

1. Магнитные материалы

Магнетизм вещества зависит от магнитных моментов электронов в атоме и от совместного действия электронов в группах атомов. Движение электрона по орбите создает орбитальный магнитный момент. Вращение электрона вокруг собственной оси (спин) создает спиновый момент. Атом является нейтральным в магнитном отношении, если все действующие в нем магнитные моменты взаимно скомпенсированы. Если же полной компенсации нет, то атом обладает свойствами магнитного диполя.

Количественно магнитные свойства вещества характеризуются магнитной восприимчивостью

$$K_m = \frac{M}{H}, \quad (1.1)$$

где M —намагниченность (интенсивность намагничивания), численно равная магнитному моменту единицы объема вещества;

H —напряженность внешнего магнитного поля.

Магнитное поле в материале характеризуется магнитной индукцией

$$B = \mu_0(H + M), \quad (1.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, Г/м—магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума).

В выражении (1.2) составляющая $\mu_0 H$ численно равна магнитной индукции в вакууме. Составляющая $\mu_0 M = \mu_0 K_m H$ численно равна магнитной индукции, обусловленной намагниченностью материала. Подставив в выражение (1.2) значение M , получим:

$$B = \mu_0(H + K_m H) = \mu_0 H(1 + K_m) = \mu_0 \mu H = \mu_0 H, \quad (1.3)$$

где $\mu = (1 + K_m)$ —относительная магнитная проницаемость вещества, показывающая во сколько раз магнитная индукция в данном веществе отличается от магнитной индукции в вакууме;

μ_0 абсолютная магнитная проницаемость вещества.

Различают пять видов магнетизма: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

Диамагнетизм—это свойство вещества слабо намагничиваться противоположно внешнему магнитному полю. Он обусловлен изменением движения электронов под действием сил приложенного поля. Дополнительные индуцированные токи, обусловленные изменением движения электронов, в соответствии с законом Ленца вызывают появление локальных магнитных моментов, направленных противоположно приложенному полю. Диамагнетизм присущ всем

без исключения веществам в твердом, жидком и газообразном состояниях, но проявляется слабо и часто маскируется другими эффектами. Диамагнетики слабо выталкиваются из неравномерного магнитного поля, а в равномерном стремятся расположиться перпендикулярно направлению силовых линий.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков отрицательна и мала. Обычно, K_m по абсолютной величине меньше 10^{-3} . Поэтому магнитная проницаемость диамагнетиков меньше 1, но вследствие малости K_m магнитная проницаемость их практически равна 1. К диамагнетикам относятся медь, цинк, углерод, бериллий, селен, теллур, золото и др.

Парамагнетизм—свойство вещества слабо намагничиваться согласованно с внешним полем. Парамагнетизм присущ веществам, у которых суммарный магнитный момент атома не равен нулю, и может проявляться у веществ, в твердом, жидком и газообразном состояниях. При отсутствии внешнего поля направление магнитных моментов атомов вследствие теплового движения носит неупорядоченный характер и намагниченность равна нулю. При наложении поля происходит частичное ориентирование магнитных диполей по направлению поля. Магнитная восприимчивость парамагнетиков зависит от температуры, т.к. тепловое движение атомов нарушает ориентировку их магнитных моментов.

Магнитная восприимчивость парамагнетиков положительна, но при температуре выше 10 К, как правило, не больше 0,02. Поэтому магнитная проницаемость парамагнетиков больше 1, но практически равна 1. Парамагнетики слабо втягиваются в неравномерное магнитное поле, а в равномерном стремятся расположиться вдоль силовых линий. К парамагнетикам относятся щелочные и щелочноземельные металлы, алюминий, кислород, платина и др.

Ферромагнетизм—это свойство вещества сильно намагничиваться во внешнем поле и частично сохранять намагниченность при удалении поля.

Ферромагнетики отличаются от парамагнетиков:

1. Наличием доменов, т.е. областей спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, внутри которых ферромагнетик самопроизвольно намагничивается практически до насыщения без воздействия внешнего поля;
2. Зависимостью магнитного состояния от предшествующей магнитной истории;
3. Наличием точки Кюри, т.е. температуры, выше которой вещество теряет ферромагнитные свойства и становится парамагнетиком.

При повышении температуры ориентация магнитных моментов атомов внутри домена постепенно расстраивается, что приводит к соответственному уменьшению намагниченности насыщения M_s или индукции насыщения B_s .

Условие $M_s=0$ определяет точку Кюри, когда доменная структура разрушена тепловым движением и ферромагнетик перешел к структуре парамагнетика.

Антиферромагнетизм—характеризуется антипараллельным расположением нескомпенсированных магнитных моментов соседних атомов. Доменная структура не возникает, т.к. магнитные поля соседних атомов взаимно компенсируются. В магнитном отношении антиферромагнетики подобны слабым парамагнетикам, но отличаются тем, что с повышением температуры их восприимчивость возрастает, достигая максимума в точке Нееля, а затем снижается как в парамагнетиках.

Ферримагнетизм (магнетизм ферритов)—это нескомпенсированный антиферромагнетизм, когда расположенные антипараллельно нескомпенсированные моменты соседних атомов неодинаковы по величине или когда неодинаковы числа атомов с противоположно направленными моментами. Поэтому ферримагнетизмом могут обладать только соединения элементов. Ферритами называются двойные окислы типа $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me —металл (Ni, Mn, Mg, Fe, Co, Zn, Cu и т.д.) и Fe_2O_3 окись железа. Ферриты, как и ферромагнетики, обладают доменной структурой. В электрическом отношении ферриты принадлежат к классу полупроводников ($\rho=10^{-1}-10^3$ Ом·м).

Качественно поведение ферритов в магнитном и температурном поле такое же как у ферромагнетиков. Количественные же характеристики существенно различаются. Результирующий магнитный момент кристаллической ячейки феррита всегда значительно меньше результирующего момента ферромагнетика. Поэтому намагниченность насыщения M_s (индукция насыщения B_s), ферритов, как правило, не превышает 0,25 намагниченности насыщенности железа.

Температура Кюри у ферритов значительно ниже, чем у ферромагнетиков, и лежит в пределах $100-500^\circ C$. Высокое удельное электрическое сопротивление ферритов ограничивает величину вихревых токов и, следовательно, уменьшает их размагничивающее действие, потери на вихревые токи, что позволяет использовать ферриты в высокочастотной технике.

Ферриты—это магнитная керамика и способы получения изделий, их механические свойства подобны электроизоляционной керамике.

Свойства ферро- и ферримагнитных материалов описываются зависимостями магнитной индукции B , магнитной проницаемости μ , индукции насыщения B_s , потерь энергии на гистерезис P_H и вихревые токи P_V от напряженности магнитного поля H , температуры материала T и частоты перемагничивания материала f .

Если образец материала не имел магнитной истории, т.е. был полностью размагничен, то при наложении монотонно возрастающего поля H индукция B будет изменяться по кривой начального намагничивания (рис. 1.1). На этой кривой принято различать три характерных участка.

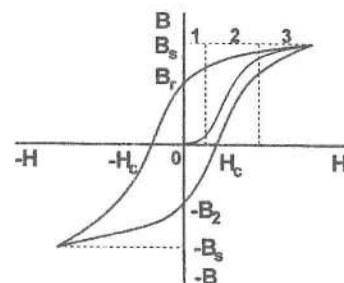


Рисунок 1.1. Начальная кривая намагничивания и петли гистерезиса для ферро- и ферримагнетиков

На начальном участке 1, характеризующимся малым наклоном с положительной кривизной, происходит обратимое смещение границ между доменами (стенки Блоха) и увеличение объема тех доменов, вектор намагниченности которых образует наименьший угол с направлением намагничивающего поля H . Этот процесс обратим и при уменьшении поля до нуля размеры всех доменов восстанавливаются. На участке 2, характеризующимся большим наклоном и содержащим точку перегиба, происходит необратимое смещение границ доменов и поворот их векторов намагниченности на $90-180^\circ$.

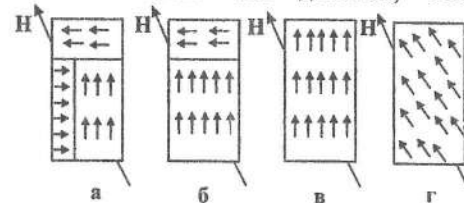


Рисунок 1.2. Намагничивание ферромагнетиков и ферритов из-за смещения границ области (а—очень низкое поле; б—низкое поле; в—высокое поле и из-за поворота магнитных моментов по полю; г—очень высокое поле, насыщенность).

На участке 3, характеризующимся большим наклоном и содержащим точку перегиба, происходит необратимое смещение границ доменов и поворот их векторов намагниченности на $90-180^\circ$.

При этом все векторы оказываются ориентированными вдоль той оси легкого намагничивания, направление которой составляет наименьший угол с направлением намагничивающего поля. Этот процесс преимущественно необратим. На участке 3 (зоне насыщения), характеризующимся малым наклоном и отрицательной кривизной, происходит процесс вращения векторов намагниченности доменов из направления вдоль оси легкого намагничивания в направление, параллельное намагничивающему полю H . Этот процесс обратим. Процесс намагничивания (в плоском изображении показан на рис. 1.2). При расположении всех векторов намагниченности доменов вдоль направления намагничивающего поля наступает так называемое техническое насыщение с индукцией B_s , соответствующее тому спонтанному намагничиванию доменов, которое возможно при данной температуре.

При перемагничивании материала в переменном поле индукция в материале изменяется по петле гистерезиса (рис. 1.1). Размеры и форма петли гистерезиса зависят от степени намагничивания материала при перемагничивании. Если намагничивание производится до насыщения, то получается петля гистерезиса с характерными точками:

B_r — остаточная индукция;

H_c — коэрцитивная сила (поле, необходимое для уменьшения намагниченности до нуля после полного насыщения);

B_s — индукция насыщения.

На практике в качестве характеристики магнитных материалов

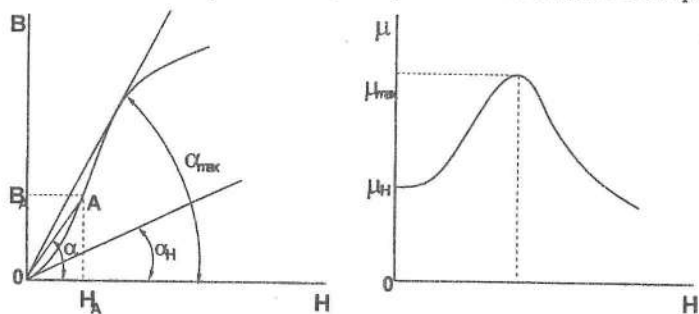


Рисунок 1.3. Основная кривая намагничивания и магнитная проницаемость.

используют близкую к кривой начального намагничивания так называемую основную кривую намагничивания, представляющую собой геометрическое место вершин гистерезисных петель,

получающихся при циклическом перемагничивании образца в переменном поле возрастающей амплитуды.

По основной кривой намагничивания можно определить магнитную проницаемость (рис. 1.3).

Большое влияние, на намагниченность ферро- и ферримагнетиков оказывает тепловое поле. Зависимость магнитной проницаемости и индукции насыщения от температуры приведена на рис. 1.4.

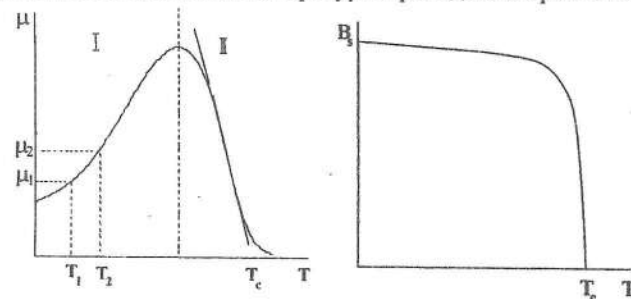


Рисунок 1.4. Температурная зависимость магнитной проницаемости и индукции насыщения.

При сравнительно небольших температурах (особенно у ферритов) при повышении температуры может наблюдаться рост магнитной проницаемости (участок 1). Это объясняется ослаблением энергии связи между отдельными доменами, что облегчает их ориентацию по полю. Дальнейший рост температуры вызывает уменьшение магнитной восприимчивости, магнитной проницаемости и намагниченности при насыщении. Это происходит вследствие возрастания теплового движения атомов и, следовательно, уменьшения степени упорядоченной ориентации спиновых магнитных моментов внутри доменов. При температуре Кюри T_c доменная структура полностью разрушается тепловым движением и ферромагнетик или феррит превращаются в парамагнетик.

Температурный коэффициент магнитной проницаемости $TK\mu$ в соответствии с рис. 1.4 является знакопеременной величиной в зависимости от температуры (положительный на 1 участке и отрицательный на 2 участке)

$$TK\mu = \frac{d\mu}{\mu dT} \approx \frac{2}{\mu_1 + \mu_2} \frac{\mu_1 - \mu_2}{T_1 - T_2} \quad (1.4)$$

2. Проводниковые материалы

Проводниками называют вещества, основным электрическим свойством которых является высокая электропроводность, т.е. способность хорошо проводить электрический ток.

В качестве проводников электрического тока могут использоваться твердые и жидкие вещества, а при некоторых условиях и газы. Но наибольшее применение получили твердые проводниковые материалы, подразделяющиеся на 3 группы:

1. Металлы и сплавы с высокой проводимостью;
2. Металлы и сплавы с высоким сопротивлением;
3. Металлы и сплавы различного назначения.

Первая группа используется для изготовления проводов, жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов, вторая группа — для изготовления резисторов, нитей ламп накаливания, спиралей нагревательных приборов, третья — для изготовления термомпар, тензометрических датчиков, для пайки, для изготовления защитных оболочек и т.д.

Сплавом называется механическая или химическая смесь не менее двух металлов.

Параметром, определяющим способность материала проводить электрический ток под действием приложенного напряжения, является удельная электрическая проводимость γ (в дальнейшем для краткости — проводимость). Проводимость металлов и сплавов значительно превосходит проводимость диэлектриков и полупроводников, что наглядно иллюстрируется с помощью энергетической диаграммы зонной теории твердых тел. Согласно данной теории, в изолированном атоме энергия электронов может меняться лишь скачками, характеризуясь набором дискретных уровней. Часть этих уровней заполнена электронами в нормальном, невозбужденном состоянии атома, на других уровнях электроны могут находиться после внешних энергетических воздействий (возбужденный атом). Это иллюстрируется энергетической диаграммой, приведенной на рис.2.1, (а — для атомов диэлектриков, б — для атомов полупроводников, в — для атома металлов и сплавов).

Для атомов диэлектриков и полупроводников характерно наличие так называемой запрещенной зоны ($\Delta W > 0$), вследствие чего перевод электронов из валентной зоны в зону проводимости возможен лишь за счет внешних воздействий. Если величина ΔW невелика (рис.2.1,б), то для перехода электронов в зону проводимости требуется сравнительно небольшое внешнее воздействие, например, за счет усиления теплового движения атомов при повышении

температуры. Такой материал относится к полупроводникам. При более широкой запрещенной зоне теплового возбуждения уже недостаточно для перевода валентных электронов в зону проводимости (рис.2.1,а).

Для проводников валентная зона вплотную прилегает к зоне проводимости. Ввиду этого в объеме металла образуется так называемый «электронный газ», наличие которого обусловлено переходом от каждого атома металла в свободное состояние одного-двух электронов. Поэтому в металлах и сплавах наблюдается высокая концентрация свободных электронов, что объясняет их высокую проводимость. Механизм прохождения тока в проводниках обусловлен дрейфом свободных электронов под действием электрического поля.

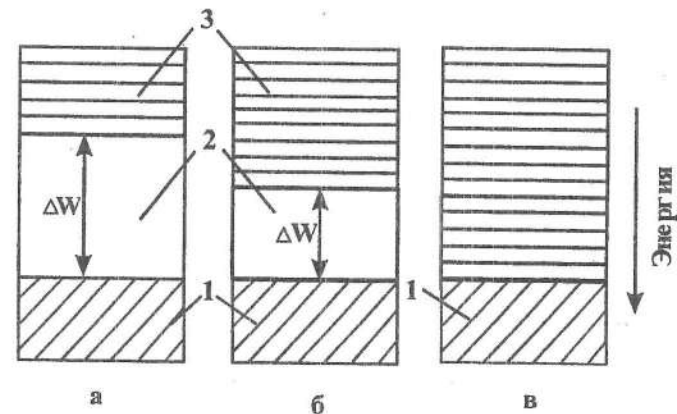


Рисунок 2.1. Энергетические диаграммы материалов: а — диэлектрики; б — полупроводники; в — проводники. 1 — заполненная электронами валентная зона; 2 — запрещенная зона; 3 — зона свободных энергетических уровней (свободная зона)

К важнейшим электрическим свойствам проводников относятся:

1. Удельная электрическая проводимость γ [$1/\text{Ом}\cdot\text{м} = \text{См}(\text{Сименс})$] или обратная ее величина — удельное сопротивление ρ [$\text{Ом}\cdot\text{м}$];

2. Температурный коэффициент удельного сопротивления α_p [$1/^\circ\text{C}$]. На практике вначале оценивают полное сопротивление образца R . Далее рассчитывается значение ρ :

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad [\text{Ом}\cdot\text{м}] \quad (2.1)$$

где S — сечение образца, м^2 ;

l —длина образца, м.

