых материалов
- Тема 3 Свойства и особенности проводников
- Тема 4 Виды поляризации диэлектриков
- Тема 5 Электропроводность диэлектриков
- Тема 6 Виды полупроводниковых материалов
- Тема 7 Управление электропроводностью полупроводников
- Тема 8 Магнитная проницаемость
- Тема 9 Классификация магнитных материалов
- Тема 10 Ферромагнитные материалы

## Задачи

1. Лампа с вольфрамовой нитью рассчитана на мощность 65 Вт и напряжение 220 В. Какие сопротивление и ток имеет лампа в холодном состоянии и при рабочей температуре  $2500^{\circ}\text{C}$ ?

2. Электрический паяльник мощностью 120 Вт должен нагреваться с  $20$  до  $200^{\circ}\text{C}$ . Сколько времени будет длиться нагрев, если рабочий элемент выполнен из материала с удельной теплоемкостью  $c = 0,093$  ккал/кг $^{\circ}\text{C}$  и весит 200 г?

3. В индукционной печи надо расплавить 10 кг меди. Сколько электроэнергии для этого необходимо? Какую мощность должна иметь печь, чтобы медь расплавилась за 1 ч? Удельная теплоемкость меди  $c = 0,093$  ккал/кг $^{\circ}\text{C}$ , температура плавления  $1083^{\circ}\text{C}$ , удельная теплота плавления 41 ккал/кг. К.п.д. печи 85%.

4. Нужно отхромировать 20 фар, из которых на каждую требуется 3 г хрома. Какой ток необходим, чтобы эта работа была выполнена за 10 ч (электрохимический эквивалент хрома  $A = 0,18$  мг/А $\cdot$ сек)?

5. Определить емкость конденсатора, состоящего из двух пластин, каждая из которых имеет площадь  $S = 400$  см $^2$ . Пластины разделены слоем воздуха толщиной  $d = 0,1$  см.

6. Зазор между пластинами конденсатора заполнен слоями электрокартона и слоем слюды одинаковой толщины. Напряжение между пластинами конденсатора 1 кВ. Электрокартон имеет диэлектрическую проницаемость 2, а слюда 8. Как распределится напряжение  $U$  между слоями изоляции и какую напряженность будет иметь электрическое поле в отдельных слоях?

7. Напряженность магнитного поля в катушке  $H = 250$  А/м. Какова будет магнитная индукция, если в катушку введем сердечник из трансформаторной стали, относительная магнитная проницаемость которой  $\mu_r = 2400$ ?

8. Каков будет магнитный поток  $\Phi$  в предшествующем примере, если сечение сердечника  $S = 40 \text{ см}^2$ ?

9. По прямому проводу протекает ток  $I = 100 \text{ А}$ . Каковы будут напряженность магнитного поля и индукция в воздухе на расстоянии  $1 \text{ см}$  от провода?

10. Какой ток проходит через катушку без сердечника, имеющую индуктивность  $L = 50 \text{ мГн}$ , если она подключена к сети с переменным напряжением  $220 \text{ В}$  с частотой  $f = 50 \text{ Гц}$ ? Какой будет ток, если в катушку вложен сердечник с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r = 4000$ ?

#### Некоторые физические константы

Наименование константы	Обозначение	Размерность	Численное значение
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	Ф/м	$8,854 \cdot 10^{-12}$
Масса покоя электрона	$m_0$	кг	$9,109 \cdot 10^{-31}$
Заряд электрона	$e$	Кл	$1,602 \cdot 10^{-19}$
Число Авогадро	$N_0$	моль <sup>-1</sup>	$6,022 \cdot 10^{23}$
Постоянная Планка	$h$	Дж·с	$6,62 \cdot 10^{-34}$
		эВ·с	$4,14 \cdot 10^{-15}$
Постоянная Больцмана	$k$	Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$
		эВ/К	$8,62 \cdot 10^{-5}$
Постоянная Фарадея	$F$	Кл/моль	$9,648 \cdot 10^4$
Число Лоренца	$L_0$	$\text{В}^2/\text{К}^2$	$2,45 \cdot 10^{-8}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	Дж/(моль·К)	8,314

Примечание:  $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

## Список литературы

<b>Список основной литературы</b>	
1.	Легостаев, Н.С. Материалы электронной техники. [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Легостаев Н.С.- Электрон. текстовые данные.- Томск: Эль Контент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.- 184 с.- Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/13943">http://www.iprbookshop.ru/13943</a> . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
2.	Материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ И.М. Жарский [и др.]. - Электрон. текстовые данные. - Минск: Вышэйшая школа, 2015. - 558 с. - Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/48008">http://www.iprbookshop.ru/48008</a> . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
3.	Материаловедение. Технология конструкционных материалов [Текст]: учеб. пособие/А.В. Шишкин, В.С. Чередниченко, А.Н. Черепанов и др.; под ред. В.С. Чередниченко.– 4-е изд. стер. – М.: Омега-Л, 2008. – 752 с.
4.	Орликов, Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники. В 2 ч. Часть 1. [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Орликов Л.Н. - Электрон. текстовые данные.- Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 98 с. - Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/13990">http://www.iprbookshop.ru/13990</a> . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
5.	Орликов, Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники. В 2 ч. Часть 2. [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Орликов Л.Н.- Электрон. текстовые данные.- Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.- 100 с.- Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/13991">http://www.iprbookshop.ru/13991</a> . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
6.	Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Серебряков А.С. - Электрон. текстовые данные. - М.: Маршрут, 2005. - 280 с. - Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/16281">http://www.iprbookshop.ru/16281</a> . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
7.	Электротехническое и конструкционное материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие по курсу «Электротехническое и конструкционное материаловедение» для студентов дневной формы обучения направления подготовки 140400.62- Электроэнергетика и электротехника/ - Электрон. текстовые данные. - Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2011. - 123 с. - Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/28422">http://www.iprbookshop.ru/28422</a> . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
<b>Список дополнительной литературы</b>	
1.	Туляков, Г.А. Конструкционные материалы для энергомашиностроения [Текст]/ Г.А. Туляков, В.Н. Скоробогатых, В.В. Гриневский.- М.: Машиностроение, 1991.- 240 с.
2.	Электротехнические и конструкционные материалы [Текст]: учеб. пособие для студ. учреж. сред. проф. образ./ В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, под ред. В.А. Филикова.- М.: Мастерство, 2000.- 280 с.