

§ 4 «Проводники. Электропроводность металлов, влияние на нее различных факторов»

Проводниками электрического тока могут служить твердые тела, жидкости, а при соответствующих условиях и газы.

Твердыми проводниками являются металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода. Среди металлических проводников различают:

- металлы, обладающие высокой проводимостью, которые используются для изготовления проводов, кабелей, проводящих соединений в микросхемах, обмоток трансформаторов, волноводов и т.д.;

- металлы и сплавы, обладающие высоким сопротивлением, которые применяют в электронагревательных приборах, лампах накаливания, резисторах, реостатах и т.д.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Поскольку температура плавления металлов высока, за исключением ртути ($t_{пл} = -39^{\circ}\text{C}$) и галлия ($t_{пл} = 29,8^{\circ}\text{C}$), поэтому при нормальной температуре в качестве жидкого металлического проводника могут быть применены только эти материалы. Другие металлы являются жидкими проводниками лишь при повышенных или высоких температурах.

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

Электролитами, или проводниками второго рода, являются растворы (в основном водные) кислот, щелочей и солей, а так же расплавы ионных соединений. Прохождение тока через такие проводники связано с переносом вместе с электрическими зарядами частей молекул (ионов), в результате чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.

Все пары и газы, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля выше некоторого критического значения, обеспечивающего начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником, обладающим электронной и ионной электропроводностями. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов и положительных ионов в единице объема представляет собой особую равновесную проводящую среду, называемую плазмой.

С точки зрения классической электронной теории металлов при образовании кристаллической решетки от атомов отщепляются некоторые, слабее всего связанные с ними электроны (валентные). Отщепленные электроны становятся общими для всех атомов и могут свободно перемещаться в кристалле. Именно эти электроны, в отличие от электронов, заполняющих внутренние электронные оболочки атомов, обеспечивают электропроводность металлов. Поэтому их называют электронами проводимости.

Следует отметить, что электроны проводимости в металлах не являются, вообще говоря, абсолютно свободными и испытывают взаимодействие с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Однако в первом приближении этим взаимодействием можно пренебречь. Справедливость такого подхода подтверждается, в частности, высокой проводимостью металлов, что может иметь место только в случае достаточно свободного движения электронов внутри проводника. Таким образом, в проводниках можно рассматривать идеальный газ свободных электронов или электронный газ.

При обычных температурах распределение электронов в металлах по энергетическим уровням подчиняется статистике Ферми-Дирака:

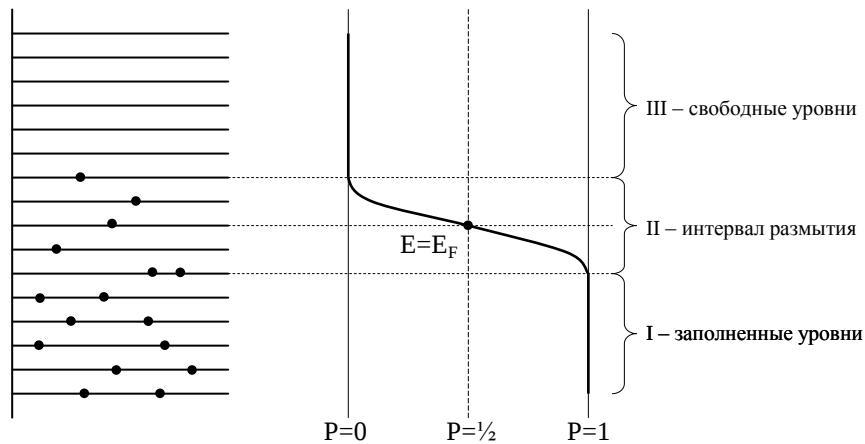
$$P(E) = \left[1 + \exp \frac{E - E_F}{k \cdot T} \right]^{-1} \quad (1)$$

где $P(E)$ – вероятность того, что электрон имеет энергию E ;

E – энергия уровня, вероятность заполнения которого определяется;

E_F – энергия эталонного уровня, вероятность заполнения которого электронами равна $\frac{1}{2}$ и относительно которого кривая вероятности симметрична. Эта энергия соответствует средней энергии размытой верхней границы распределения. Энергию E_F называют уровнем Ферми, а соответствующий ему потенциал $\varphi_F = \frac{E_F}{q}$ – электрохимическим потенциалом.