При $S=1$ и $l=1$ получаем $\rho=R$, т.е. удельное сопротивление равно полному сопротивлению образца в форме куба с ребром 1 м.

Согласно классической теории металлов величина γ в зависимости от различных факторов описывается выражением:

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m v_m} \quad [1/\text{Ом}\cdot\text{м}] \quad (2.2)$$

где e —заряд электрона, [Кл];

n_0 —концентрация свободных электронов в единице объема, $[1/\text{м}^3]$;

λ —длина свободного пробега электрона (расстояние, которое проходит электрон, от одного столкновения до другого), [м];

v_m —средняя скорость теплового движения свободных электронов в металле, [м/с];

m —масса покоя электрона, [кг].

При одинаковых температурах величины v_m и n_0 для различных металлов практически неизменны. Поэтому γ и ρ , в основном, определяются величиной λ . Чистые металлы имеют правильную кристаллическую решетку и наибольшее расстояние между ионами. В сплавах, состоящих из двух или нескольких металлов, кристаллическая решетка имеет неправильную форму из-за внедрения ионов одного металла в кристаллическую решетку другого, вследствие этого средняя величина λ для сплавов меньше, что приводит к увеличению их ρ по сравнению с чистыми металлами.

Увеличение температуры не приводит к росту концентрации электронов n_0 , но увеличивает амплитуды колебаний закрепленных ионов, что обуславливает увеличение вероятности столкновения электронов с ионами. Это приводит к снижению их средней скорости направленного дрейфа и уменьшению γ (увеличению ρ , рис.2.2).

Степень изменения ρ при увеличении температуры характеризуется коэффициентом α_ρ , который в узком интервале температур определяется выражением

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_0} \frac{(\rho_t - \rho_0)}{(t - t_0)} \quad (2.3)$$

где ρ_0 —удельное сопротивление при температуре t_0 ;

ρ_t —текущее значение ρ , измеренное при температуре t .

Так как с ростом температуры наблюдается рост ρ металлов и сплавов, величина α_ρ больше нуля, причем для металлов относительное изменение ρ выше, чем для сплавов (рис. 2.3). Более того, для сплавов величина α_ρ может приобретать небольшое

отрицательное значение (т.е. с ростом температуры у сплавов может наблюдаться снижение ρ). Это объясняется тем, что вследствие более сложной структуры сплавов по сравнению с чистыми металлами изменение проводимости γ сплавов обуславливается не только изменением подвижности электронов, но иногда и частичным возрастанием концентрации электронов при повышении температуры. Сплав, у которого уменьшение подвижности электронов с ростом температуры компенсируется возрастанием их концентрации, будет иметь нулевой α_ρ .

При контакте двух различных металлов (сплавов) между свободными концами возникает контактная разность потенциалов. Это обуславливается тем, что концентрация свободных электронов (и давление электронного газа) у разных металлов и сплавов неодинаковы. Определенную роль имеют также разные значения

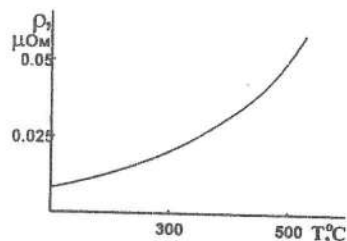


Рисунок 2.2. Зависимость изменение $\rho=f(T)$ для меди

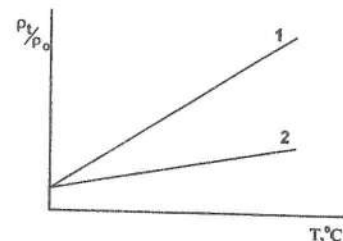


Рисунок 2.3. Относительное $\rho/\rho_0=f(T)$ для металлов (1) и сплавов (2)

работы выхода электронов из металлов, т.е. энергии, которую необходимо передать электрону для его выхода из металла.

Из-за направленной диффузии электронов один из проводников заряжается положительно, другой отрицательно. Величина контактной разности потенциалов U_{AB} между свободными концами металлов А и В равна:

$$U_{AB} = U_B - U_A = \frac{k\Delta T}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (2.4)$$

где $K=1,3 \times 10^{-23}$ [Дж/К]—постоянная Больцмана;

$e=1,6 \times 10^{-19}$ [Кл]—заряд электрона;

T —абсолютная температура, [К];

n_{0A} и n_{0B} соответственно, концентрация электронов в металлах А и В, $[1/\text{м}^3]$.

Если замкнуть между собой обе пары концов различных металлов, то при одинаковой температуре сумма разностей

потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Если же температура замкнутых концов неодинакова, в цепи возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), под действием которой в паре возникает направленный дрейф электронов. При включении в цепь милливольтметра последний покажет разность потенциалов U :

$$U = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_{oA}}{n_{oB}} \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) показывает, что величина термо-ЭДС является функцией разности температур концов так называемой термопары, что, позволяет использовать такое устройство для измерения температур. Контакт между металлами обеспечивается их сваркой.

3. Полупроводниковые материалы.

Полупроводник это вещество, основным свойством которого является сильная зависимость его электропроводности от воздействия внешних факторов.

К полупроводникам относится 12 простых веществ - бор, углерод, кремний, фосфор, сера, германий, мышьяк, серое олово, сурьма, теллур, йод (простые полупроводники). Полупроводникам являются также бинарные соединения: $A^I B^{III}$ (AgCl и др.), $A^{II} B^{VI}$ (CdS и др.), $A^{III} B^V$ (InSb и др.), $A^{IV} B^{IV}$ (SiC и др.), $A^I B^{VI}$ (CuS и др.) где A^i - элемент i -й группы и B^j - элемент j -й группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева.

К полупроводникам относятся также твердые растворы (InCaSb), (GaAsP) и др., которые образуют группу сложных полупроводников. Основные положения зонной теории твердых тел, а также классификация веществ по электрическим свойствам приведена во втором разделе (проводники).

В полупроводниках при температуре, отличной от абсолютного нуля, при освещении, а также при других внешние энергетических воздействиях некоторое число электронов может приобрести энергию, достаточную для преодоления запрещенной зоны и перейти из валентной зоны в зону проводимости. При этом в валентной зоне освобождаются некоторые уровни и возникают "дырки", переносящие положительный заряд.

Энергия, которую необходимо сообщить электрону для перехода его из валентной зоны в зону проводимости, называется энергией активации (ΔW). Электроны и "дырки" являются носителями зарядов в полупроводниках. В зависимости от типа носителей зарядов электропроводность в полупроводниках может быть либо электронной, либо дырочной. Полупроводники, у которых преобладает электронный характер электропроводности называют полупроводниками n - типа, а те, у которых преобладает дырочный характер электропроводности называют полупроводниками p - типа.

С точки зрения механизма образования свободных носителей заряда полупроводники можно разделить на собственные и примесные.

К собственным полупроводникам относятся материалы с идеальной периодической кристаллической решеткой и не содержащие примесей. В этом случае электроны в зону проводимости переходят из валентной зоны, в которой образуется соответствующее число "дырок" (рис. 3.1а).

К примесным полупроводникам относятся материалы, имеющие дефекты кристаллической решетки, которые образуют локальные энергетические уровни в запрещенной для идеального кристалла зоне (рис. 3.1б,в).

Дефект решетки, в котором в невозбужденном состоянии локальный уровень занят электронами и при возбуждении способен отдавать электрон в зону проводимости, называется донором, а примесь, атомы которой являются донорами, называется донорной (рис. 3.1, б).

Дефект решетки, в котором в невозбужденном состоянии существует незанятый электронами локальный уровень и при возбуждении способен захватить электрон из валентной зоны, называется акцептором, а примесь атомы которой являются акцепторами, называется акцепторной (рис. 3.1, в)

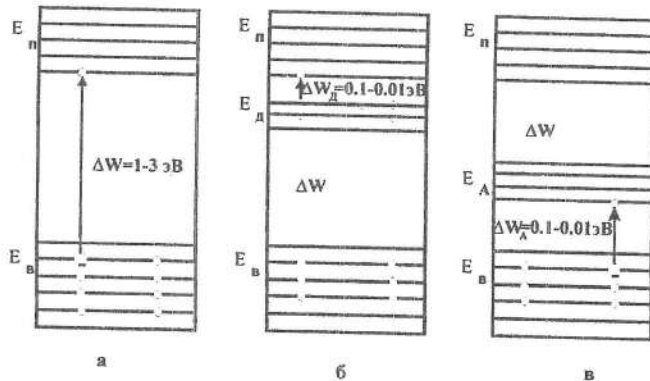


Рисунок 3.1. а) собственный полупроводник; б) и в) примесные полупроводники; б) электронный (*n* - типа), в) дырочный (*p* - типа полупроводники); E_d - уровни донорной примеси, ΔW_d - энергия активации доноров, E_A - уровни акцепторной примеси, ΔW_A - энергия активации акцепторов.

В полупроводниках при $T=0$ К и в отсутствие других внешних воздействий электроны и "дырки" проводимости отсутствуют. При повышении температуры в зависимости от типа полупроводника начинаются переходы электронов с донорных уровней в зону проводимости, из валентной зоны на акцепторные уровни, из валентной зоны в зону проводимости.

Электропроводность полупроводников, обусловленная активацией атомов донорной и (или) акцепторной примесей (при любом способе возбуждения), называют примесной электропроводностью. Электропроводность полупроводника,

обусловленная генерацией пар (возникновение пары: электрон проводимости "дырка" проводимости в результате воздействия тепла, света, электрического поля, ионизирующего излучения и т.п.) называется собственной электропроводностью.

Удельная электропроводность полупроводника определяется концентрацией и подвижностью свободных носителей заряда.

В общем случае удельная электропроводность полупроводника может быть найдена из выражения:

$$\gamma = \bar{n}e\mu_n + \bar{p}e\mu_p \quad (3.1)$$

где γ - удельная электропроводность; n и p - равновесные концентрации свободных носителей заряда (электронов и "дырок" соответственно); μ_n и μ_p - подвижности свободных носителей заряда; e - заряд электрона ("дырки"). Концентрация свободных носителей заряда зависит от температуры:

$$n = A \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (3.2)$$

где n - концентрация свободных носителей заряда (электронов в зоне проводимости и (или) "дырок" в валентной зоне); A - константа, зависящая от свойств полупроводника; K - постоянная Больцмана; T - температура в градусах Кельвина.

С ростом температуры подвижность носителей зарядов уменьшается. Это обусловлено рассеянием их на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки:

$$\mu \equiv T^{3/2} \quad (3.3)$$

Учитывая зависимость концентрации и подвижности носителей заряда от температуры, удельная электропроводность полупроводника может быть найдена из выражения:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (3.4)$$

где γ_0 - условная электропроводность полупроводника при $T \rightarrow \infty$.

Типичная зависимость электропроводности полупроводников от температуры приведена на рис. 3.2,а.

Возрастание электропроводности полупроводников с повышением температуры происходит вследствие того, что скорость роста концентрации носителей зарядов больше, чем скорость уменьшения их подвижности.

При исследовании температурной зависимости электропроводности полупроводников часто на практике пользуются

не величиной электропроводности, а величиной электрического сопротивления полупроводника

$$R_t = R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right) = R_0 \exp\frac{B}{T}, \quad (3.5)$$

где R_0 —условное сопротивление полупроводника при $T \rightarrow \infty$, $B = \Delta W / 2k$ - коэффициент температурной чувствительности, характеризующей физические свойства полупроводника.

Электропроводность полупроводников зависит также от напряженности электрического поля (рис. 3.2,б).

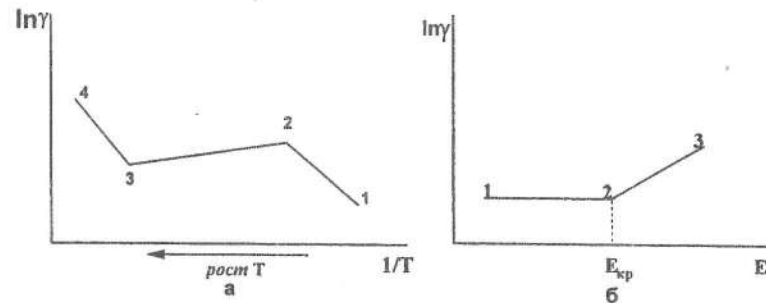


Рисунок 3.2. Зависимость электропроводности полупроводников от: а) температуры; б) напряженности электрического поля.

Минимальная напряженность электрического поля (E_K), при которой начинается заметная зависимость подвижности и концентрации носителей заряда от напряженности электрического поля, называется критической. Величина критической напряженности (E_K) зависит от природы полупроводника, температуры и концентрацией примесей.

Электрические поля, при которых подвижность или концентрация носителей зарядов зависят от напряженности, называют сильными.

При напряженности поля выше критической закон Ома уже не выполняется, т.е. величина плотности тока не будет пропорциональна напряженности поля. Для большинства полупроводников величина E_K лежит в пределах 10^6 В/м и лишь для селена $E_K \approx 10^3$ В/м.

Изменение подвижности носителей зарядов, с увеличением напряженности поля, для большинства полупроводников незначительно.

Концентрация же носителей заряда существенно возрастает и для некоторых полупроводников подчиняется закону Френкеля.

$$n = n_0 \exp \beta \sqrt{E}, \quad (3.6)$$

где n_0 - концентрация носителей заряда при $E < E_K$; β - коэффициент нелинейности; E - напряженность электрического поля.

Если свободный электрон под действием внешнего электрического поля приобретает энергию, достаточную для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, то возможна ударная ионизация.

Электропроводность полупроводника в зависимости от напряженности электрического поля находится из выражения:

$$\gamma = \gamma_0 \exp \beta \sqrt{E}, \quad (3.7)$$

где γ_0 - электропроводность при $E < E_K$.

Полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании зависимости электропроводности (сопротивления) полупроводника от напряженности электрического поля, называется варистором.

В качестве материала для изготовления варисторов используют карбид кремния ($CH1$) и селен ($CH2$).

Варисторы получили широкое применение в технике для защиты элементов маломощной и низковольтной аппаратуры от перенапряжений, стабилизации напряжения, преобразования частоты, в счетно-решающих устройствах и т.д.

4. Диэлектрики

4.1. Электропроводность диэлектриков

Электропроводность—это свойство вещества проводить под действием не изменяющегося во времени электрического поля, не изменяющийся во времени электрический ток.

Все диэлектрические материалы при приложении постоянного напряжения пропускают обычно весьма незначительный ток проводимости, обусловленный направленным переносом (дрейфом) свободных носителей электрического заряда. В зависимости от типа носителей зарядов в диэлектриках могут наблюдаться следующие виды электропроводности: электронная—носители зарядов электроны, ионная—носители зарядов ионы, молионная—носители зарядов молионы (группы заряженных молекул).

В газообразных диэлектриках наблюдается электропроводность электронного и ионного типов. В жидких диэлектриках проявляется, в основном, ионная и молионная электропроводность. В твердых диэлектриках проявляется, в основном, ионная электропроводность. В некоторых случаях в твердых и жидких диэлектриках может наблюдаться электронный тип проводимости. Например, в титаносодержащих керамических материалах в обычных условиях, а также во всех диэлектриках при высокой напряженности электрического поля (в предпробивном состоянии).

Если к диэлектрику приложено электрическое поле напряженностью E , то на частицу с зарядом q действует сила $F=qE$. При этом, в соответствии с направлением электрического поля, перенос свободных заряженных частиц происходит со средней скоростью $V=\chi E$, где χ —подвижность носителя заряда.

Подвижность представляет собой среднюю дрейфовую скорость, приобретаемую частицей при единичной напряженности электрического поля. Величина подвижности зависит от типа заряженных частиц, строения диэлектрика и его состояния, определяемого, в основном, температурой. Плотность тока проводимости равна:

$$j = \sum_{i=1}^m |q_i| n_i V_i = \sum_{i=1}^m |q_i| n_i \chi_i E \quad (4.1)$$

где m —число типов свободных носителей электрического заряда, имеющих в данном материале в заданных условиях;

n_i —концентрация свободных носителей заряда i —го типа.

В соответствии с законом Ома $j=\gamma E$, где γ —удельная

электрическая проводимость. Из выражения (4.1) видно, что:

$$\gamma = \sum_{i=1}^m |q_i| n_i \chi_i \quad (4.2)$$

Так как величина зарядов частиц q_i является константой, то электрическая проводимость зависит от концентрации носителей заряда и их подвижности.

Ток в диэлектрике со временем приложения постоянного напряжения постепенно уменьшается (рис. 4.1). В области 1 полный ток I состоит из двух составляющих—тока абсорбции $I_{абс}$ и сквозного тока диэлектрика $I_{скв}$. Причиной тока абсорбции является медленно устанавливающиеся виды поляризации (релаксационная, миграционная), а также зарядка геометрической емкости Ток абсорбции спадает до нуля после установления этих видов поляризации. Сквозной ток диэлектрика представляет собой постоянную составляющую полного тока и обусловлен переносом свободных носителей заряда. Величина сквозного тока не зависит от длительности приложения напряжения. В области 2 ток абсорбции равен нулю и полный ток равен сквозному току диэлектрика. Электрическая проводимость диэлектриков определяется сквозным током.

