

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.Г. Кистенева

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ
ЗАВИСИМОСТИ ЕМКОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Методические указания к лабораторному занятию
по дисциплинам «Материаловедение и технология материалов»,
«Материалы и компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и
радиокомпоненты»

Томск
2022

УДК 538.956

ББК 22.379

К 448

Рецензент

Еханин С.Г., доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

Кистенева Марина Григорьевна

Исследование температурной зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков: методические указания к лабораторному занятию по дисциплинам «Материаловедение и технология материалов», «Материалы и компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и радиокомпоненты» / М.Г. Кистенева. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 28 с.

В методических указаниях кратко изложено влияние температуры на электрические параметры емкости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.956

ББК 22.379

© Кистенева М.Г., 2022

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| 1 Поляризация диэлектриков | 4 |
| 1.1 Упругие виды поляризации..... | 8 |
| 1.2 Релаксационные виды поляризации | 11 |
| 2.3 Спонтанная поляризация..... | 15 |
| 2.4 Зависимость ϵ от температуры..... | 16 |
| 2 Диэлектрические потери | 20 |
| 3 Задание | 26 |
| 4 Вопросы для самопроверки..... | 28 |
| 5 Список рекомендуемой литературы | 28 |

Введение

Цель работы: освоить методику измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов диэлектриков, исследовать физические явления в диэлектриках и на основе полученных результатов измерений произвести расчеты электрических характеристик и геометрических размеров элементов конструкций радиоэлектронной аппаратуры.

1 Поляризация диэлектриков

Диэлектрики обладают чрезвычайно малой электропроводностью. Удельное сопротивление типичных диэлектриков составляет 10^8 – 10^{17} Ом м. Это означает, что в диэлектриках очень мало носителей заряда: электронов, дырок, слабо закрепленных ионов, способных двигаться под действием электрического поля. В силу малой концентрации свободных зарядов, при рассмотрении явления поляризации, примем для упрощения, что они в диэлектриках отсутствуют. Однако связанные заряды (электроны оболочек атомов, атомные ядра, ионы) присутствуют повсеместно, в большом количестве и оказывают значительное влияние на электрические свойства диэлектриков. Связанные заряды, в отличие от свободных, не могут перемещаться под действием электрического поля на большие расстояния. Они могут лишь немного смещаться друг относительно друга на очень малые расстояния из своих равновесных состояний: положительные – в направлении вектора напряженности поля E , отрицательные – в обратном направлении. *Поляризация* – это направленное перемещение в материале большого количества связанных зарядов.

В результате смещения связанных зарядов каждый элементарный объем диэлектрика dv приобретает индуцированный (наведенный) электрический момент dp . Образование индуцированного электрического момента в диэлектрике и представляет собой явление *поляризации*. Таким образом, *поляризация* – это состояние вещества, характеризующее тем, что электрический момент данного объема этого вещества имеет значение, отличное от нуля.

Количественно интенсивность поляризации диэлектрика определяется *поляризованностью* P , равной отношению индуцированного электрического момента объема диэлектрика к этому объему, когда последний стремится к нулю:

$$P = \frac{dp}{dv} \quad (1.1)$$

Поляризованность – векторная величина, ее направление совпадает с направлением электрического момента – от отрицательного заряда к положительному. Так как электрический момент измеряется в Кл·м, а объем в м³, то формула (1.1) дает единицу модуля поляризованности – кулон на квадратный метр (Кл/м²).

Способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле характеризуется таким параметром, как *диэлектрическая проницаемость* – безразмерная физическая величина, зависящая от реакции диэлектрика на электрическое поле.

Если взять плоский конденсатор в вакууме, то заряд на каждой его пластине равен (по модулю):

$$Q_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S \cdot U}{d} \quad (1.2)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная;

S – площадь каждой из пластин;
 d – зазор между пластинами;
 U – напряжение между ними.

Если в межэлектродное пространство ввести диэлектрик, то в отключенном от источника заряженном конденсаторе заряд не может измениться, т.к. ему некуда утекать и неоткуда притекать. В этом случае уменьшаются напряжение на конденсаторе и напряженность поля в конденсаторе. Коэффициент ослабления поля равен ϵ .

В подключенном конденсаторе напряжение между пластинами принудительно поддерживается, но заряд на каждой пластине увеличивается до нового значения Q_m . Ясно, что заряд притекает из источника. Коэффициент увеличения заряда тот же самый, как и в случае ослабления поля в отключенном от источника конденсаторе, т.е. он равен отношению $Q_m / Q_0 = \epsilon$.

Величина диэлектрической проницаемости ϵ определяет и емкость конденсатора, которая равна

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d} \quad (1.3)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость для всех диэлектрических материалов больше единицы, а ее величина зависит от вида поляризации, который наблюдается в данном диэлектрике.