Если в энергетической зоне электронов меньше, чем требуется для ее заполнения, то они занимают уровни, начиная от “дна” зоны снизу вверх. При этом вероятность заполнения уровней зависит от их энергии и верхняя граница заполнения оказывается слегка размытой.



К основным параметрам проводниковых материалов относят удельную проводимость и удельное сопротивление.

Удельная проводимость (удельная электропроводность) – мера способности вещества проводить электрический ток. В системе СИ удельная электропроводность измеряется в единицах $1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$ или См/м . Величину, обратную удельной проводимости, называемую удельным сопротивлением ρ , для проводника с постоянным поперечным сечением S и длиной l вычисляют по формуле $\rho = RS/l$. Для измерения удельного сопротивления проводников на практике пользуются единицей $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

Диапазон удельных сопротивлений металлических проводников довольно узок – от 0,016 для серебра и примерно до 10 $\text{мкОм} \cdot \text{м}$ для железо-хром-кобальто-алюминиевых сплавов, т. е. занимает всего три порядка.

Величину удельного сопротивления металлического проводника на основании электронной теории металлов можно определить следующим образом:

$$\rho = \frac{2m v_T}{e^2 n l_{cp}}, \quad (2)$$

где m – масса электрона;

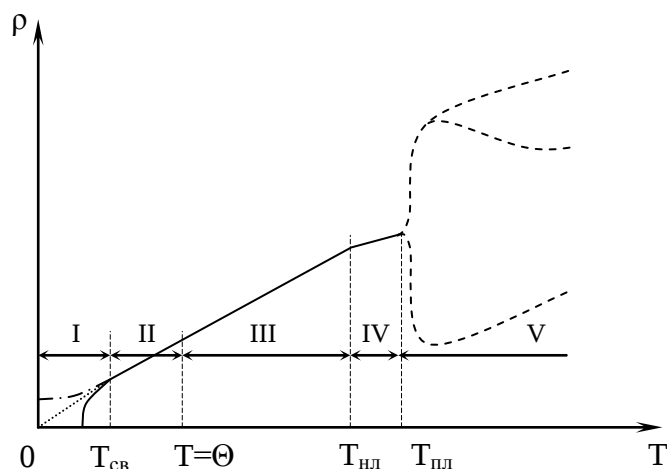
v_T – средняя скорость теплового движения электрона внутри металлического проводника;

l_{cp} – средняя длина свободного пробега электрона.

Для различных проводников скорости хаотического движения примерно одинаковы. Незначительно отличаются также и концентрации свободных электронов; так, например, для меди и никеля эта разница составляет менее 10%. Поэтому величина удельного сопротивления в основном зависит от средней длины свободного пробега электрона в данном проводнике, которая в свою очередь зависит от строения проводника, его структуры. Чистые металлы с совершенной кристаллической решеткой характеризуются наименьшим удельным сопротивлением; примеси, искажая решетку, приводят к его увеличению. К такому же выводу можно прийти, имея в виду волновую природу электронов. Рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. Нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн. В металлическом проводнике, где длина волны электрона около $5 \text{ \AA}$, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов, а следовательно, приводят к росту удельного сопротивления материала.

Число свободных носителей заряда (концентрация электронов) с увеличением температуры в металлическом проводнике остается неизменным. Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения электронов, т.е. уменьшается средняя длина свободного пробега и подвижность электронов понижается. Поэтому удельное сопротивление металлов с повышением температуры возрастает.

Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры имеет графический вид:



Ход этой зависимости для различных металлов и в разных температурных областях неодинаков.

В узкой области I, составляющей несколько Кельвинов, у ряда металлов может наступить состояние сверхпроводимости. У теоретически абсолютно чистых металлов удельное сопротивление должно стремиться к нулю (пунктирная кривая), а у технически чистых металлов, не обладающих сверхпроводимостью, оно должно определяться только рассеянием носителей заряда на примесях (штрихпунктирная кривая).

Явление сверхпроводимости объясняется связыванием направленно движущихся электронов друг с другом и образованием так называемых “куперовских пар”. При переходе в сверхпроводящее состояние сопротивление может скачком в очень узком диапазоне температур падать на несколько порядков и составлять $5 \cdot 10^{-18} \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Наблюдается у таких металлов как вольфрам и ниобий.

В пределах области II наблюдается быстрый рост удельного сопротивления $\rho \sim T^n$, где n может быть до 5 и убывает с ростом температуры до 1 при $T=\Theta$. В этой области рост удельного сопротивления с температурой определяется включением новых частот тепловых колебаний (фононов) кристаллической решетки металлов, которое заканчивается при $T=\Theta$. Для большинства металлов $\Theta=100\div 400\text{K}$.

В области III наблюдается практически линейный участок роста удельного сопротивления за счет линейного возрастания с температурой амплитуд колебаний узлов кристаллической решетки.

В области IV, начиная с $T_{\text{нл}}$ (температура отступления от линейной зависимости), удельное сопротивление металла приходит к некоторому насыщению. Для многих металлов этот участок кривой невелик и находится вблизи от температуры плавления металла.

Область V, начинающаяся с $T_{\text{пл}}$, характеризует изменение удельного сопротивления в точке плавления и расплавленного металла.

§ 5 «Диэлектрики. Поляризация диэлектриков»

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся тем, что электрический момент некоторого макроскопического его объема имеет значение, отличное от нуля. У одного и того же материала могут иметь место одновременно различные механизмы поляризации.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов.

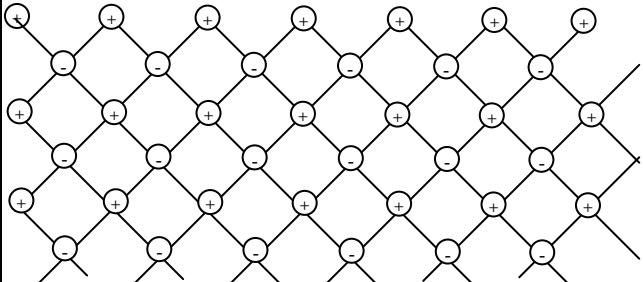
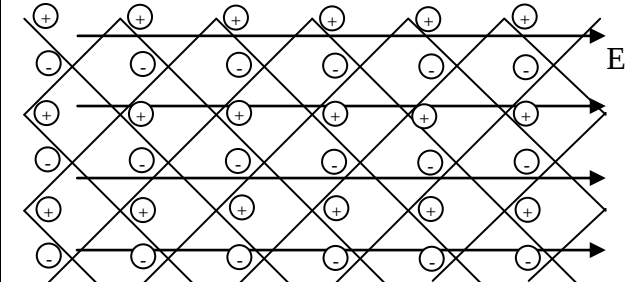
Модель атомов водорода	
в отсутствие поля	при воздействии поля

Время установления электронной поляризации очень мало – около $10^{-6} \div 10^{-7}$ сек. Поэтому ее условно называют мгновенной. Она проявляется во всем частотном диапазоне, вплоть до $10^{-6} \div 10^{-7}$ Гц.

Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерями энергии до резонансных частот.