Ток в диэлектрике может протекать по двум путям—через объем диэлектрика (объемный ток I_v) и по поверхности диэлектрика (поверхностный ток I_s). Соответственно этим токам различают объемную (G_v) и поверхностную (G_s) электрические проводимости.

Сравнение различных диэлектриков по их электропроводности проводится по величинам удельной объемной (γ_v) и удельной поверхностной (γ_s) электрических проводимостей или, соответственно, по величинам удельного объемного (ρ_v) и удельного поверхностного (ρ_s) электрических сопротивлений.

Удельная объемная электрическая проводимость диэлектрика равна отношению плотности объемного тока к напряженности электрического поля и измеряется в См/м. Ее можно представить как объемную проводимость куба диэлектрика с ребром в 1 м.

Удельная поверхностная электрическая проводимость равна поверхностной проводимости плоского участка поверхности твердого диэлектрика в форме квадрата (любого размера) при протекании электрического тока между двумя противоположными сторонами этого квадрата. Измеряется удельная поверхностная проводимость в сименсах (См).

В технике чаще используют величины, обратные γ_v и γ_s —удельное объемное и удельное поверхностное сопротивления.

Удельное объемное электрическое сопротивление определяется по выражению:

$$\rho_v = 1/\gamma_v = R_v \frac{S}{h} = \frac{US}{I_v h} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}, \quad (4.3)$$

где R_v —объемное сопротивление образца, определяемое по закону Ома;

U —напряжение, приложенное к образцу;

I_v —объемный сквозной ток (за сквозной ток принимается значение тока, спустя одну минуту после подачи напряжения на образец);

S —площадь измерительного электрода;

h —толщина образца.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление:

$$\rho_s = 1/\gamma_s = R_s \frac{b}{l} = \frac{Ub}{I_s l} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}, \quad (4.4)$$

где I_s —поверхностный сквозной ток;

b —длина электродов, расположенных на поверхности диэлектрика параллельно друг другу на расстоянии l .

Если обращенные друг к другу кромки электродов на поверхности диэлектрика имеют вид двух concentрических окружностей, то:

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln D/d} = \frac{2U\pi}{I_s \ln D/d} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}, \quad (4.5)$$

где D и d —соответственно диаметры измерительного и высоковольтного электродов.

Объемная и поверхностная электрические проводимости диэлектриков зависят как от структуры диэлектриков, так и от эксплуатационных факторов: температуры, наличия влаги, напряженности электрического поля.

Увеличение температуры приводит к возрастанию тепловых флуктуаций частиц, вследствие повышения их тепловой энергии (kT). Тепловые флуктуации приводят к диссоциации некоторых молекул или вырыванию слабозакрепленных ионов из узлов решетки. Увеличение концентрации свободных ионов и их подвижности при повышении температуры идет по экспоненциальному закону.

На основании выражения (4.1) этот же закон будет описывать и температурную зависимость удельной электрической проводимости твердых и жидких диэлектриков (рис. 4.2). В сравнительно узком интервале температуры:

$$\gamma_v = A \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (4.6)$$

где A —постоянная материала;

W —энергия активации носителя заряда, представляющая собой среднюю энергию, необходимую для образования свободного иона и его переноса;

k —постоянная Больцмана;

T —температура диэлектрика в градусах Кельвина.

Логарифм выражения (4.6) представляет уравнение прямой линии $\ln \gamma_v = f(1/T)$:

$$\ln \gamma_v = \ln A - \frac{W}{kT} = \ln A - \frac{B}{T} \quad (4.7)$$

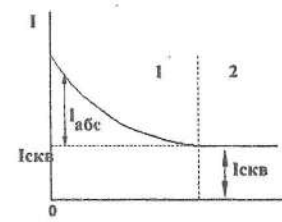


Рисунок 4.1. Изменение тока в диэлектрике после подключения постоянного напряжения

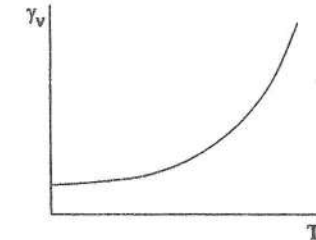


Рисунок 4.2. Зависимость удельной электрической проводимости диэлектриков от

Угол наклона этой прямой к оси абсцисс определяется значением W .

В объеме технических диэлектриков, как правило, присутствуют примеси (окислы металлов, соли, остатки не прореагировавших мономеров, влага и т.п.). Примеси приводят к появлению в диэлектриках слабо связанных ионов и легко диссоциирующих молекул. В связи с этим в твердых и жидких диэлектриках электрическая проводимость может быть двух видов—примесная и собственная. В этом случае:

$$\gamma_v = A \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) + A_{np} \exp\left(-\frac{W_{np}}{kT}\right) \quad (4.8)$$

Энергия активации примесной проводимости W_{np} существенно меньше энергии активации собственной проводимости W , поэтому в широком интервале температур зависимость $\ln \gamma_v = f(1/T)$ в

соответствии с уравнением (4.8) состоит из двух прямолинейных участков с различными значениями угла наклона к оси абсцисс (рис. 4.3).

Высокотемпературный участок 2 характеризует собственную проводимость, а низкотемпературный участок 1—примесную.

В термопластичных полимерных материалах перелом в зависимости $\ln \gamma_v = f(1/T)$ наблюдается также при переходе полимера из стеклообразного состояния в высокоэластическое (размягченное) состояние. Увеличение проводимости в высокоэластическом состоянии происходит за счет увеличения подвижности носителей зарядов.

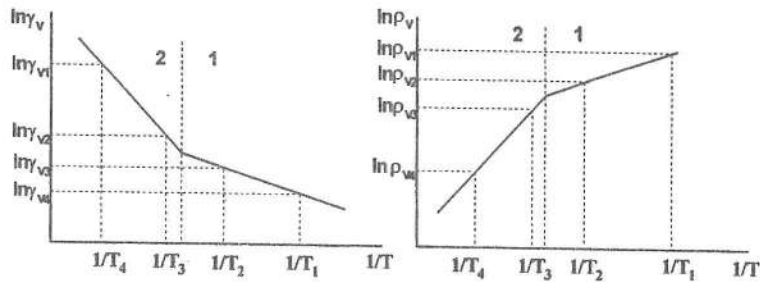


Рисунок 4.3. Зависимости $\ln \gamma_v$ и $\ln \rho_v$ от величины $1/T$

По зависимостям, приведенным на рис. 4.3, можно определить энергию активации примесных (участок 1) и собственных носителей зарядов (участок 2). Например, на участке 2 выделяется два значения логарифма удельной объемной проводимости ($\ln \gamma_{v4}$ и $\ln \gamma_{v3}$) при значениях обратных температур $1/T_4$ и $1/T_3$. Для выделенных точек

$$\ln \gamma_{v4} = \ln A - \frac{W}{kT_4} \quad (4.9)$$

$$\ln \gamma_{v3} = \ln A - \frac{W}{kT_3} \quad (4.10)$$

Разность между (4.10) и (4.9) дает энергии активации (4.11)

$$W = \frac{kT_3 T_4 (\ln \gamma_{v3} - \ln \gamma_{v4})}{T_3 - T_4} \quad (4.11)$$

Аналогично определяется энергия активации примесных носителей зарядов, только используются значения $\ln \gamma_v$ (или $\ln \rho_v$) низкотемпературной области 1.

Большое влияние на электропроводность диэлектриков оказывает их увлажнение. Присутствие в диэлектрике даже малого количества влаги увеличивает электрическую проводимость его на несколько

порядков. Это объясняется тем, что сильно полярные молекулы воды и растворимые в воде примеси легко диссоциируют на ионы. Влага способствует также диссоциации молекул основного вещества диэлектрика. Результатом процессов является рост концентрации свободных носителей зарядов.

Температурная зависимость объемной проводимости увлажненного диэлектрика имеет более сложный характер в сравнении с сухим диэлектриком (рис. 4.4). В области 1 объемная

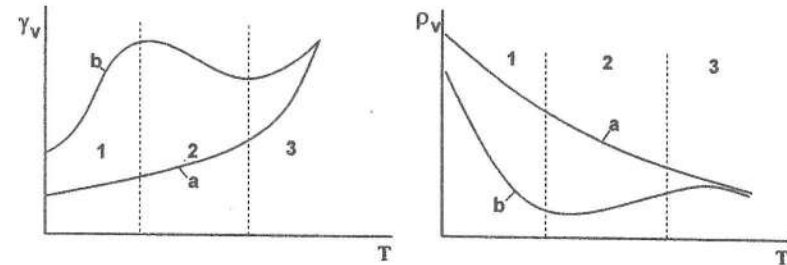


Рисунок 4.4. Зависимости γ_v и ρ_v от температуры для сухого (кривая а) и увлажненного (кривая б) диэлектриков.

электрическая проводимость увлажненного диэлектрика растет при повышении температуры более резко, чем сухого. Это обусловлено большим ростом концентрации свободных носителей зарядов за счет диссоциации молекул воды. В то же время, повышение температуры увеличивает интенсивность испарения влаги из диэлектрика (сушка). В области 2 может наблюдаться уменьшение объемной проводимости за счет преобладания процесса испарения влаги над процессом диссоциации молекул. Интенсивность сушки зависит от температуры и степени увлажнения диэлектрика.

По мере высыхания увлажненного диэлектрика, его объемная проводимость приближается к объемной проводимости сухого диэлектрика. В области 3 диэлектрик становится практически сухим и рост

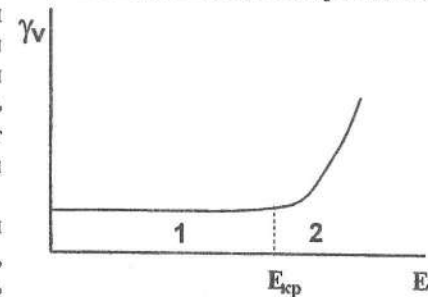


Рисунок 4.5. Зависимость удельной электрической проводимости твердых и жидких диэлектриков от напряженности электрического поля

его объемной проводимости объясняется процессами, характерными для сухих диэлектриков.

Зависимость удельной электрической проводимости твердых и жидких диэлектриков от напряженности электрического поля E приведена на рис. 4.5. При напряженности электрического поля меньше $E_{кр}$ (область 1) соблюдается закон Ома, когда плотность тока растет прямо пропорционально E . Для разных диэлектриков значения $E_{кр}$, как правило, находятся в пределах 10-100 МВ/м. При напряженности $E > E_{кр}$ (область 2) увеличивается концентрация свободных носителей зарядов за счет ионизационных процессов, возникает электронная проводимость. В области 2 γ , при повышении E растет обычно по экспоненциальному закону.

Удельная поверхностная проводимость диэлектриков, как правило, на 1-2 порядка выше удельной объемной проводимости и сильно зависит от состояния поверхности.

Увлажнение и загрязнение поверхности приводят к увеличению свободных носителей зарядов и γ_s . Наиболее резкое увеличение поверхностной проводимости при этом наблюдается у полярных диэлектриков, так как они лучше смачиваются водой (обладают меньшим краевым углом смачивания). Кроме этого, к поверхности полярных диэлектриков легче прилипают различные загрязнения, также приводящие к повышению поверхностной проводимости.

Наличие на поверхности любого диэлектрика пор и трещин способствует скоплению на поверхности загрязнений и влаги, образованию на поверхности проводящих участков и повышению поверхностной проводимости.

Характер изменения удельной поверхностной проводимости или удельного поверхностного сопротивления от различных факторов (температуры, влажности, величины и времени воздействия напряжения) сходен с характером изменения соответственно удельной объемной электрической проводимости и удельного объемного электрического сопротивления.

4.2. Поляризация диэлектриков

Диэлектрик—это вещество, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле.

Под электрической поляризацией понимают состояние вещества, характеризуемое тем, что электрический момент данного объема этого вещества имеет значение, отличное от нуля.

Различают следующие основные виды поляризации: электронная поляризация, ионная поляризация, дипольная поляризация,

миграционная поляризация, спонтанная поляризация, доменная поляризация. Спонтанная и доменная поляризации проявляются только в сегнетоэлектриках.

По механизму установления эти виды поляризации могут быть упругими со временем установления $\tau = 10^{-12} - 10^{-15}$ с и неупругими со временем установления $\tau = 10^{-9} - 10^3$ с и более. Неупругие виды поляризации являются медленными, время их установления очень сильно зависит от температуры, уменьшаясь с ростом температуры. Неупругие виды поляризации являются релаксационными, так как для них характерно отставание поляризации от действия приложенного электрического поля.

К упругим видам поляризации относятся:

1. Электронная поляризация.
2. Ионная поляризация.
3. Дипольная поляризация.

К релаксационным видам поляризации относятся:

1. Ионно—релаксационная поляризация.
2. Дипольно—релаксационная поляризация.
3. Миграционная поляризация.
4. Спонтанная поляризация.
5. Доменная поляризация.

Если к диэлектрику приложить внешнее электрическое поле напряженностью E , то под действием сил поля в нем произойдет поляризация, т.е. смещение заряженных частиц, из которых состоят атомы и молекулы вещества, на расстояние, соизмеримое с размерами этих частиц. При этом в каждом атоме и молекуле вещества будет индуцирован электрический момент μ , величина которого равна:

$$\mu = \alpha E, \quad (4.12)$$

где E —напряженность действующего поля в диэлектрике;

α —поляризуемость частицы диэлектрика.

Поляризуемость характеризует способность частицы диэлектрика к электрической поляризации и равна отношению электрического момента частицы μ , индуцированного действующим электрическим полем, к напряженности этого поля E .

Если в единице объема диэлектрика содержится n молекул, тогда электрический момент P , индуцированный в этом объеме, можно рассчитать по уравнению:

$$P = n\mu = n\alpha E \quad (4.13)$$

Величина электрического момента единицы объема диэлектрика P называется поляризованностью, является векторной величиной, характеризующей степень электрической поляризации вещества, и

равна пределу отношения электрического момента некоторого объема вещества- к этому объему, когда последний стремится к нулю.

В результате поляризации диэлектрика на его противоположных поверхностях образуются разноименные заряды с поверхностной плотностью σ , которые создадут внутреннее поле в объеме диэлектрика напряженностью $E_{вн}$, направленное встречно внешнему полю E_0 .

$$E_{вн} = 4\pi\sigma \quad (4.14)$$

Таким образом, после установления различных видов поляризации, в объеме диэлектрика будет действовать среднее макроскопическое поле с напряженностью $E_{ср}$

$$E_{ср} = E_0 - 4\pi\sigma \quad (4.15)$$

Для диэлектрика, находящегося в электрическом поле, образованном двумя плоско-параллельными пластинами конденсатора, справедливо равенство

$$\sigma = P \quad (4.16)$$

Следовательно, используя уравнения (4.15) и (4.16), имеем:

$$E_{ср} = E_0 - 4\pi\sigma = E_0 - 4\pi P \quad (4.17)$$

Способность диэлектриков поляризоваться может быть оценена макроскопической характеристикой—величиной относительной диэлектрической проницаемости ϵ :

$$\epsilon = \frac{E_0}{E_{ср}} = \frac{E_0}{E_0 - 4\pi P} = \frac{C}{C_0}, \quad (4.18)$$

где C_0 —емкость конденсатора, между пластинами которого находится вакуум;

C —емкость этого же конденсатора, заполненного диэлектриком.

Как следует из уравнения (4.18), наличие различных видов поляризации приводит к образованию внутреннего поля в диэлектрике. Чем больше поляризованность диэлектрика, тем больше значение диэлектрической проводимости вещества.

Диэлектрическая проницаемость определяется опытным путем. Самый простой и удобный метод определения ϵ —это измерение емкости конденсатора с диэлектриком. Поведение емкости в температурном и частотном ходе дает информацию о поведении диэлектрической проницаемости, так как емкость прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости.

Поляризация неполярных диэлектриков.

Неполярным является диэлектрик, не содержащий способные к переориентации во внешнем электрическом поле электрические диполи.

В таком диэлектрике проявляется, в основном, только электронная поляризация, обусловленная упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер в диэлектрике (рис. 4.6). Этот вид поляризации является общим для всех

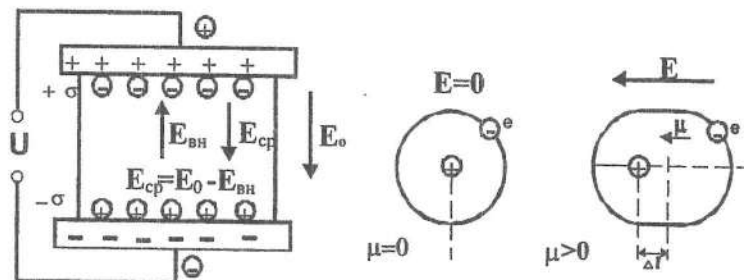


Рисунок 4.6. Механизм образования поляризации упругого смещения электронов во внешнем электрическом поле

диэлектриков и проявляется в них независимо от их состава и агрегатного состояния.

При смещении электронов под действием внешнего электрического поля в каждом атоме или ионе вещества диэлектрика возникает индуцированный электрический момент μ , пропорциональный напряженности действующего поля в диэлектрике E_d . Коэффициент пропорциональности называется электронной поляризуемостью атома или иона:

$$\mu = q\Delta l = \alpha_e E_d \quad (4.19)$$

Время установления этого вида поляризации составляет около 10^{-15} с и, следовательно, в электрическом поле технической или радиочастоты она всегда будет успевать устанавливаться вслед за полем, что обуславливает независимость электронной поляризации от частоты вплоть до оптических частот (рис. 4.7а).