Для большинства диэлектриков в слабых электрических полях поляризованность пропорциональна напряженности поля.

Физически, процесс поляризации может протекать по-разному и сопровождаться различными явлениями, поэтому поляризацию разделяют на виды и классы. Различают поляризацию, возникающую под действием

внешнего электрического поля, и спонтанную (самопроизвольную), существующую в отсутствие поля. Поляризацию, возникающую под действием электрического поля, разделяют на *упругую*, *релаксационную* и *миграционную* (рисунок 1.1).

Принципиальные отличия упругих и неупругих видов поляризации отображены в таблице 1.1.



Рисунок 1.1 – Виды поляризации

Таблица 1.1. Особенности упругих и неупругих видов поляризации

| Упругие виды | Неупругие виды |
|---|---|
| 1. Малое время установления $\tau < \sim 10^{-12}$ с | 1. Относительно большое время установления $\tau < \sim 10^{-7}$ с |
| 2. Малые смещения связанных зарядов (в пределах упругих сил), на расстояния значительно меньшие межатомных. | 2. Смещение связанных зарядов происходит на расстояния порядка межатомных (упругие силы преодолеваются) |

| | |
|---|---|
| 3. Отсутствие рассеяния энергии в виде тепла на радиочастотах | 3. Имеют место потери энергии в виде тепла на радиочастотах |
|---|---|

1.1 Упругие виды поляризации

Электронно-упругая поляризация (поляризация электронного упругого смещения) – это смещение электронных оболочек атомов относительно ядер под действием поля, в результате чего атомы обретают индуцированный момент (см. рисунок 1.2). Легче всего смещаются и деформируются внешние электронные оболочки. Результирующий индуцированный момент относительно мал, поэтому, несмотря на то, что смещение электронных оболочек происходит в каждом атоме, восприимчивость неполярных твердых диэлектриков мала и составляет $\chi \sim 1 \div 2$. Соответственно, $\varepsilon \sim 2 \div 3$. К неполярным твердым диэлектрикам, относятся, например, полимеры с симметричным строением звеньев.



Рисунок 1.2 – Схема, поясняющая возникновение электронно-упругой поляризации

Электронная поляризация, в силу малой массы электрона, устанавливается за очень малые времена $\tau \sim 10^{-15} \div 10^{-14}$ с. Особенностью поляризации электронного

упругого смещения является то, что она дает свой вклад в общую поляризацию в любом материале.

Ионно-упругая поляризация (поляризация ионного упругого смещения) свойственна исключительно ионным кристаллам. Картину поляризации проиллюстрируем на примере кристалла типа NaCl (рисунок 1.3, а). Рассмотрим ионные цепи вдоль направления воздействия внешнего поля. В данном случае каждый ион с зарядом $\pm q$ можно мысленно разбить на две половинки. В отсутствие электрического поля электрические моменты каждого звена одинаковы и равны значению $(qr_0)/2$, но чередуются по направлению, и потому компенсируют друг друга. Суммарный момент всего кристалла получается нулевым. Действие поля приводит к смещению ионов положительного знака вдоль направления поля, а ионов отрицательного знака – против направления поля. В результате нарушения равенства плеч диполей с противоположным направлением моментов, кристалл в целом обретает отличную от нуля поляризованность.

Восприимчивость ионно-упругой поляризации во многом определяется силами связи ионов в решетке и плотностью упаковки. Для большинства ионных кристаллов, в частности для щелочно-галогидных соединений, полная (вместе с электронно-упругой) восприимчивость составляет $\chi \sim 4 \div 10$ и, соответственно, $\epsilon \sim 5 \div 11$. Характерные времена установления ионной поляризации значительно больше, чем времена установления электронной поляризации, и составляют $\tau \sim 10^{-13} \div 10^{-12}$ с, что объясняется большей инерционностью при смещении массивных ионов по отношению к смещению легких электронных оболочек. Однако эти времена являются малыми по сравнению с периодами радиосигналов, поэтому поляризации, связанные с упругим

смещением атомных частиц, успевают достигнуть равновесных значений для каждого мгновенного значения напряженности поля на радиочастотах.

Дипольно-упругая поляризация свойственна полярным кристаллам, в которых, в отличие от ионных кристаллов, можно выделить отдельные молекулы, имеющие собственный электрический момент. К таким кристаллам относятся многие окислы, например, Al_2O_3 , In_2O_3 и другие. Без воздействия поля электрические моменты компенсируют друг друга в силу строгой периодичности в их ориентации. На рисунке 2.3, б для простоты вместо полярных молекул схематично изображены их моменты. При воздействии внешнего электрического поля каждый диполь, поворачиваясь на небольшой угол, обретает некоторый индуцированный момент, а весь кристалл – отличную от нуля поляризованность.