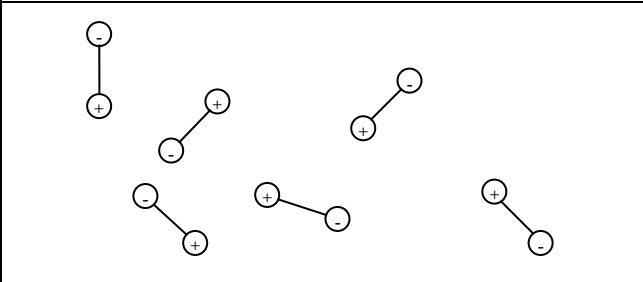
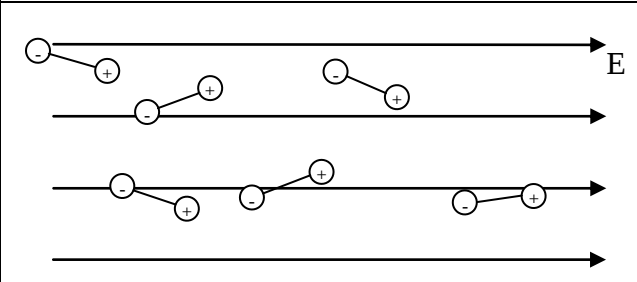
Поляризуемость частиц при электронной поляризации не зависит от температуры, а диэлектрическая проницаемость ϵ уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема.

Ионная поляризация характерна для твердых тел с ионным строением и обуславливается смещением упруго связанных ионов на расстояния, меньше постоянной решетки. Ионная связь определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами. Типичными примерами ионных кристаллов являются соли щелочных металлов, например NaCl. Молекулы веществ с ионной связью полярны.

Схема расположения ионов каменной соли	
в узлах кристаллической решетки в отсутствие поля	смещенных на небольшое расстояние при воздействии поля
	

Величина поляризации с повышением температуры возрастает в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, так как расстояния между ними при тепловом расширении увеличиваются. Время установления ионной поляризации порядка 10^{-13} сек.

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

Примерное распределение дипольных молекул	
в отсутствие поля	при воздействии поля
	

С увеличением температуры молекулярные силы ослабевают, что должно усиливать дипольно-релаксационную поляризацию. Однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому величина дипольно-релаксационной поляризации с увеличением температуры сначала возрастает, пока ослабление молекулярных сил сказывается сильнее, чем возрастание хаотического теплового движения. Затем, когда хаотическое движение становится интенсивнее, величина дипольно-релаксационной поляризации с ростом температуры начинает падать. После снятия электрического поля ориентация частиц ослабевает постепенно.

Время релаксации – это промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полем диполей после снятия поля уменьшается вследствие наличия теплового движения в 2,7 раз от первоначального значения, т.е. система из неравновесного состояния переходит в равновесное.

Поворот диполей в направлении поля в вязкой среде требует преодоления некоторого сопротивления, поэтому дипольно-релаксационная поляризация связана с потерями энергии на выделение тепла.

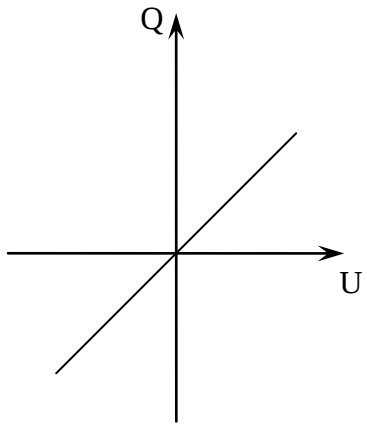
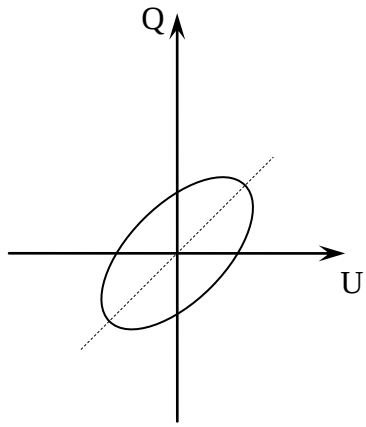
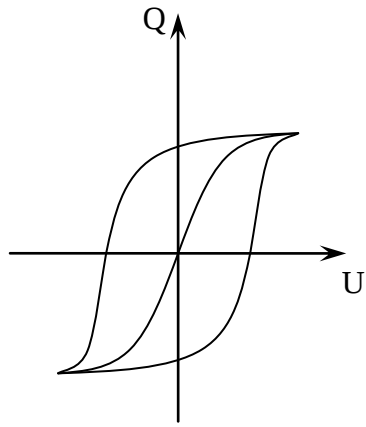
Ионно-релаксационная поляризация наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (хлористый цезий). В этом случае слабо связанные ионы