Поляризуемость электронного смещения α_e не зависит от температуры, но вследствие термического расширения число атомов в единице объема вещества n уменьшается, следовательно, будет уменьшаться и поляризованность диэлектрика P (рис. 4.7б)

$$P = \sigma = n\mu = n\alpha_e E_d \quad (4.20)$$

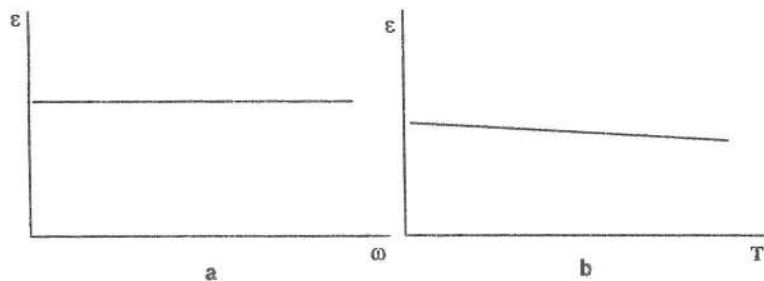


Рисунок 4.7. Частотная (а) и температурная (б) зависимости диэлектрической проницаемости неполярного диэлектрика

Поляризация полярных диэлектриков.

Полярным является диэлектрик, содержащий способные и переориентации во внешнем электрическом поле электрические диполи. Молекулы такого диэлектрика имеют собственный электрический момент:

$$\mu_0 = ql, \quad (4.21)$$

где q —величина одного из зарядов полярной молекулы;

l —расстояние между центрами разноименных зарядов в молекуле.

При отсутствии внешнего электрического поля ориентация электрических моментов полярных молекул в объеме диэлектрика хаотична и направления их поворотов под действием теплового движения равновероятны.

Наложение электрического поля индуцирует дополнительный момент в каждой молекуле и вносит не симметрию в хаотичное направление электрических моментов молекул. В стационарном состоянии, при действии электрического поля, будет наблюдаться некоторый избыток молекул, повернутых в направлении поля. За счет этого в диэлектрике возникает поляризация. Этот вид поляризации замедленного характера, связанный с тепловым движением, носит название дипольно—релаксационной.

Электрический момент, индуцированный в каждой молекуле $\mu_{инд}$, определяется вкладом дипольно-релаксационной α_{dr} и электронной α_e поляризуемости:

$$\mu_{инд} = (\alpha_e + \alpha_{dr})E \quad (4.22)$$

Время установления этого вида поляризации (время релаксации) определяется, в основном, температурой диэлектрика и может изменяться в широких пределах (10^{-8} — 10^3 с). Полная величина диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика складывается из ϵ_∞ —обусловленной упругими видами поляризации и ϵ_{dr} —за счет дипольно-релаксационной поляризации:

$$\epsilon = \epsilon_\infty + \epsilon_{dr} \quad (4.23)$$

Дипольно-релаксационная поляризация проявляется в полярном диэлектрике при такой температуре, когда энергия теплового колебательного движения слабо связанных полярных молекул становится соизмеримой с энергией их закрепления.

Для полярных диэлектриков температурная и частотная зависимости имеют более сложный характер, чем для неполярных. Этот факт связан с наличием в диэлектрике слабо связанных полярных молекул, которые участвуют в дипольно-релаксационной поляризации.

На рисунке 4.8а приведена зависимость диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика от частоты. В области низких частот, когда полярные молекулы успевают ориентироваться вслед за полем—диэлектрическая проницаемость остается постоянной и имеет наибольшее значение, приближаясь к статической диэлектрической проницаемости ϵ_e . При повышенных частотах электрического поля полярные молекулы начинают отставать от поля, т.к. частота их тепловых колебаний становится меньше частоты поля и диполи не успевают ориентироваться при сменах полярности поля. Следовательно, будет падать и значение диэлектрической проницаемости.

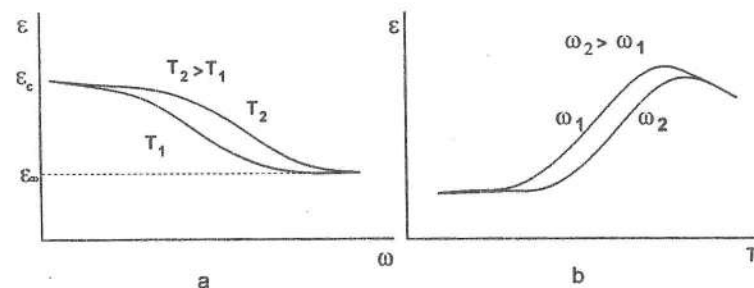


Рисунок 4.8 Частотная (а) и температурная (б) зависимости диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика

На высоких частотах ориентация полярных молекул настолько уменьшается, что дипольно-релаксационная поляризация не происходит и диэлектрическая проницаемость на этих частотах достигает самых низких значений и обусловлена только электронной и дипольной поляризацией.

В температурном ходе диэлектрическая проницаемость проходит через максимум (рис. 4.8б). При низких температурах она определяется лишь электронной поляризацией.

С повышением температуры увеличивается амплитуда колебаний полярных молекул и их частота. И при некоторой температуре частота тепловых колебаний молекул становится равной частоте приложенного электрического поля. В этот момент практически все слабо связанные полярные молекулы успевают ориентироваться по направлению поля и диэлектрическая проницаемость при этой температуре достигает максимального значения. При дальнейшем повышении температуры тепловое движение оказывает дезориентирующее влияние на дипольно-релаксационную поляризацию и диэлектрическая проницаемость начинает уменьшаться.

С ростом частоты максимум ϵ смещается в сторону повышенных температур.

Поляризация ионных диэлектриков.

В ионных диэлектриках с плотной упаковкой молекул наряду с электронной поляризацией наблюдается поляризация упругого смещения ионов, которая заключается в смещении положительных ионов по полю и отрицательных против поля - в пределах упругих сил взаимодействия между ними. Время установления этого вида

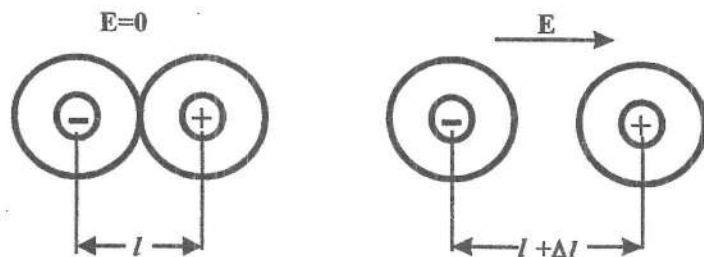


Рисунок 4.9. Механизм образования упругой ионной поляризации.

поляризации, как и для упругой ориентации полярных молекул составляет $10^{-12} + 10^{-13}$ с. (рис. 4.9).

С увеличением температуры ионная поляризуемость α_i растет за счет ослабления упругих связей между ионами. В этом случае поляризованность диэлектрика равна:

$$P = n(\alpha_e + \alpha_i)E_q = nq\Delta l \quad (4.24)$$

Вследствие указанного диэлектрическая проницаемость ионных диэлектриков может слабо увеличиваться или уменьшаться, поскольку ионная поляризация накладывается на электронную. Для диэлектриков сложного состава (титанаты циркония и др.) можно получить ϵ , почти не изменяющуюся с температурой, что очень важно для изготовления конденсаторов, обладающих температурной стабильностью.

В случае, если диэлектрик содержит в своей структуре слабо связанные ионы, то под действием теплового движения они могут перемещаться на расстояния, значительно превышающие величину упругого смещения, преодолевая при этом силы взаимодействия близлежащих ионов. При приложении поля создается преимущественный переброс ионов в направлении действия сил поля. В результате образуется динамическое равновесие, при котором электрический момент единицы объема отличен от нуля.

$$P = n(\alpha_e + \alpha_i + \alpha_r)E_q \quad (4.25)$$

Этот тип поляризации называется ионно-релаксационной, имеет большое время установления (10^3-10^9 с). Наложение ионно-релаксационной поляризации на упругую обуславливает повышенные значения диэлектрической проницаемости (α_r - поляризуемость ионно-релаксационной поляризации).

Миграционная поляризация.

Миграционная поляризация представляет собой электрическую поляризацию неоднородного диэлектрика, обусловленную перераспределением свободных зарядов в его объеме.

Физической основой ее является перемещение слабо связанных ионов по объему диэлектрика на значительные расстояния. Время, необходимое на такие перемещения, достаточно велико, а поэтому миграционная поляризация относится к медленным видам поляризации.

Особенностью перемещения слабо связанных ионов при миграционной поляризации является то, что они не становятся свободными носителями зарядов, доходящими до электродов, т.е.

ионами проводимости. На некоторых расстояниях от первоначального центра теплового колебания происходит закрепление ионов и объединение их в объемные поляризационные заряды.

Миграционная поляризация наблюдается в кристаллических и аморфных неорганических диэлектриках, а также в неоднородных диэлектриках.

Поляризация сегнетоэлектриков.

К сегнетоэлектрикам относятся диэлектрики, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешними воздействиями. Под спонтанной поляризацией понимают электрическую поляризацию, возникающую в сегнетоэлектрике самопроизвольно, без внешних воздействий (без внешнего электрического поля). По строению сегнетоэлектрики могут быть ионными или дипольными. Спонтанная поляризация ионных сегнетоэлектриков обусловлена их особой структурой и является следствием смещения, при некоторой температуре, ионов кристаллической решетки из положений равновесия, в которых дипольный момент равен нулю, в положение, при котором дипольный момент становится больше нуля.

В дипольных сегнетоэлектриках спонтанная поляризация является следствием упорядочения в ориентации электрических диполей.

При возникновении спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках образуются отдельные макрообласти, каждая из которых обладает определенным электрическим моментом. Эти области называют доменами.

Наложение внешнего поля приводит к образованию доменной поляризации, которая представляет собой электрическую поляризацию сегнетоэлектрика и обусловлена преимущественной ориентацией доменов в одном направлении.

В слабых электрических полях доменная поляризация связана с ростом размеров тех доменов, в которых наиболее выгодно ориентированы электрические моменты, за счет смещения границ между доменами. В сильных полях происходит поворот электрических моментов доменов по полю. В результате заполяризованный сегнетоэлектрик становится подобен большому диполю.

Таким образом, сегнетоэлектрики характеризуются ионной, электронной, спонтанной и доменной поляризацией. Диэлектрическая проницаемость их велика $\epsilon=10^2-10^3$, имеет нелинейную зависимость

от напряженности поля и обнаруживает насыщение, связанное с ориентацией электрических моментов доменов.

Увеличение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков с ростом напряженности поля связано с ростом доменной поляризации за счет увеличения размеров доменов, ориентированных по полю, и уменьшение доменов, имеющих противоположную ориентацию. В сильных электрических полях, когда энергия поля становится соизмеримой с энергией закрепления ионов, диэлектрическая проницаемость падает. Это происходит потому, что часть ионов может быть вырвана электрическим полем с места закрепления и, следовательно, домены будут разрушаться (рис. 4.10а).

В температурном ходе диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков имеет ярко выраженный максимум (рис. 4.10б). Температура, при которой он проявляется, называется температурой Кюри (T_K). Рост ϵ обусловлен перестройкой кристаллической структуры вещества при $T=T_K$, в результате которой возникает доменная поляризация в сегнетоэлектриках. При $T>T_K$ тепловое движение частиц становится настолько интенсивным, что структура доменов разрушается, т.е. его электрический момент резко, уменьшается и диэлектрическая проницаемость вещества обуславливается в этом случае только поляризацией электронного и ионного смещения.

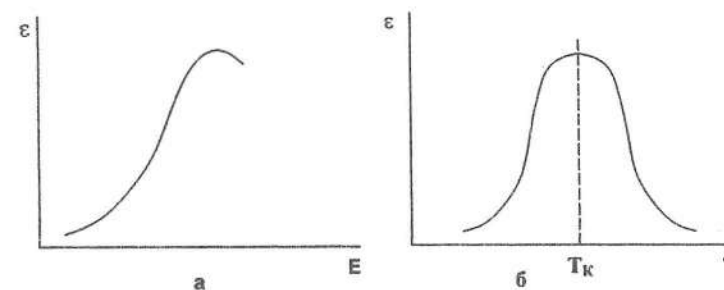


Рисунок 4.10 Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от напряженности поля (а) и температуры (б).

4.3. Диэлектрические потери.

Диэлектрическими потерями называется мощность, выделяющаяся в диэлектрике при воздействии на него электрического поля.

В результате диэлектрик нагревается. Диэлектрические потери могут характеризоваться как величиной рассеянной мощности, так и тангенсом угла диэлектрических потерь. Углом диэлектрических потерь называется угол между векторами полного тока и его емкостной составляющей в векторной диаграмме диэлектрика, находящегося под переменным напряжением.

Согласно рисунку 4.11 тангенс угла диэлектрических потерь можно определить как:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} \quad (4.26)$$

Рассеиваемая в диэлектрике мощность рассчитывается как:

$$P = U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta, \quad (4.27)$$

где U —напряжение (В); ω —круговая частота (рад.); C_x —емкость конденсатора с диэлектриком (Ф); $\operatorname{tg} \delta$ —тангенс угла диэлектрических потерь (определяется всегда опытным путем).

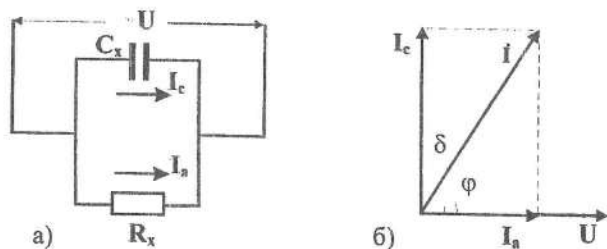


Рисунок 4.11. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма диэлектрика (б).

Различают следующие виды диэлектрических потерь: диэлектрические потери на электропроводность, релаксационные диэлектрические потери, ионизационные диэлектрические потери и диэлектрические потери обусловленные неоднородностью структуры.

В зависимости от структуры веществ природа диэлектрических потерь может быть различна. Так, например, в неполярных диэлектриках диэлектрические потери обусловлены лишь электропроводностью материала. В полярных диэлектриках наличие медленно устанавливающихся видов поляризации является основной причиной появления релаксационных потерь. При высоких напряжениях могут возникать диэлектрические потери,

обусловленные процессом ионизации газовых включений внутри диэлектрика.

4.3.1. Диэлектрические потери в неполярных диэлектриках.

В неполярном диэлектрике тангенс угла диэлектрических потерь обусловлен, в основном, его электрической проводимостью. Диэлектрическими потерями на электропроводность называется часть диэлектрических потерь, обусловленных сквозным током диэлектрика. Плотность сквозного тока в диэлектрике $i_{СКВ}$ равна:

$$i_{СКВ} = i_a = \gamma_l E, \quad (4.28)$$

где $i_{СКВ}$ —удельная электрическая проводимость диэлектрика; E —напряженность внешнего электрического поля.

Емкостная составляющая плотности тока в диэлектрике равна:

$$i_c = \frac{U \omega C_x}{S} = \omega \epsilon \epsilon_0 E, \quad (4.29)$$

где S —площадь обкладок конденсатора (m^2); $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ —электрическая постоянная (Ф/м).

Используя уравнение (4.26), получим:

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{\gamma_l}{\omega \epsilon \epsilon_0} \quad (4.30)$$

Поскольку диэлектрическая проницаемость неполярного диэлектрика мало изменяется в температурном ходе, то зависимость тангенса угла $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрических потерь от температуры будет определяться, в основном, изменением удельной электрической проводимости диэлектрика.

Так как $\gamma_{СКВ}$ экспоненциально возрастает с повышением температуры, то и тангенс угла диэлектрических потерь так же возрастает по экспоненте (рис. 4.12).

При этом, чем выше частота приложенного электрического поля, тем меньше значение имеет тангенс угла диэлектрических потерь.

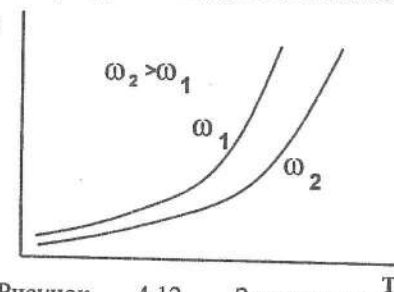


Рисунок 4.12. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь неполярного диэлектрика от температуры.

4.3.2. Диэлектрические потери в полярных и ионных диэлектриках.

В полярных и ионных диэлектриках, содержащих в своей структуре слабо связанные диполи и ионы наблюдается, соответственно, дипольно-релаксационная или ионно-релаксационная поляризация. Эти виды поляризации дают свой вклад в диэлектрические потери, которые называются релаксационными диэлектрическими потерями.