Следует подчеркнуть, что, как и в случае ионной поляризации, смещение зарядов при ориентации диполей мало в силу плотной упаковки молекул. Это отличает данную поляризацию от дипольно-ориентационной поляризации, при которой дипольные структуры способны поворачиваться на большие углы, что в свою очередь, эквивалентно перемещениям зарядов на расстояния порядка межатомных расстояний. По параметрам дипольно-упругая поляризация сходна с ионной поляризацией. Она имеет те же характерные времена установления. Диэлектрическая проницаемость кристаллов, в которых доминирует этот вид поляризации, имеет порядок $\epsilon \sim 5 \div 30$.

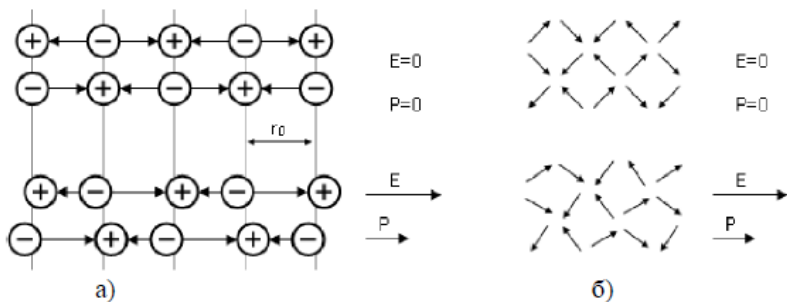


Рисунок 1.3 – Схемы, поясняющие возникновение ионно-упругой (а) и дипольно-упругой (б) поляризации.

Общим признаком упругих видов поляризации является то, что поляризация происходит очень быстро и без потерь, индуцированный электрический момент возникает за счет упругого смещения частиц в диэлектрике.

1.2 Релаксационные виды поляризации

Если заряды "привязаны" к своему месту относительно слабо и способны, преодолев упругие силы, сместиться на расстояние, равное одному или нескольким межатомным расстояниям, то возникает их взаимодействие с окружающими частицами. В этом случае индуцированный электрический момент возникает в результате смещения слабосвязанных частиц или в результате ориентации постоянных диполей в направлении внешнего поля. Такие механизмы называются *релаксационными* и характеризуются тем, что сопровождаются потерями электрической энергии и сильно зависят от интенсивности теплового движения, т.е. от температуры.

Следует заметить, что причиной возникновения неупругих поляризаций является совместное действие внешнего электрического поля и теплового движения

частиц среды. Одно внешнее поле неспособно разорвать даже слабые связи, поэтому релаксационная поляризация должна быть термоактивирована. Температура активирует перескоки из одного устойчивого состояния в другое, а поле создает дисбаланс в количестве перескоков, что и является причиной поляризации. Таким образом, в процессе неупругой релаксационной поляризации часть энергии внешнего поля будет передана среде в виде тепловой энергии. Реакция этих частиц на изменение внешнего поля уже не такая быстрая, как в случае поляризации упругого типа. После исчезновения внешнего поля частицы возвращаются в исходное состояние не мгновенно, а через определенное время, и не под действием упругих сил связи, а в результате хаотического теплового движения. Вследствие этого, характерное время установления поляризации определяется не динамикой смещения частиц в поле, а характерным временем термоактивационного прыжка.

Название "релаксационные" большинство неупругих видов поляризации получило из-за того, что процесс их установления во времени t описывается *релаксационными* законами, содержащими затухающие экспоненты типа $\exp(-t/\tau)$. Параметр τ , который называется *временем релаксации*, по сути определяет время установления данной поляризации. Если период приложенного переменного напряжения меньше τ , то диполи не успевают ориентироваться вслед за полем, и дипольная поляризация не дает вклада в поляризованность диэлектрика. Так как τ обычно имеет порядок $10^{-6} - 10^{-10}$ с, дипольная поляризация проявляется лишь на частотах ниже $10^6 - 10^{10}$ Гц. При понижении температуры τ сильно возрастает.