вещества под воздействием внешнего поля смещаются на расстояние, превышающее постоянную решетки. После снятия поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия.

Электронно-релаксационная поляризация возникает за счет возбужденных тепловой энергией избыточных электронов и дырок.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация существует только у группы твердых диэлектриков, обладающих такими же особенностями поляризации, как и сегнетова соль, и поэтому получили название сегнетоэлектриков.

В случае спонтанной поляризации, при некотором значении напряженности внешнего поля наступает насыщение, и дальнейшее усиление поля уже не вызывает возрастания интенсивности поляризации. Поляризация сегнетоэлектриков связана с затратами энергии, поэтому в переменном электрическом поле обнаруживается гистерезисная петля “переполаризация”. Площадь петли пропорциональна энергии, рассеянной за один период.

		
Для линейных диэлектриков с безынерционными механизмами поляризации (электронная, ионная)	Для диэлектриков с замедленными механизмами поляризации (релаксационными)	Для нелинейных диэлектриков (сегнетоэлектриков)

На рисунке показаны зависимости заряда конденсатора от напряжения (с переменной полярности) для линейных диэлектриков с безынерционными механизмами поляризации (электронной, ионной) и для материалов с замедленными, или релаксационными, механизмами поляризации. Площадь эллипса пропорциональна количеству энергии, рассеиваемой диэлектриком за один период изменения напряжения вследствие наличия у него релаксационных механизмов поляризации. Для нелинейных диэлектриков (сегнетоэлектриков) в этих условиях кривая зависимости заряда от напряжения приобретает вид петли гистерезиса.

§ 6 «Электропроводность диэлектриков, влияние на нее различных факторов»

Поляризационные процессы любых зарядов в веществе, протекающие во времени до момента установления равновесного состояния, обуславливают появление поляризационных токов или токов смещения в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризациях кратковременны и не поддаются измерению.

Токи смещения при различных видах замедленной поляризации называют абсорбционными токами.

При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в периоды включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов, а так же инжекция их из электродов приводят к возникновению небольших токов сквозной электропроводности (сквозных токов).

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

$$J_{\text{ут}} = J_{\text{аб}} + J_{\text{ск}}.$$

После завершения процессов поляризации через диэлектрик протекает только сквозной ток.

Поляризационные токи следует принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков, поскольку при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно реагируется не только сквозной ток, но и сопровождающий его ток абсорбции, вследствие чего может сложиться неправильное представление о большой проводимости диэлектрика.

Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току, который сопровождается выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении проводимость определяется не только сквозным током, но и составляющими поляризационных токов.

В большинстве случаев электропроводность диэлектриков ионная, реже – электронная.

Сопротивление диэлектрика, заключенного между двумя электродами при постоянном напряжении, т.е. сопротивление изоляции, можно вычислить по формуле:

$$R_{\text{из}} = \frac{U}{I_{\text{ут}} - \sum I_{\text{пол}}}$$

где U – приложенное напряжение,

$I_{\text{ут}}$ – наблюдаемый ток утечки,

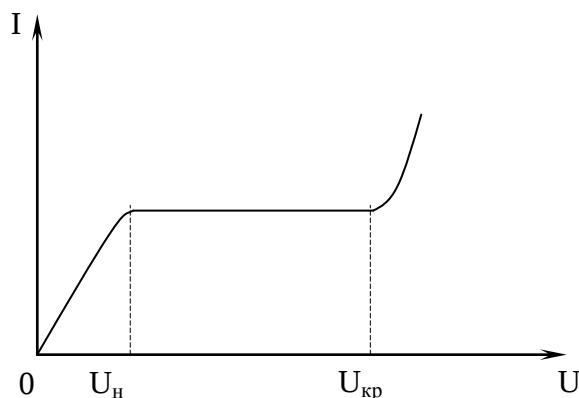
$\sum I_{\text{пол}} = I_{\text{аб}}$ – сумма токов, вызванных замедленными механизмами поляризации, ток абсорбции.

Поскольку измерение поляризационных токов даже при замедленных механизмах поляризации осуществить довольно сложно, сопротивление диэлектрика обычно рассчитывают как отношение величины приложенного напряжения к величине тока, измеренной через 1 минуту после включения напряжения. Значение сопротивления изоляции зависит не только от самого диэлектрика, но и от материала электродов.

Электропроводность изоляционных материалов обуславливается состоянием вещества: газообразным, жидким или твердым.

Газы при небольших напряженностях электрического поля обладают очень малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений ионизированных частиц самого газа, ускоренных электрическим полем, с молекулами газа (ударная ионизация). Одновременно с процессом ионизации, при коротком происходит образование положительных и

отрицательных ионов или электронов, часть положительных ионов, соединяясь с отрицательными частицами, образует нейтральные молекулы. Этот процесс называется рекомбинацией.



Начальный участок кривой, до напряжения U_n , соответствует выполнению закона Ома, когда число положительных и отрицательных ионов можно считать независимым от величины напряжения. По мере возрастания величины приложенного напряжения ионы, не успевая рекомбинировать, будут разряжаться на электродах. Дальнейшее увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока (участок от U_n до $U_{кр}$). Ток при увеличении напряжения остается постоянным, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов. При возникновении ударной ионизации ток начинает быстро увеличиваться с ростом напряжения.

Электропроводность жидких диэлектриков связана со строением их молекул. Ток в жидком диэлектрике может быть обусловлен как передвижением ионов, так и перемещением крупных заряженных частиц. Удельная проводимость любой жидкости в значительной степени зависит от температуры. С увеличением температуры, в результате уменьшения вязкости, возрастает подвижность ионов и может увеличиваться степень тепловой диссоциации молекул. Эти факторы приводят к увеличению удельной проводимости. При очень больших напряженностях электрического поля (порядка $10^{-6} \div 10^{-7}$ В/м), электропроводность жидкостей не соответствует закону Ома, что объясняется увеличением числа движущихся ионов под влиянием поля.

Электропроводность твердых тел обуславливается как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а у некоторых материалов может быть вызвана наличием свободных электронов. В процессе протекания тока через твердый диэлектрик, содержащиеся в нем ионы примесей могут частично удаляться, выделяясь на электродах, что приводит к постепенному уменьшению проводимости.

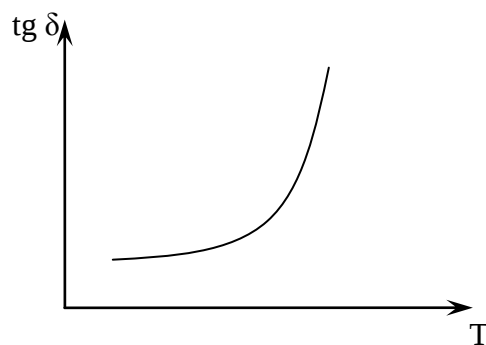
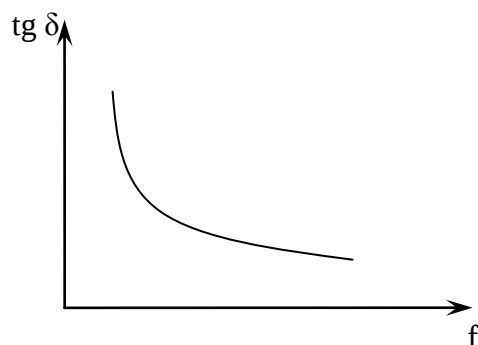
§ 7 «Диэлектрические потери. Пробой диэлектриков»