Тангенс угла диэлектрических потерь в полярных диэлектриках с увеличением температуры проходит через максимум. При низких температурах энергия теплового движения диполей настолько мала, что они не в состоянии

преодолеть потенциальный барьер, т.е. дипольно-релаксационная поляризация отсутствует и диэлектрические потери обусловлены только

электропроводностью (рис. 4.13). С повышением температуры частота и амплитуда тепловых

колебаний слабо связанных полярных молекул возрастает, следовательно, поляризация диэлектрика так же увеличивается, что приводит к увеличению затрат энергии на ориентацию диполей. Максимального значения тангенс угла диэлектрических потерь достигает при такой температуре, когда частота тепловых колебаний полярных молекул совпадает с частотой приложенного поля.

При дальнейшем повышении температуры происходит уменьшение тангенса угла диэлектрических потерь, что связано с уменьшением энергии, расходуемой на ориентацию полярных молекул. Все слабо связанные полярные молекулы успевают ориентироваться вслед за полем за счет энергии их теплового движения. Диэлектрические потери в этом случае обусловлены, в основном, электропроводностью как и в неполярном диэлектрике (уравнение 4.30) и увеличиваются с ростом температуры по экспоненциальному закону (рис. 4.13).

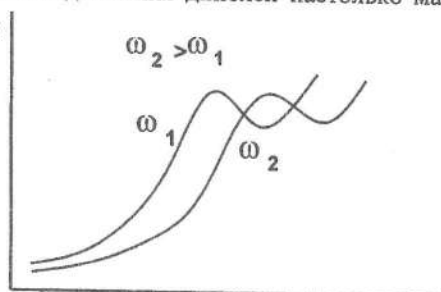


Рисунок 4.13. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь полярного диэлектрика от температуры

Дипольно-релаксационные потери наблюдаются, в основном, в полярных органических диэлектриках - в полиметилметакрилате, полихлорвиниле, полистироле, и т.п.

Тангенс угла диэлектрических потерь диэлектриков с ионно-релаксационной поляризацией имеет в температурном и частотном ходе зависимости, аналогичные наблюдаемых в диэлектриках с дипольно-релаксационной поляризацией. В отличие от дипольно-релаксационных потерь ионно-релаксационные обусловлены смещением слабо связанных ионов. Это смещение происходит под действием энергии их теплового в направлении силы приложенного электрического поля. Ионно-релаксационные потери наблюдаются в неорганических диэлектриках - стеклах, керамике, слюде и т.п.

4.4. Пробой диэлектриков

Явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называется пробоем диэлектрика. В момент пробоя в цепи с диэлектриком течет ток короткого замыкания $I_{кз}$. Явление пробоя можно количественно оценить пробивным напряжением $U_{пр}$ и электрической прочностью $E_{пр}$. Пробивное напряжение $U_{пр}$ — это минимальное приложенное к диэлектрику электрическое напряжение, приводящее к его пробоем. Пробивное напряжение измеряется в Вольтах. Электрическая прочность диэлектрика $E_{пр}$ — это минимальная напряженность внешнего однородного электрического поля, приводящая к пробоем диэлектрика. Измеряется $E_{пр}$ в В/м или МВ/м. Различают четыре вида пробоя:

1. Электрический пробой — пробой обусловленный ударной ионизацией с разрывом связей между частицами диэлектрика непосредственно под действием электрического поля.
2. Тепловой пробой, обусловленный нарушением теплового равновесия диэлектрика, вследствие диэлектрических потерь.
3. Электрохимический пробой — пробой, обусловленный химическими процессами, приводящими к изменениям в диэлектрике под действием электрического поля.
4. Ионизационный пробой — пробой, обусловленный ионизационными процессами, протекающими в газовых включениях диэлектрика

4.4.1. Пробой газов

В газах наблюдается электрический вид пробоя. В них всегда содержится некоторое количество свободных зарядов (электронов, ионов), появляющихся за счет ионизации нейтральных молекул при воздействии внешних ионизаторов - радиационного поля земли, рентгеновских, космических лучей, других ионизирующих излучений. При приложении к газовому промежутку электрического поля между плоскими электродами, создающими однородное электрическое поле, начнет протекать ток за счет направленного дрейфа свободных зарядов. Таким образом, необходимым условием протекания тока в газе является наличие действия внешнего ионизатора. Двигаясь под действием электрического поля, заряженная частица сталкивается с атомами или молекулами газа. Расстояние, которое заряженная частица проходит от одного столкновения до другого, называется длиной свободного пробега заряженной частицы λ .

На этой длине заряженная частица q , разгоняемая электрическим полем с напряженностью E , приобретает энергию W , равную $W=q\lambda E$. При возрастании напряженности электрического поля E энергия движущихся заряженных частиц возрастает, когда энергия достигает значения энергии ионизации молекул или атомов газа $W_{и}$, т.е. той минимальной энергии, при которой возможно расщепление молекул или атомов газа на заряженные частицы, начинается их ударная ионизация. Таким образом, условие появления ударной ионизации в газовом промежутке можно записать следующим образом: $q\lambda E \geq W_{и}$.

В результате процессов ударной ионизации концентрация заряженных частиц в газе резко возрастает. При достаточно большой концентрации заряженных частиц в газе плотность тока в нем достигает высоких значений и практически обеспечивает короткое замыкание между электродами, т.е. наступает электрический пробой газового промежутка. Внешне это проявляется в виде искры или сплошной дуги между электродами. Вероятность пробоя определяется вероятностью появления ударной ионизации в газовом промежутке. Определяющее влияние на ударную ионизацию, а, следовательно, на электрическую прочность газа оказывает длина свободного пробега λ . Величина λ зависит от плотности и числа столкновений заряженной частицы с атомами (молекулами) газа. Давление определяет число столкновений частицы в межэлектродном промежутке. Соответственно, электрическая прочность газа $E_{пр}$ зависит от давления P (рис. 4.14) и от расстояния между электродами d (рис 4.15).

В реальных условиях электрические поля чаще всего являются неоднородными. Неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, между сферическими поверхностями при расстоянии между ними, превышающем радиус сферы. Пример распределения E для такого поля показан на рисунке 4.16.

В неоднородных полях ионизация молекул начинается в местах с максимальной напряженностью электрического поля - E_{max} . У острия, что сопровождается образованием короны с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу, т.е. происходит пробой межэлектродного промежутка. Количественно степень неоднородности электрических полей оценивается коэффициентом неоднородности K_n , который равен отношению максимальной напряженности поля в газовом промежутке - E_{max} к средней напряженности E_{cp} , т.е. $K_n = E_{max}/E_{cp}$. Величина E_{max} оценивается при пробое газа между плоскими электродами, создающими однородное поле, а E_{cp} при пробое в неоднородном поле по формуле $E = U/d$, где U - пробивное напряжение, d - расстояние между электродами.

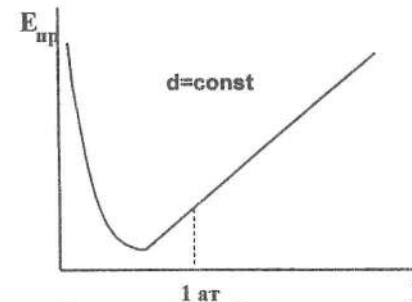


Рисунок 4.14. Зависимость электрической прочности газа от давления

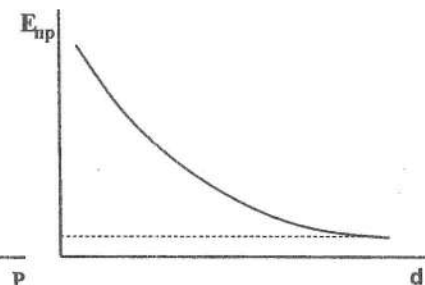


Рисунок 4.15. Зависимость электрической прочности газа от расстояния между электродами.

4.4.2. Пробой жидких диэлектриков.

К жидким диэлектрикам относятся масла: трансформаторное, конденсаторное, кабельное, фторорганическое и кремнийорганические жидкости, хлорированные углеводороды. Различают предельно чистые и технически чистые жидкие диэлектрики, содержащие различные виды загрязнений (влаги, пузырьки воздуха, волокнистые включения, твердые загрязнения).

Электрическая прочность технических жидкостей меньше электрической прочности предельно очищенных жидкостей, мало зависит от структуры молекул самой жидкости, в основном,, определяется видом и количеством примесей и изменяется в пределах от 70 МВ/м до 10 МВ/м.

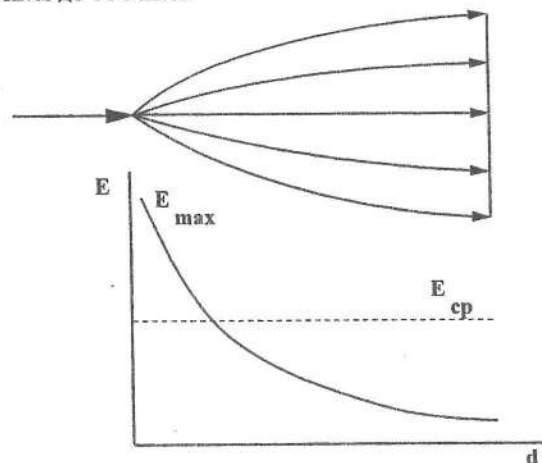


Рисунок 4.16. Зависимость напряженности поля от расстояния между электродами.

В жидких диэлектриках может наблюдаться как тепловой, так и электрический пробой. Тепловой пробой наиболее вероятен в жидкостях, содержащих примеси. Теория теплового пробоя связывает пробой технических жидких диэлектриков с частичным перегревом жидкости и вскипанием ее в местах наибольшего количества примесей, приводящих к образованию газового мостика между электродами.

Электрический пробой жидких диэлектриков наиболее вероятен в предельно очищенных жидкостях и может быть рассмотрен так же как и в газах. Но в жидких диэлектриках за счет большей ее плотности резко уменьшается длина свободного пробега λ электронов, что приводит к существенному повышению ее электрической прочности $E_{пр}$ по сравнению с газами.

На электрическую прочность жидких диэлектриков резкое влияние оказывают твердые и жидкие примеси. Примеси в жидкости подвижны, они способны втягиваться в область большей напряженности и создавать мостики между электродами. Мостики обладают более высокой проводимостью, чем жидкий диэлектрик, т.е. в жидком диэлектрике образуются каналы повышенной

электрической проводимости. Протекание тока по этим каналам приводит к локальному разогреву жидкости и к ее тепловому пробую.

Из описанных выше механизмов пробоя следует, что, электрическая прочность жидких диэлектриков уменьшается с увеличением содержания в них газообразных, жидких и твердых примесей. При многократных пробоях жидкость, как правило, загрязняется за счет образования продуктов ее разложения; но иногда для сильно увлажненных жидкостей может наблюдаться увеличение электрической прочности за счет ее подсушки.

4.4.3. Пробой твердых диэлектриков.

В твердых диэлектриках возможны три вида пробоя: электрический, тепловой, электрохимический. Каждый из указанных видов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля - постоянного или переменного, импульсного низкой или высокой частоты, наличия в

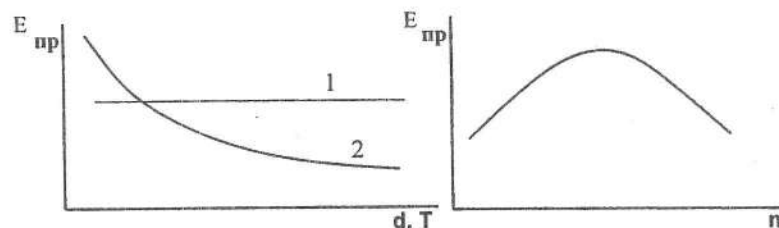


Рисунок 4.17. Зависимость $E_{пр}$ твердого диэлектрика от толщины образца $d(1)$ и температуры $T(2)$ при электрическом пробое. Рисунок 4.18. Зависимость $E_{пр}$ изоляционной бумаги от числа слоев в пакете n .

диэлектрике дефектов, в частности, закрытых пор, условий охлаждения, времени воздействия напряжения. Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует, ионизация газовых включений. В случае однородного поля и полной однородности структуры материала (например, для монокристаллов щелочно-галогидных соединений и некоторых органических полимеров) электрическая прочность его при электрическом пробое не зависит от температуры и толщины диэлектрика (рис.4.17).

Технические твердые диэлектрики в большинстве своем содержат в объеме газовые включения, влагу, частицы твердых

примесей. Это создает условия для развития ударной ионизации по месту включения и более быстрого разрушения диэлектрика. С увеличением толщины образца увеличивается вероятность попадания большего числа неоднородностей под электрод. Следовательно, электрическая прочность одного и того же диэлектрика, определенная по результатам испытаний на пробой толстых образцов меньше, чем при испытании тонких образцов (рис. 4.18).

Низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытой пористостью (дерево, непропитанная бумага, мрамор). Электрическая прочность их мало отличается от прочности воздуха. Увеличить электрическую прочность таких диэлектриков возможно путем заполнения пор жидким диэлектриком (пропитка маслом). Наслоение листов непропитанной бумаги также может привести к увеличению ее электрической прочности, что можно объяснить следующим образом: газовые включения одного листа при наслоении перекрываются плотными участками второго листа, длина канала, по которому пробивается диэлектрик будет больше, соответственно $E_{пр}$ увеличивается. При большом числе слоев ухудшаются условия тепло отвода и $E_{пр}$ падает (рис. 4.19).

Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле вследствие диэлектрических потерь до температур, при которых происходит его обугливание, термическое разрушение, растрескивание. Развитие процессов термического разрушения приводит, в свою очередь, к чрезмерному возрастанию электропроводности и диэлектрических потерь. Возрастание же электропроводности и диэлектрических потерь еще больше усилит процессы термического разрушения. Этот самораскаливающийся процесс приводит к тепловому пробую диэлектрика. В установившемся режиме количество тепла, выделенное внутри диэлектрика за единицу времени за счет диэлектрических потерь $Q_{внд}$, равно количеству тепла, отведенному от диэлектрика в окружающую среду за это же время $Q_{отв}$, т.е. справедливо соотношение:

$$U^2 \omega C t g \delta = \sigma S (t_{раб} - t_0), \quad (4.31)$$

где: ω —угловая частота электрического поля; U —напряжение, приложенное к диэлектрику; C —емкость диэлектрика; $t g \delta$ —тангенс угла диэлектрических потерь при рабочей температуре; σ —коэффициент теплоотдачи; S —площадь поверхности изоляционного материала; $t_{раб}$ и t_0 —температуры поверхности материала и окружающей среды.

При нарушении теплового равновесия, т.е. когда $Q_{внд} > Q_{отв}$, произойдет тепловой пробой диэлектрика. Из формулы 4.31 видно,

что нарушение теплового баланса, а соответственно электрическая прочность диэлектрика при тепловом пробое зависит от ряда факторов: от способности диэлектрика отводить тепло из внутренних слоев в окружающую среду, которая определяется свойствами диэлектрика, его толщиной и температурой окружающей среды; от частоты поля; от диэлектрических свойств материала. Соответственно, при тепловом пробое характерны закономерности электрической прочности $E_{пр}$ от толщины диэлектрика d (рис. 4.19) и от температуры (рис. 4.20).

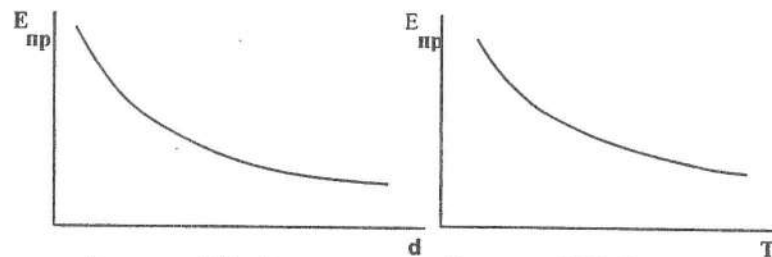


Рисунок 4.19. Зависимость $E_{пр}$ твердого диэлектрика от толщины образца d при тепловом пробое

Рисунок 4.20. Зависимость $E_{пр}$ твердого диэлектрика от температуры при тепловом пробое

4.4.4. Электрохимический пробой.

Этот вид пробоя наблюдается при длительном приложении напряжения. Под действием электрического поля, температуры, кислорода воздуха в диэлектрике идет окисление, разрыв связей и другие процессы, приводящие к его старению. В процессе старения вещество диэлектрика в результате химических реакций, происходящих в нем, как бы перерождается и образуются новые вещества, диэлектрические свойства которых существенно хуже, а может быть новые вещества вообще не обладают изолирующими свойствами и обуславливают замыкание между электродами.

5. Лабораторные работы

Лабораторная работа 1

Изучение влияния температуры на относительную магнитную проницаемость ферритов

Цель работы: Экспериментальная оценка изменения относительной магнитной проницаемости ферритов при изменении температуры.

Задание:

1. Ознакомиться с физической природой процесса намагничивания материалов (раздел 1 настоящего пособия).
2. Изучить схему и порядок работы на экспериментальной установке.
3. При комнатной температуре и через определенные интервалы температур (по заданию преподавателя) измерить индуктивность катушки L_m , намотанной на тороидальный ферритовый сердечник.
4. Рассчитать индуктивность той же катушки в вакууме: L_0 .
5. Рассчитать текущие значения относительной магнитной проницаемости μ .
6. Экспериментальные и расчетные данные занести в табл. 1.
7. Построить графическую зависимость $\mu = \varphi(T^\circ C)$, оценить точку Кюри.
8. Для восходящей и падающей частей зависимости $\mu = \varphi(T^\circ C)$ оценить и сравнить значения $T_K \mu$.
9. Объясните полученные результаты.

Расчетные формулы

При практических исследованиях значения μ можно оценить из соотношения индуктивности L_m катушки, намотанной на ферритовый сердечник, и индуктивности L_0 катушки тех же размеров и формы, находящейся в вакууме:

$$\mu = \frac{L_m}{L_0} \quad (1)$$

Для вакуума индуктивность тороидальной катушки L_0 определяется геометрическими размерами и числом витков n (рис. 1)

$$L_0 = \mu_0 \frac{n^2 \cdot S}{\ell_{cp}} \quad (2)$$

где ℓ_{cp} и S – соответственно, длина тороида по средней линии (м) и площадь поперечного сечения магнитопровода (м²).

$$\ell_{cp} = \pi \cdot d_{cp} = \pi \frac{d_1 + d_2}{2}; \quad S = a \frac{d_2 - d_1}{2} \quad (3)$$

Электрическая схема установки и порядок проведения измерений

Индуктивность тороидальной катушки L_m определяются с помощью цифрового автоматического моста переменного тока Е7-8, упрощенная схема которого приведена на рис. 2.

Измерительная схема прибора Е7-8 представляет собой четырехплечий мост с трансформаторами с тесной индуктивной связью, операционными усилителями А1,

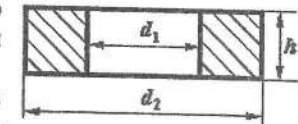


Рисунок 1. Сечение тороидального магнитопровода.

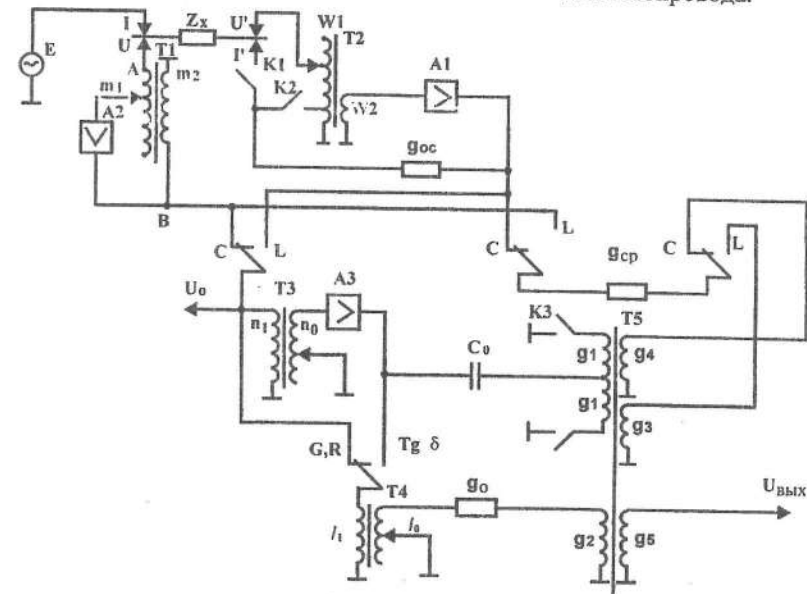


Рисунок 2. Схема измерительного моста Е7-8.

А2, А3 и генератором напряжения (Е) с рабочей частотой 1000 Гц. Изменение схемы, обеспечивающее переход от измерения объектов с емкостным характером реактивности к измерению объектов индуктивного характера, достигается сменой положения переключателя С, G – L, R. Измерение потерь в виде активной

составляющей (G, R) или тангенса угла потерь ($tg \delta$) определяется установкой переключателя G, R- $tg \delta$.

Для измерения индуктивности исследуемой тороидальной катушки L_m необходимо:

1. Установить переключатель « $U_{\text{поляр.}}, I_{\text{подмагн.}}$ » в положение «ВЫКЛ.», переключатель «Пределы измерений» в положение «АВТ», переключатель «Знак C, L» в положение «АВТ».

2. Установить переключатели «Вид измерения» в положения «L, R» и «G, R», переключатель «Запуск» в положение «Следящий».

3. Присоединить измеряемую катушку к зажимам соединительного кабеля.

4. Включить тумблер «Сеть» и дать прогреться прибору не менее 5 мин.

5. Прибор без участия оператора начинает измерения. В процессе измерения на табло прибора высвечивается надпись «Небаланс». По окончании измерения (надпись «Небаланс» гаснет) при заданной температуре прочесть результаты измерения на табло прибора.

Примечания: При использовании иного оборудования для измерения индуктивности L_x порядок измерения объясняется преподавателем.

Форма представления результатов

Параметры катушки и ферритового тороида:

- число витков в катушке – n ;
- соответственно внешний и внутренний диаметр тороида – d_1 и d_2 (м);
- высота тороида – q (м).

Экспериментальные и расчетные данные представляются в табл.1.

Таблица 1.

№ п/п	Температура, T (°C)	Индуктивность, L_m (Гн)	Относительная магнитная проницаемость, μ

Контрольные вопросы

1. В чем заключается процесс намагничивания материала ?

2. Назвать основные характеристики магнитного поля, их взаимосвязь и физический смысл.
3. Каким образом можно оценить величину μ , какие факторы влияют на μ ?
4. Объяснить особенности намагничивания ферромагнетиков.
5. Что такое точка Кюри?

Лабораторная работа 2 Изучение основных магнитных характеристик ферро- и ферромагнитных материалов

Цель работы: экспериментальная оценка влияния напряженности и частоты магнитного поля на индукцию и относительную магнитную проницаемость ферро- и ферромагнитных материалов.

Задание:

1. Ознакомиться с физической природой намагничивания материалов (раздел 1 настоящего пособия).
2. Изучить схему экспериментальной установки и порядок работы.
3. При фиксированной частоте f_1 , путем ступенчатого изменения тока J первичной обмотке тороида W_1 получить семейство петель гистерезиса.

4. Для каждого значения тока намагничивания J по экрану осциллографа определить координаты вершины петли гистерезиса в делениях шкалы экрана (Y_0, X_n), а также координаты точек Y_1 и X_c .

Примечание: координата вершины Y_0 может измерена непосредственно ламповым вольтметром в вольтах.

Результаты измерений занести в табл.2 или табл.3.

5. Используя уравнения 4, 5, 7, 8, и 9, рассчитать соответственно для данной частоты величину индукции B_0 , остаточную индукцию B_r , напряженность магнитного поля H_0 , коэрцитивную силу H_c и магнитную проницаемость μ .

Результаты расчетов занести в табл.4.

6. Произвести аналогичную серию испытаний и расчетов для других частот f_i , указанных преподавателем.

7. Построить графические зависимости $B = \varphi(H)$, $\mu = \varphi(H)$.

8. Выбрать одинаковое значение напряженности магнитного поля $H = \text{const}$ на всех исследуемых частотах и построить зависимости $B_r = \varphi(H)$, $\mu = \varphi(H)$, $H_c = \varphi(f)$ при этой напряженности.

9. Объяснить полученные зависимости.

Электрическая схема установки порядок проведения измерений

Для изучения свойств магнитных материалов используется установка, электрическая схема которой приведена на рис.3.

ГЗ – генератор звуковой частоты, с плавным ее изменением в диапазоне от 20 Гц до 200 кГц;

РВН – регулировка входного напряжения генератора, с помощью которой устанавливается заданное значение тока J в первичной

обмотке тороида T , изготовленного из исследуемого магнитного материала;

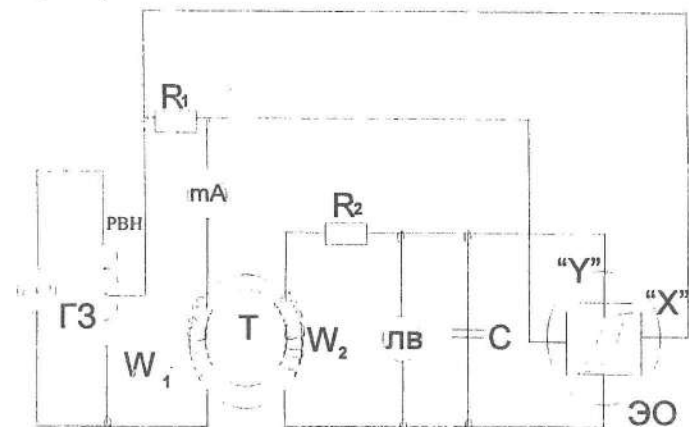


Рисунок 3. Схема установки для определения основных характеристик магнитных материалов.

W_1 – число витков первичной обмотки тороида;

W_2 – число витков вторичной обмотки тороида;

mA – миллиамперметр в цепи первичной обмотки тороида;

ЭО – электронный осциллограф;

ЛВ – ламповый вольтметр, служит для непосредственного измерения напряжения на вертикально отклоняющихся пластинах « Y_0 » осциллографа.

Свойства магнитных материалов изучаются на тороидах, изготовленных из электротехнической стали, феррита, пермаллоя и т.д. На каждую из них намотаны две обмотки с числом витков W_1 и W_2 . На первичную обмотку подается переменное напряжение U_1 с частотой f_i от ГЗ. Часть этого напряжения, снимаемого с сопротивления R_1 , подается на горизонтально отклоняющиеся пластины «X» осциллографа. Наведенная во вторичной обмотке ЭДС U_2 подается с емкости C на вертикально отклоняющие пластины осциллографа «Y». При этом за один период электронный луч на экране ЭО опишет полную петлю гистерезиса. Изменяя величину U_1 на экране ЭО, можно последовательно получить ряд петель гистерезиса. Для текущего значения напряжения U_1 , приложенного к первичной обмотке тороида, расчет индукции B_i производится по формуле:

$$B_i = \frac{R_2 \cdot C}{S \cdot W_2} Y_m \cdot n_i; [Tл], \quad (4)$$

где R_2 (Ом) – и C (Ф) – известные сопротивление и емкость;
 S (м²) – поперечное сечение тороида;
 Y_{ai} (делений) – вертикальная координата вершины петли (ось «Y») в делениях шкалы осциллографа (рис.4);
 n_i (В/дел) или (В/мм) – чувствительность осциллографа при данном усилении по оси «Y».

При непосредственном измерении напряжения на вертикально отклоняющих пластинах осциллографа с помощью лампового вольтметра уравнение 4 имеет вид

$$B_i = \frac{R_2 \cdot C}{S \cdot W_2} U_i, \quad (5)$$

где U_i (В) – напряжение, подаваемое на пластины «Y» ЭО со вторичной обмотки тороида.

Остаточная индукция B_r рассчитывается по уравнению

$$B_r = B_i \frac{Y_r}{Y_{ai}}, [Тл], \quad (6)$$

где Y_{ai} (дел) – ордината точки B_i в делениях шкалы экрана осциллографа.

Напряженность магнитного поля H_i рассчитывается по уравнению

$$H_i = \frac{J_i \cdot W_1}{\pi \cdot D_{cp}}, [А/м] \quad (7)$$

где J_i (А) – ток в первичной обмотке тороида;

D_{cp} (м) – средний диаметр кольца тороида.

Величина коэрцитивной силы H_{ci} определяется из кривой намагничивания при напряжениях магнитного поля, соответствующих техническому насыщению материала. С уменьшением напряженности магнитного поля остаточная намагниченность ферро- и ферромагнетиков также убывает.

Величина коэрцитивной силы H_c (или остаточная напряженность магнитного поля) рассчитывается из соотношения

$$H_c = H_i \frac{x_{ci}}{x_{Hi}}, \left[\frac{А}{м} \right], \quad (8)$$

где x_{ci} (дел) – координата точки H_{ci} по оси абсцисс в единицах шкалы экрана ЭО;

x_{Hi} (дел) – координата вершины петли гистерезиса по оси абсцисс в единицах шкалы экрана ЭО.

Относительную магнитную проницаемость μ_r веществ рассчитывают по уравнению

$$\mu_r = \frac{B_i}{\mu_0 \cdot H_i}. \quad (9)$$

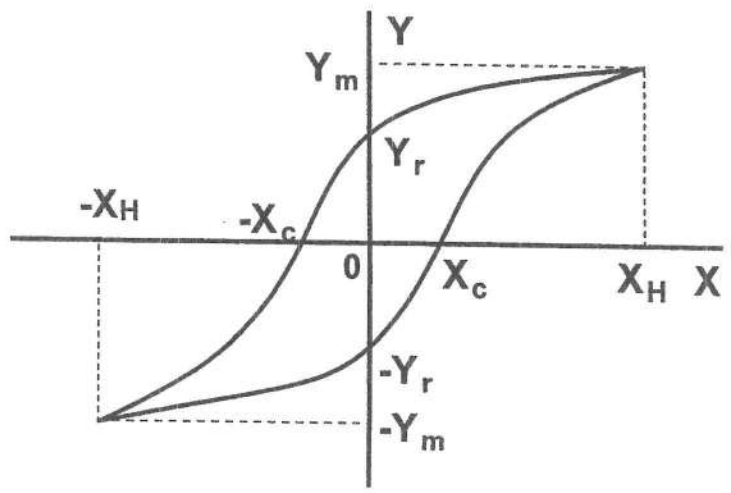


Рисунок 4. Определение координат петли гистерезиса.

Форма представления результатов

Размеры тороида и число витков в обмотках W_1 и W_2 приведены на испытательном стенде.

d_1 (м) – внутренний диаметр тороида (см.рис.1);

d_2 (м) – внешний диаметр тороида;

h (м) – высота тороида.

Экспериментальные данные

Таблица 2

Частота f , Гц	J , А	Координаты			
		x_{Hi} , дел	x_{ci} , дел.	$n Y_{ai}$, дел	$n Y_{ri}$, дел

Таблица 3

Частота f , Гц	J , А	U , В

Расчетные данные

Таблица 4

Частота f , Гц	№ п/п	H , А/м	B , Т/л	H_c , А/м	B_r , Тл	μ
f_1	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
f_2	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

Примечание:

1. Количество точек по частоте и величины частот задаются преподавателем.
2. Для каждой из фиксированных частот следует выбирать не менее пяти значений тока в первичной обмотке тороида.

Контрольные вопросы.

1. Назовите основные характеристики магнитного поля, их взаимосвязь и физический смысл.
2. Назовите основные отличия между магнитомягкими и магнитотвердыми материалами.
3. За счет чего возникает при циклическом перемагничивании материала петля гистерезиса.

Лабораторная работа 3 Изучение влияния температуры на удельное электрическое сопротивление металлов и сплавов

Цель работы: Экспериментальная оценка изменения удельного электрического сопротивления металлов и сплавов при изменении температуры.

Задание:

1. Ознакомиться с основными представлениями о физической природе электропроводности металлов и сплавов (раздел 2 настоящего пособия).
2. Изучить схему и порядок работы на экспериментальной установке.
3. Произвести измерения сопротивлений исследуемых образцов при комнатной температуре.
4. Через определенные интервалы температур (по заданию преподавателя) произвести измерения сопротивлений исследуемых образцов.
5. Рассчитать по выражению (2.1) значения для каждой температурной точки ρ_t и отношение ρ_t/ρ_0 для исследуемых образцов.
6. Экспериментальные и расчетные данные занести в табл.5 и табл.6.
7. Построить графические зависимости $\rho_t/\rho_0=f(t_w)$ для исследуемых образцов и объяснить полученные результаты.

Электрическая схема установки и порядок проведения измерений

Величина сопротивления R исследуемых образцов определяется с помощью цифрового автоматического моста переменного тока Е7-8, упрощенная схема которого приведена на рис.2.

Измерительная схема прибора Е7-8 представляет собой четырехплечий мост с трансформаторами с тесной индуктивной связью и операционными усилителями А1, А2, А3 и генератором напряжения (Е) с рабочей частотой 1000 Гц. Изменение схемы, обеспечивающее переход от измерения объектов с емкостным характером реактивности к изменению объектов индуктивного характера достигается сменой положения переключателя С, G-L, R. Измерение потерь в виде активной составляющей (G, R) или тангенса угла потерь ($\text{tg}\delta$) определяются установкой переключателя (G, R - $\text{tg}\delta$).

Для измерения величины сопротивления исследуемых образцов R_x необходимо.

1. Установить переключатель « $U_{\text{поляр}}$, $I_{\text{подмагни}}$ » в положение «Выкл.», переключатель «Пределы измерений» в положение «Авт.», переключатель «Знак C,L» в положение «Авт.»

2. Установить переключатель «Вид измерений» в положение «L,R» и «G,R», переключатель «Запуск» в положение «Следящий».

3. Включить тумблер «Сеть» и дать прогреться прибору не менее 5 мин.

4. Присоединить первый исследуемый образец к зажимам соединительного кабеля. Прибор без участия оператора начинает измерение. В процессе измерения на табло прибора высвечивается надпись «Небаланс» По окончании измерения (надпись «Небаланс» гаснет) при заданной температуре прочесть результаты измерения на табло прибора.

5. Присоединить второй исследуемый образец к зажимам соединительного кабеля и провести измерения сопротивления этого образца.

Примечание: При использовании иного оборудования для измерения величины сопротивления, порядок измерения объясняется преподавателем.