Диэлектрическими потерями называют электрическую мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле. Потери энергии в диэлектриках наблюдаются, как правило, как при переменном, так и при постоянном напряжении, поскольку в технических материалах обнаруживается сквозной ток утечки, обусловленный электропроводностью. Диэлектрические потери в изоляционном материале характеризуются величиной рассеиваемой мощности в единице объема – удельными потерями. Однако, чаще всего, для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют понятие угла диэлектрических потерь и его тангенса.

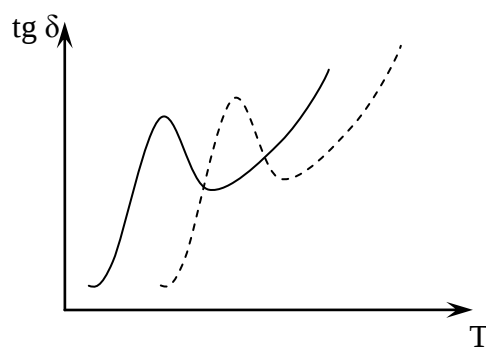
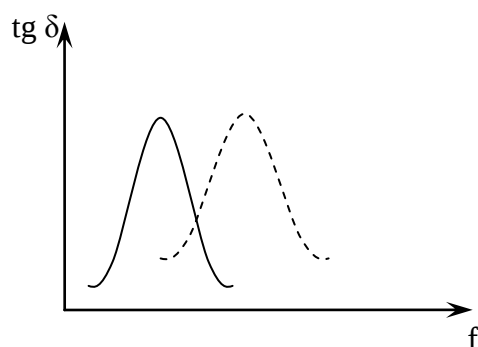
Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи опережает вектор напряжения на 90° , и угол диэлектрических потерь δ равен нулю.

Диэлектрические потери по природе и особенностям можно подразделить на 4 вида:

1) Потери на электропроводность – обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность.



2) Релаксационные потери – обусловлены активными составляющими поляризационных токов. Эти потери характеризуются наличием взаимосвязанных максимумов на частотной и температурной зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь, определяемых временем релаксации.



3) Ионизационные потери – свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии.

4) Резонансные потери – наблюдаются в некоторых газах на строго определенной частоте и выражаются в интенсивном поглощении энергии электромагнитного поля. Здесь так же характерно наличие максимума на частотной зависимости $\text{tg } \delta$, однако при изменении температуры максимум не смещается.

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, может потерять свойства изоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление называют пробоем диэлектрика.

Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называют напряжением пробоя, а соответствующую напряженность поля – электрической прочностью диэлектрика.

Для твердых диэлектриков характерны электрический и тепловой виды пробоя.

Электрический пробой характеризуется весьма быстрым развитием, он протекает за время $10^{-7} \div 10^{-8}$ сек. Пробой является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Электроны рассеивают энергию своего движения, накопленную в электрическом поле за счет возбуждения упругих колебаний узлов кристаллической решетки. Электроны, достигшие определенной

критической скорости, выбивают электроны из атомов, и стационарное состояние нарушается, т.е. возникает ударная ионизация.

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепла, выделяющегося в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает количество тепла, которое может рассеиваться в данных условиях. При этом нарушается тепловое равновесие, а процесс приобретает лавинообразный характер. Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температуры плавления, обугливания и пр.

Литература

1. Пасынков В.В. Материалы электронной техники: Учеб. для вузов.
2. Капралов С.А., Антоненков О.В. Основы физики конденсированных сред: Учебное пособие / НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Новгород, 2004. – 55 с.