Форма представления результатов

Таблица 5

Геометрические параметры образца	Образец 1	Образец 2
длина l [м]		
диаметр d [м]		

Таблица 6

Температура $a, ^\circ\text{C}$	Образец 1			Образец 2		
	R_t , Ом	ρ_t , мкОм	ρ/ρ_0	R_t , Ом	ρ_t , мкОм	ρ_t/ρ_0

Контрольные вопросы

1. Природа электропроводности металлов и сплавов.
2. Факторы, влияющие на электропроводность металлов и сплавов.
3. Области применения проводниковых материалов.

Лабораторная работа 4

Изучение влияния температуры на электрическое сопротивление полупроводникового терморезистора.

Цель работы: изучение закономерности изменения величины электрического сопротивления полупроводникового терморезистора при изменении температуры.

Задание:

1. Ознакомиться с основными представлениями о физической природе электропроводности полупроводниковых материалов (раздел 3 настоящего пособия).

2. Изучить схему и порядок работы на экспериментальной установке.

3. Произвести измерение сопротивления полупроводникового терморезистора при комнатной температуре.

4. Через определенные интервалы температур (по заданию преподавателя) произвести измерение сопротивления терморезистора.

5. Рассчитать значения параметров R_0 ; B ; ΔW и α_T терморезистора.

6. Используя выражение 3.5 произвести расчет значения R_T для определенной температуры (по заданию преподавателя) и сравнить его с экспериментальным.

7. Результаты расчета и измерений занести в таблицу 7.

8. Построить графические зависимости $\ln R_T = f(T)$ для исследуемого терморезистора.

9. Объяснить полученные результаты.

Схема установки и порядок работы. Порядок проведения измерений.

Величина сопротивления R_T исследуемого терморезистора определяется с помощью цифрового автоматического моста переменного тока Е7-8, упрощенная схема которого приведена на рис.2.

Измерительная схема прибора Е7-8 представляет собой четырехплечевой мост с трансформаторами с тесной индуктивной связью и операционными усилителями А1, А2, А3 и генератором напряжения (Е) с рабочей частотой 1000 Гц. Изменение схемы, обеспечивающее переход от измерения объектов с емкостным характером реактивности к измерениям объектов индуктивного характера достигается сменой положения переключателя C,G-L,R.

Измерение потерь в виде активной составляющей (G,R) или тангенса угла потерь (tgδ) определяется установкой переключателя (G,R-tgδ).

Для измерения величины сопротивления исследуемых образцов R_T необходимо:

1. Установить переключатель "U_{поляр.}, I_{подмагн.}" в положение "Выкл.", переключатель "Пределы измерений" в положение "Следящий".
2. Установить переключатели "Вид измерений" в положение "L,R" и "G,R", переключатель "Запуск" в положение "Следящий".
3. Включить тумблер "Сеть" и дать прогреться прибору не менее 5 минут.
4. Присоединить исследуемый терморезистор к зажимам соединительного кабеля. Прибор без участия оператора начинает измерение. В процессе измерения на табло прибора высвечивается надпись "Небаланс". По окончании измерения (надпись "Небаланс" гаснет) при заданной температуре прочесть результаты измерения на табло прибора.

Примечание: при использовании иного оборудования для измерения величины сопротивления порядок измерения объясняется преподавателем.

Расчетные формулы.

Значения R₀ и B исследуемого терморезистора рассчитываются по выражениям 10 и 11:

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} (\ln R_{T_1} - \ln R_{T_2}) \quad (10)$$

$$R_0 = \exp \frac{T_1 \ln R_{T_1} \cdot T_2 \ln R_{T_2}}{T_2 - T_1} \quad (11)$$

где T₁ – температура, при которой проведено первое измерение сопротивления терморезистора в К;

R_{T1} – величина сопротивления терморезистора при температуре T₁, Ом;

T₂ – температура, при которой проведено последнее измерение сопротивления терморезистора в К;

R_{T2} – величина сопротивления терморезистора при температуре T₂, Ом.

Температурный коэффициент сопротивления α_T рассчитывается по выражению:

$$\alpha_T = -\frac{B}{T_2} \quad (12)$$

Значение энергии активации определяется по выражению:

$$\Delta W = B \cdot 2K \quad (13)$$

где K=8,61·10⁻⁵ эВ/к – постоянная Больцмана.

Форма предоставления результатов.

Таблица 7

t, °C	T, °K	1/T, 1/K	R _T , Ом	ln R _T	Примечания

В примечание табл. 7 заносятся значения R₀; B; ΔW и α_T.

Контрольные вопросы.

1. Как изменяется концентрация свободных носителей зарядов в полупроводнике при изменении температуры?
2. Как изменяется подвижность свободных носителей зарядов в полупроводнике при изменении температуры?
3. Как изменяется сопротивление полупроводника при изменении температуры?
4. Объясните физический смысл энергии активации носителей зарядов в полупроводнике. Как ее определить по результатам эксперимента?

Лабораторная работа 5 Исследование влияния напряжения на электрическое сопротивление полупроводников.

Цель работы: экспериментальная оценка изменения электрического сопротивления полупроводников при изменении приложенного напряжения.

Задание:

1. Изучить основные теоретические положения электропроводности полупроводников.
2. Получить зависимость тока, протекающего через полупроводник от приложенного напряжения (пределы и периодичность изменения приложенного напряжения задаются преподавателем).
3. Построить вольт-амперную характеристику $I=f(U)$ полупроводника.
4. Рассчитать сопротивление полупроводника при различных напряжениях.
5. Построить зависимость $\ln R = f(\sqrt{U})$.
6. Определить значения параметров $U_{кр}$; R_0 ; β .
7. Пропести теоретический расчет значений.
8. Объяснить полученные результаты.

Основные расчетные соотношения.

Для расчета сопротивления полупроводника используется выражение:

$$R_{n/n} = \frac{U}{J} = \frac{u \cdot n}{\alpha \cdot C_d} \quad (14)$$

где U - приложенное напряжение; $J = \frac{\alpha \cdot C_d}{n}$ - ток, протекающий через полупроводник; n - шунтовое число; α - отклонение гальванометра; C_d - динамическая постоянная гальванометра.

Электрическая схема установки и порядок проведения измерений.

Определение тока в полупроводнике производится на установке, электрическая схема которой приведена на рис. 5.

Шунтовое сопротивление $R_{ш}$ гальванометра предназначено для разделения тока, протекающего по образцу, на две части, одна из

которых измеряется гальванометром. Шунтовое сопротивление имеет несколько ступеней. Ступень шунтового сопротивления характеризуется шунтовым числом n , которое равно отношению тока, протекающего по гальванометру, к току, протекающему по образцу. Значения n в используемой установке: 10^{-6} ; 10^{-5} ; 10^{-4} ; 10^{-3} ; 10^{-2} ; 10^{-1} ; 1.

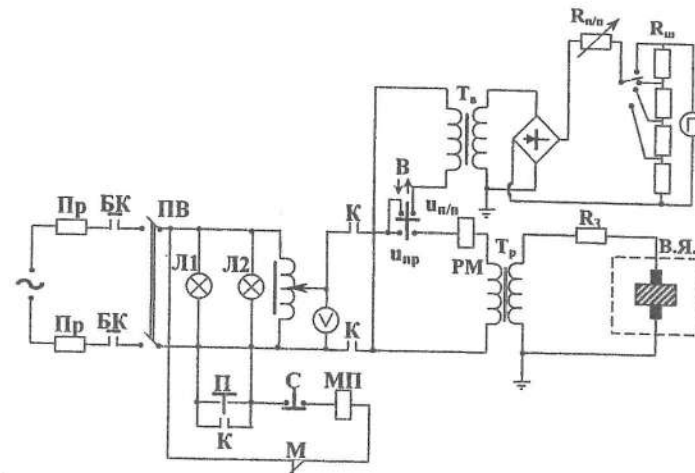


Рисунок 5. АТР - автотрансформатор; В - переключатель рода работы ($U_{n/n}$ - исследование полупроводников; $U_{пр}$ - исследование пробоя диэлектриков); T_B - высоковольтный трансформатор для исследования полупроводников; T_P - высоковольтный трансформатор для исследования пробоя диэлектриков; ПВ - пакетный выключатель; Пр - предохранители; БК - блокировочные контакты высоковольтной ячейки (ВЯ); Л1 и Л2 - сигнальные лампы; МП - магнитный пускатель; П - кнопка «ПУСК»; С - кнопка «СТОП»; V - вольтметр; Г - гальванометр; $R_{ш}$ - шунтовое сопротивление; РМ - реле максимального тока; $R_{n/n}$ - исследуемый полупроводник; R_3 - защитное сопротивление.

1. Закрыть высоковольтную ячейку.
2. Ступень шунтового сопротивления включить в положение $n=10^{-6}$, а рукоятку автотрансформатора поставить в положение «0».
3. Включить установку в сеть, включить пакетный выключатель ПВ, увидев световую сигнализацию Л1; убедиться, что световой зайчик гальванометра не имеет отклонения от нулевого положения.
4. Рукояткой автотрансформатора установить необходимое значение напряжения U на полупроводнике.

5. Вывести шунтовое сопротивление в такое положение, чтобы отклонение светового зайчика гальванометра было в пределах шкалы (каждая ступень шунтового сопротивления изменяет величину тока, протекающего по гальванометру в 10 раз, следовательно, в 10 раз меняется и величина отклонения светового зайчика по шкале гальванометра). После установления светового зайчика по шкале гальванометра взять отсчет по шкале α .

6. Занести значения u ; n и α в таблицу 8.

7. Установить следующую величину напряжения на полупроводнике и занести значения u ; n и α в таблицу 8.

8. После проведения измерения во всем диапазоне заданных напряжений на полупроводнике рукоятку автотрансформатора вывести в нулевое положение, значение ступени шунтового числа в положение 10^{-6} и отключить установку от сети.

Расчет значений R_0 , β и теоретический расчет значений сопротивлений полупроводника проводится по выражениям:

$$R_{0/n} = R_0 \cdot \exp(-\beta \sqrt{u}) \quad (15)$$

используя значения сопротивлений при различных значениях напряжений можно рассчитать R_0 и β исследуемого полупроводника.

$$\beta = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2}} \quad (16)$$

$$R_0 = \exp \frac{\sqrt{u_1} \ln R_2 - \sqrt{u_2} \ln R_1}{\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2}} \quad (17)$$

Примечание: u_1 – критическое напряжение u_c ; R_1 – сопротивление при напряжении u_1 ; u_2 – конечное значение напряжения; R_2 – сопротивление при значении напряжения u_2 .

Форма предоставления результатов.

Результаты измерений и расчетов заносятся в таблицу 8.

Таблица 8

№ п/п	U, В	n	$\alpha_{Дел}$	J_A	R, Ом	Примечания

В примечания заносятся значения R_0 , β , u_c и $R_{расч}$.

Контрольные вопросы.

1. Объясните понятие критического приложенного напряжения, как оно определяется экспериментально?

2. Как изменяется концентрация свободных носителей заряда с изменением напряженности электрического поля?

3. Объясните физический смысл параметров R_0 и β . Как они определяются экспериментально?

Лабораторная работа 6 Исследование влияния температуры на величину удельного объемного сопротивления твердых диэлектриков

Цель работы: Экспериментальная оценка изменения удельного объемного сопротивления твердого диэлектрика при изменении температуры.

Задание:

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями электропроводности диэлектриков (раздел 4 настоящего пособия).
2. Изучить схему и порядок работы на экспериментальной установке.
3. Измерить толщину диэлектрика и определить площадь измерительного электрода.
4. При комнатной температуре и через определенные интервалы температур (по заданию преподавателя) произвести измерения объемной составляющей сквозного тока диэлектрика.
5. Рассчитать по выражению (4.3) значения удельного объемного сопротивления ρ_V (или удельной объемной проводимости γ_V) для каждой температуры.
6. Экспериментальные и расчетные данные занести в табл.9
7. Построить зависимость $\ln \rho_V = f(1/T)$ или $\ln \gamma_V = f(1/T)$.
8. Объяснить полученные результаты.

Схема установки и порядок работы

Измерения величины R_V образца диэлектрика производится с помощью универсального вольтметра-электрометра В7-30, функциональная схема которого приведена на рисунке 6.

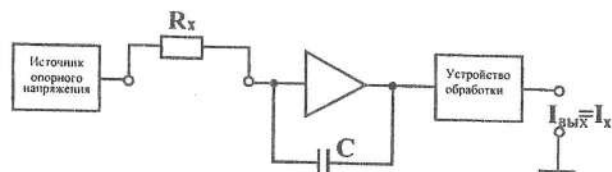



Рисунок 6. Функциональная схема универсального вольтметра-электрометра В7-30

Для измерения I_x необходимо.

1. Перед включением вольтметра-электрометра в сеть проверить положения органов управления:
 - а) кнопка «Вх.замкн.» – нажата;
 - б) кнопка «А» – нажата;
 - в) кнопка «Вкл.компенс.» – отпущена;
 - г) кнопка «R» - отпущена;
 - д) кнопка «10 V» на измерительном блоке нажата.

Остальные органы управления находятся в произвольном положении.

2. Включить тумблер «Сеть», дать прогреться прибору не менее 15 мин.
3. Поместить образец между электродами.
4. При измерении тока в автоматическом режиме нажать кнопку 

Включить источник опорного напряжения

5. Опустить кнопку «Вх.замкн.» на табло будет инициироваться значение измеряемого тока I_x . При окончании измерения нажать кнопку «Вх.замкн.».

6. Включить термостат и через заданные температурные интервалы произвести измерение тока I_x согласно предыдущему пункту.

Примечание: Если значение I_x определяется на другом оборудовании, порядок измерений уточняет преподаватель.

Форма представления результатов

Исходные данные: название исследуемого диэлектрика, его толщина h [м], площадь измерительного электрода S [м²], величина опорного напряжения U [В]

Таблица 9.

№ п/п	$T^{\circ}\text{C}$	T, K	$1/T, \text{K}$	I, A	$R_V, \text{Ом}$	$\rho_V, \text{Ом м}$	$\ln \rho_V$
1	2	3	4	5	6	7	8

Контрольные вопросы

1. Что такое электропроводность диэлектрика?
2. Какие виды зарядов характерны для диэлектриков?

3. За счет чего изменяется электрическая проводимость?
4. Что представляет собой сквозной ток диэлектрика?
5. Что такое удельное объемное электрическое сопротивление диэлектрика?
6. Объясните температурную зависимость объемного сопротивления твердых диэлектриков.
7. Какие опытные величины нужно знать для вычисления удельного объемного сопротивления диэлектрика и как они измеряются?

Лабораторная работа 7

Исследование влияния температуры на относительную диэлектрическую проницаемость и тангенса угла диэлектрических потерь неполярного и полярного диэлектриков

Цель работы: Экспериментальная оценка изменений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь неполярного и полярного диэлектриков при изменении температуры.

Задание:

1. Ознакомиться с основными представлениями о процессах поляризации и диэлектрических потерь неполярных и полярных диэлектриков (раздел 4 настоящего пособия).
2. Изучить схему и порядок работы на экспериментальной установке.
3. Через определенные интервалы температур (по заданию преподавателя) произвести измерения емкостей конденсаторов C_1 и C_2 , а также тангенса диэлектрических потерь $tg \delta_1$ и $tg \delta_2$.
4. Используя измеряемые значения емкостей C_1 и C_2 произвести расчет относительных диэлектрических проницаемостей ϵ_1 и ϵ_2 исследуемых диэлектриков.
5. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 10.
6. Построить графические зависимости $\epsilon_1 = f(T)$; $\epsilon_2 = f(T)$; $tg \delta_1 = f(T)$; $tg \delta_2 = f(T)$.
7. По виду зависимостей определите типы (полярный, неполярный) исследуемых диэлектриков.
8. Объясните полученные зависимости.

Расчетные формулы:

$$\epsilon_x = C_x \frac{h}{S \cdot \epsilon_0} \quad (18)$$

где C_x – измеряемая емкость конденсатора (Ф);
 h – толщина диэлектрика (м);
 S – площадь измерительного электрода (м²);
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Электрическая схема установки. Порядок проведения измерений

Величина емкостей C_1 и C_2 и тангенса углов диэлектрических потерь $tg \delta_1$ и $tg \delta_2$ определяются с помощью цифрового автоматического моста переменного тока Е7-8, упрощенная схема которого приведена на рис. 2.

Измерительная схема прибора Е7-8 представляет собой четырехплечий мост с трансформаторами с тесной индуктивной связью, операционными усилителями А1, А2, А3 и генератором напряжения (Е) с рабочей частотой 1000 Гц. Изменение схемы, обеспечивающее переход от измерения объектов с емкостным характером реактивности к измерению объектов индуктивного характера, достигается сменой положения переключателя С, G – L, R. Измерение потерь в виде активной составляющей (G, R) или тангенса угла потерь ($tg \delta$) определяется установкой переключателя G, R- $tg \delta$.

Для измерения емкостей образцов C_1 и C_2 , а также тангенса углов диэлектрических потерь $tg \delta_1$ и $tg \delta_2$ необходимо:

1. Установить переключатель «U_{поляр.}, I_{подмагни.}» в положение «ВЫКЛ.», переключатель «Пределы измерений» в положение «АВТ», переключатель «Знак С, L» в положение «АВТ».
2. Установить переключатели «Вид измерения» в положения «С, G» и « $tg \delta$ », переключатель «Запуск» в положение «Следящий».
3. Включить тумблер «Сеть» и дать прогреться прибору не менее 5 мин.
4. Присоединить один из исследуемых образцов к зажимам соединительного кабеля. Прибор без участия оператора начинает измерения. В процессе измерения на табло прибора высвечивается надпись «Небаланс». По окончании измерения (надпись «Небаланс» гаснет) прочесть результаты измерения C_1 и $tg \delta_1$ на табло прибора.
5. Присоединить второй исследуемый образец к зажимам соединительного кабеля и провести измерения C_2 и $tg \delta_2$.

Примечания: При использовании иного оборудования для измерения C_x и $tg \delta_x$, порядок измерения объясняется с преподавателем.

Форма представления результатов

- Толщины диэлектриков: образец 1 – h_1 (м);
образец 2 – h_2 (м).
Площади электродов: образец 1 – S_1 (м²);
образец 2 – S_2 (м²).

Таблица 10

№ п/п	Т°С	Образец 1			Образец 2		
		C_1 (Ф)	ϵ_1	$tg \delta_1$	C_2 (Ф)	ϵ_2	$tg \delta_2$

Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация диэлектриков?
2. Виды поляризации в полярных и неполярных диэлектриках.
3. В чем заключается отличие упругих и неупругих видов поляризации?
4. Как изменяется $\epsilon = f(T)$ в неполярном и полярном диэлектриках?
5. Что характеризуют диэлектрические потери?
6. Виды диэлектрических потерь.
7. Как изменяется $tg \delta = f(T)$ в неполярном и полярном диэлектриках?

Лабораторная работа 8 Пробой твердых диэлектриков

Цель работы: Изучение влияния числа слоев в образцах кабельной и конденсаторной, пропитанной и непропитанной бумаги на ее электрическую прочность.

Задание:

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями по пробую твердых диэлектриков (раздел 4 настоящего пособия).
2. Подготовить образцы для испытания из кабельной или конденсаторной бумаги, набирая различное количество ее слоев, каждый лист должен быть размером 0,15*0,15 м. Число пакетов и число слоев в пакете указывается преподавателем.
3. Замерить толщину каждого образца микрометром в пяти местах, рассчитать среднее значение толщины.
4. Изучить схему и порядок работы на экспериментальной установке.
5. Определить пробивное напряжение каждого образца в 3-5 точках.
6. Рассчитать среднее значение пробивного напряжения для каждого образца.
7. Рассчитать пробивную напряженность (электрическую прочность) для каждого образца.
8. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 11.
9. Построить графические зависимости $E_{пр} = f(\bar{h})$ и $\bar{U}_{пр} = f(\bar{h})$.
10. Объяснить полученные результаты.

Расчетные формулы

Среднее значение толщины образца

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (19)$$

где h_i - значение i -ого замера толщины образца, м;
 n - число замеров.

$$E_{пр} = \frac{\bar{U}_{пр}}{\bar{h}}, \quad (20)$$

где $\bar{U}_{пр}$ - среднее значение пробивного напряжения образца, В.

Электрическая схема установки. Порядок проведения испытаний

Величину пробивного напряжения $U_{пр}$ определяют на высоковольтной пробивной установке схема которой приведена на рисунке 5.

Для определения $U_{пр}$ необходимо:

1. Открыть крышку высоковольтной ячейки, поместить испытуемый образец между испытательными электродами и закрыть крышку установки. Переключатель рода работы перевести в положение $U_{пр}$.
2. Включить шнур питания в сеть и включить пакетный выключатель ПВ. При этом должна загореться лампа Л1 зеленого света.
3. Нажать кнопку «Пуск» при этом загорается лампа Л2 красного цвета.
4. Рукояткой автотрансформатора поднять напряжение до пробоя образца (скорость подъема напряжения 0,5÷1 кВ в секунду). Величина пробивного напряжения регистрируется по вольтметру V.
5. После пробоя рукоятку автотрансформатора вывести в нулевое положение.
6. Открыть крышку установки и переместить образец в межэлектродном промежутке. Пробить образец в другой точке (согласно п.п. 1-5).

Примечание: При использовании иного оборудования для определения $U_{пр}$ порядок работы объясняется преподавателем.

Форма представления результатов

Таблица 10

№ п/п	Наименование бумаги	Число слоев, п	Толщина образца, м	Пробивное напряжение, В				Пробивная напряженность, В/м
				$U_{пр1}$	$U_{пр2}$	$U_{пр3}$	$U_{пр ср}$	

Контрольные вопросы

1. Объяснить механизм пробоя твердых диэлектриков.
2. Объяснить характерные зависимости, показывающие изменение электрической прочности от толщины диэлектрика и температуры окружающей среды при тепловом пробое.
3. Объяснить особенности пробоя неоднородных диэлектриков.

Лабораторная работа 9 Оценка годности жидких диэлектриков

Цель работы: определить пробивное напряжение трансформаторного масла, его годность.

Задание:

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями по пробоем жидких диэлектриков.
2. Подготовить испытательную ячейку с трансформаторным маслом, проверить зазор между электродами.
3. Осуществить шесть последовательных пробоев с интервалом между каждым из них, равным 5 мин. После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки жидкость между электродами осторожно перемешать. Порядок работы описан в лабораторной работе 8.
4. Рассчитать среднее арифметическое значение пробивного напряжения $U_{пр}$
5. Рассчитать электрическую прочность трансформаторного масла $E_{пр}$. Результаты расчетов привести в таблице 11.
6. Оценить возможные случаи использования масла по таблице 12.
7. Проанализировать влияние числа пробоев на пробивное напряжение трансформаторного масла.

Электрическая схема установки.

При пробое жидких диэлектриков используется установка приведенная на рисунке 5. Испытательная ячейка при пробое жидких диэлектриков состоит из сосуда для жидкости и электродов. Сосуд для жидкости выполнен из стекла или фарфора. Электроды плоские с закругленными краями смонтированы так, чтобы их оси располагались на одной горизонтальной линии, лежащей в плоскости, параллельной нижней поверхности испытательной ячейки. Зазор между электродами должен составлять 2.5 ± 0.05 мм. Проверка зазора должна осуществляться шаблоном-калибром.

Расчетные формулы.

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения

$$\bar{U}_{пр} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{пр} \quad (21)$$

где $U_{пр}$ — пробивное напряжение при i -м пробое;
 n — количество пробоев.

Электрическую прочность масла $E_{пр}$ определяют по выражению:

$$E_{пр} = \frac{\bar{U}_{пр}}{d} \quad (22)$$

Форма представления результатов.

Исходные данные: расстояние между электродами d [м], пробивное напряжение $U_{пр}$ [В], электрическая прочность $E_{пр}$ [В/м].

Таблица 11

№ п/п	$U_{пр}, В$	$\bar{U}_{пр}, В$	$E_{пр}, В/м$	Годность масла

Таблица 12

Области применения масла для электрических аппаратов	Необходимая величина $\bar{U}_{пр}, кВ$
Минимальное пробивное напряжение [кВ] для трансформаторов, аппаратов, изоляторов с напряжением:	
а. до 15 кВ включительно	20
б. от 15 до 35 кВ	25
в. от 60 до 220 кВ	35
г. от 330 кВ и выше	45
д. масло подлежит очистке	менее 20

Контрольные вопросы.

1. Что понимается под электрической прочностью диэлектрика? В каких единицах она измеряется?
2. Объяснить механизм пробоя жидких диэлектриков.
3. Объяснить влияние степени очистки на электрическую прочность жидких диэлектриков.

6. Содержание отчетов по лабораторным работам

В отчетах по лабораторным работам приводятся:

1. Цель работы.
2. Электрическая схема испытательной установки.
3. Расчетные формулы, пример расчета с выводом размерности определяемых величин.
4. Таблица экспериментальных и расчетных данных.
5. Графические зависимости.
6. Анализ результатов и физическое объяснение полученных зависимостей.

7. Форма отчета по лабораторной работе

Томский политехнический университет

Кафедра ЭИКТ

Отчет по лабораторной работе № 7
Исследование влияния температуры на относительную
диэлектрическую проницаемость и тангенса угла диэлектрических
потерь неполярного и полярного диэлектриков

Выполнил: ст-т гр. 7230
Васин В.В.

Проверил: преподаватель
Петин П.П.

Томск—2000

Цель работы:

Изучить характер зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры неполярного диэлектрика.

Задание:

1. Измерить емкость конденсатора и тангенс угла диэлектрических потерь неполярного диэлектрика в области температур 20...80 °С. Измерения проводить через 4...6 °С. Результаты измерений занести в табл.1.

2. По значениям измеренных емкостей произвести расчет диэлектрической проницаемости ϵ неполярного диэлектрика для всего диапазона температур. Результаты расчета занести в табл.1.

3. По результатам измерений и расчетов построить зависимости $\epsilon=f(T)$; $tg\delta=f(T)$

4. Объяснить полученные зависимости.

Электрическая схема установки и пример расчета

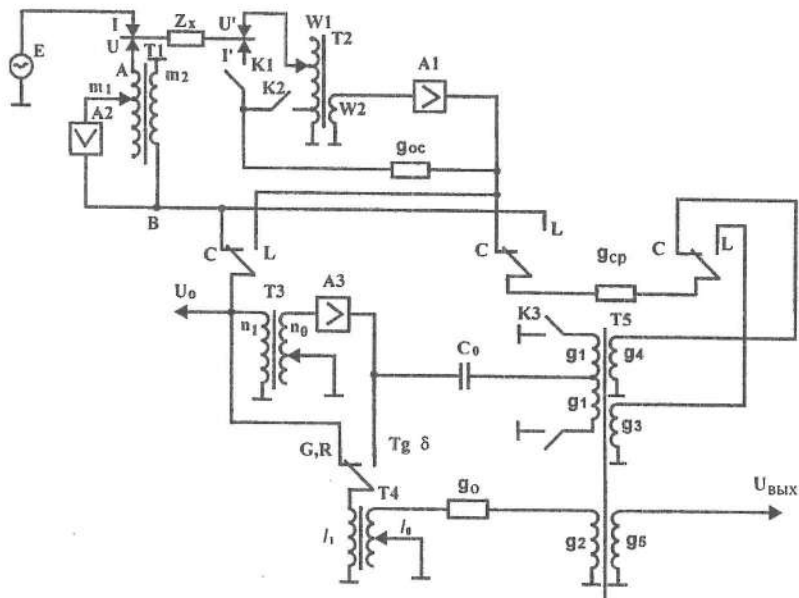


Рисунок 1. Схема измерительного моста E7-8.

$$\epsilon = C_x \cdot \frac{h}{S \cdot \epsilon_0}$$

где C_x —емкость конденсатора с диэлектриком (Ф);

h —толщина диэлектрика (м);

S —площадь измерительного электрода конденсатора (м²);

ϵ_0 — $8.85 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м)—электрическая постоянная.

Дано:

$h = 0,9 \text{ мм} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м};$

$d = 75 \text{ мм} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - диаметр измерительного электрода.

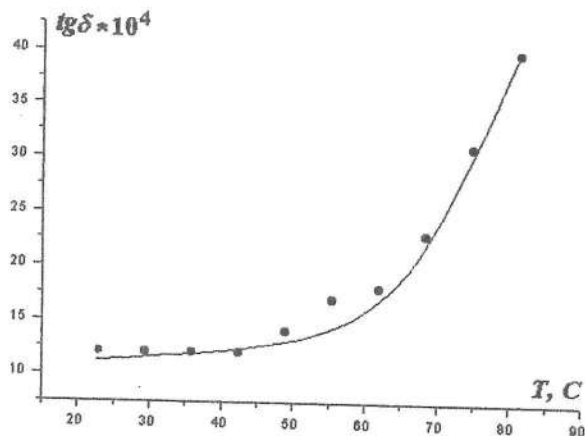
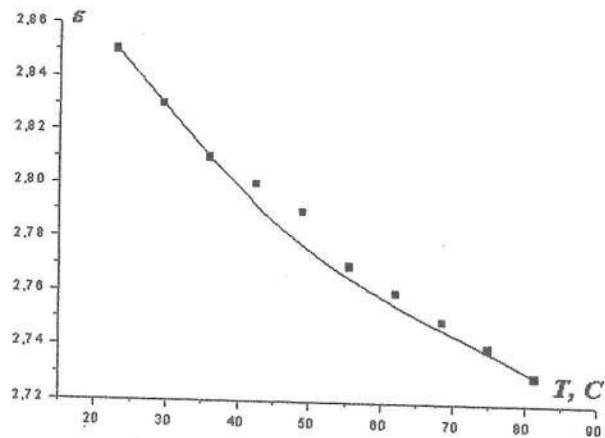
$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (75 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]}$$

$$\epsilon = C_x \cdot \frac{h}{S \cdot \epsilon_0} = 123,2 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 2,85$$

Результаты расчета и эксперимента

Таблица 1. Результаты исследования относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

№	T, C	C, пФ	ϵ	$tg\delta \cdot 10^4$
1	23	123,2	2,85	12
2	29,5	122,4	2,83	12
3	36	121,7	2,81	12
4	42,5	121,1	2,8	12
5	49	120,6	2,79	14
6	55,5	120	2,77	17
7	62	119,6	2,76	18
8	68,5	119,1	2,75	23
9	75	118,6	2,74	31
10	81,5	118,2	2,73	40



Вывод:

По полученным из опыта данным и результатам расчета построили зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры. По виду графиков— исследован неполярный диэлектрик.

Неполярным называется диэлектрик, не содержащий способные к переориентации во внешнем электрическом поле диполи.

В таком диэлектрике проявляется, в основном, только электронная поляризация, обусловленная упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер в диэлектрике.

При смещении электронов под действием внешнего электрического поля в каждом атоме или ионе вещества диэлектрика возникает индуцированный электрический момент μ , пропорциональный напряженности действующего поля в диэлектрике E_d . Коэффициент пропорциональности называется электронной поляризуемостью атома или иона.

$$\mu = q \cdot \Delta l = Z_e \cdot E_d$$

Поляризуемость электронного смещения Z_e не зависит от температуры, но вследствие термического расширения число атомов в единице объема вещества n уменьшается, следовательно, будет уменьшаться и поляризованность диэлектрика.

В неполярном диэлектрике $tg\delta$ обусловлен, в основном, его электрической проводимостью. Диэлектрическими потерями на электропроводность называется часть диэлектрических потерь, обусловленных сквозным током диэлектрика. Плотность сквозного тока в диэлектрике

$$i_{ска} = \gamma_{ска} \cdot E$$

где $\gamma_{ска}$ —удельная электрическая проводимость диэлектрика;
 E —напряженность внешнего электрического поля.

Поскольку диэлектрическая проницаемость неполярного диэлектрика мало изменяется в температурном ходе, то зависимость $tg\delta$ от температуры будет определяться, в основном, изменением удельной электрической проводимости диэлектрика. Т.к. $\gamma_{ска}$ экспоненциально возрастает с повышением температуры, то и $tg\delta$ так же возрастает по экспоненте.

Литература

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.А. Электротехнические материалы. - Л.: Энергия, 1977. - 352 с.
2. Корицкий Ю.В. Основы физики диэлектриков. - М.: Энергия, 1979. - 248 с.
3. Тареев Б.И., Короткова Н.Б. и др. Электрорадиоматериалы. - М.: Высш. школа, 1978. - 336 с.
4. Казарновский Д.А., Тареев Б.М. Испытания электроизоляционных материалов. - Л.: Энергия, 1969. - 296 с.
5. Воробьев Г.А. Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов. - Томск: Изд-во ТГУ, 1984. - 125 с. б. Техника высоких напряжений. / Под ред. В.Д.Разевича. - М.: Энергия, 1976. - 486 с.

Содержание

Введение.....	3
1. Магнитные материалы.....	4
2. Проводниковые материалы.....	10
3. Полупроводниковые материалы.....	15
4. Диэлектрики.....	20
4.1. Электропроводность диэлектриков.....	20
4.2. Поляризация диэлектриков.....	26
4.3. Диэлектрические потери.....	35
4.3.1. Диэлектрические потери в неполярных диэлектриках.....	37
4.3.2. Диэлектрические потери в полярных и ионных диэлектриках.....	38
4.4. Пробой диэлектриков.....	39
4.4.1. Пробой газов.....	40
4.4.2. Пробой жидких диэлектриков.....	41
4.4.3. Пробой твердых диэлектриков.....	43
4.4.4. Электрохимический пробой.....	45
5. Лабораторные работы.....	46
Лабораторная работа 1.....	46
Лабораторная работа 2.....	50
Лабораторная работа 3.....	55
Лабораторная работа 4.....	57
Лабораторная работа 5.....	60
Лабораторная работа 6.....	64
Лабораторная работа 7.....	67
Лабораторная работа 8.....	70
Лабораторная работа 9.....	72
6. Содержание отчетов по лабораторным работам.....	74
7. Форма отчета по лабораторной работе.....	75
Литература.....	80

Дудкин А.Н

Электротехническое Материаловедение

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Подписано к печати 30.03.00

Формат 60 x 84/16. Бумага писчая № 1.

Печать RISO. Усл.печ.л. 4.77 Усл.изд.л. 4.32.

Тираж 200 экз. Заказ...66..

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ № 1 от 18.07.94.

Ротапринт ТПУ, 634034, Томск, пр. Ленина, 30.