Ионно-релаксационная поляризация наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов,

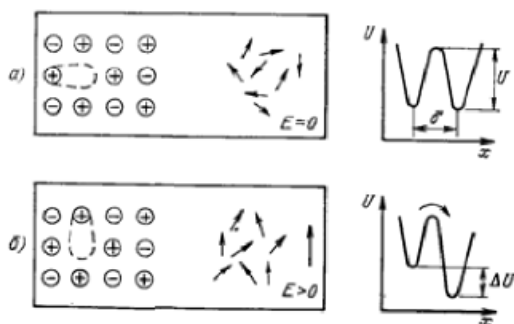
например, в неорганических стеклах и в некоторых кристаллических веществах. Ионно-релаксационная поляризация – это переброс в твердом диэлектрике на другое место слабо закрепленных в решетке ионов. Ионы, находящиеся в междоузлиях, а также ионные вакансии могут изменять свое местоположение под влиянием теплового движения. Это происходит при достаточной тепловой подвижности ионов, когда они отрываются от своего места в решетке и закрепляются в другом, недалеко от своего места. При этих перемещениях ионы преодолевают потенциальные барьеры и некоторое время задерживаются в новых положениях. При отсутствии внешнего электрического поля такое перемещение заряженных частиц является неупорядоченным, случайным и не приводит к поляризации. Внешнее электрическое поле вносит такие изменения в распределение ионов по дефектным местам кристаллической решетки, что возникает индуцированная полем поляризация (рисунок 1.4). После снятия электрического поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия, т.е. этот механизм можно отнести к релаксационной поляризации, при которой имеет место необратимое рассеяние энергии.

Дипольно-релаксационная поляризация (ориентационная поляризация). Температура и поле играют ту же роль, что и в ионно-релаксационной поляризации: температура активизирует перескоки из одной потенциальной ямы в другую, а поле создает дисбаланс в количествах перескоков по и против направления поля. Когда внешнее электрическое поле отсутствует ($E = 0$), диполи ориентированы хаотично, и поляризованность $P = 0$. При приложении внешнего поля в процессе теплового движения часть диполей ориентируется по полю, вследствие чего

появляется новое равновесное состояние – поляризованное (рисунок 1.4).

Чем выше напряженность электрического поля, тем большая часть диполей в единице объема ориентирована и тем выше поляризованность.

Типичными представителями диэлектриков, обладающих дипольно-релаксационной поляризацией, являются полярные жидкости, в которых поляризация происходит за счет поворота полярных молекул. В жидкостях молекулы относительно свободны, и в процессе поворота преодолевают небольшие потенциальные барьеры, связанные с действием межмолекулярных сил.



- а) в отсутствие поля ионные перескоки и ориентация диполей хаотичны, энергетические барьеры эквивалентны;
- б) во внешнем поле тепловые перебарсы ионов и диполей приобретают направленность, а барьер становится асимметричным

Рисунок 1.4 – Схемы, поясняющие возникновение релаксационной поляризации

В твердых диэлектриках сложные молекулы лишены возможности поворачиваться целиком на большие углы. В

полярных кристаллах возможность дипольной переориентации существенно ограничена: обычно имеется только определенное число устойчивых ориентаций, разделенных потенциальными барьерами. В этом случае при отсутствии электрического поля диполи ориентированы равномерно по всем разрешенным направлениям, а приложение электрического поля повышает вероятность их ориентации в благоприятном направлении. В рыхлых полярных полимерах некоторые поперечные молекулярные звенья могут поворачиваться относительно оси углеродных цепей.

2.3 Спонтанная поляризация

Спонтанная поляризация протекает у особого вида диэлектриков, называемых сегнетоэлектриками. Спонтанная (самопроизвольная) поляризация – это поляризация, возникающая под влиянием внутренних процессов в диэлектрике, без внешних воздействий при температуре ниже некоторой критической, называемой температурой Кюри T_K . Внутри сегнетоэлектриков имеются области (домены) со слабо связанными диполями. В каждом из доменов электрические моменты диполей направлены одинаково, но в разных доменах моменты диполей направлены противоположно. Поэтому электрические моменты твердых диполей взаимно уравновешены и общий электрический момент сегнетоэлектрика равен нулю.

Внешнее электрическое поле изменяет направление электрических моментов доменов, что создает эффект очень сильной поляризации. Этим объясняются свойственные сегнетоэлектрикам сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 10^3 \div 10^5$). Под действием электрического поля происходит необратимое смещение доменных границ. При этом разрастаются

домены с преимущественной ориентацией, у которых вектор спонтанной поляризации образует наименьший угол с направлением поля. При некоторой напряженности поля все домены оказываются ориентированы по полю. Наступает состояние насыщения, что соответствует однодоменному состоянию. Наряду с этим в сегнетоэлектрике протекают процессы ионной и электронной поляризации.

Специфические свойства сегнетоэлектриков проявляются лишь в определенном диапазоне температур. В процессе нагревания выше некоторой температуры происходит распад доменной структуры, и сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние. Температура T_K такого фазового перехода получила название сегнетоэлектрической точки Кюри. В точке Кюри диэлектрическая проницаемость достигает своего максимального значения, а при дальнейшем увеличении температуры спонтанная поляризация исчезает.

2.4 Зависимость ϵ от температуры

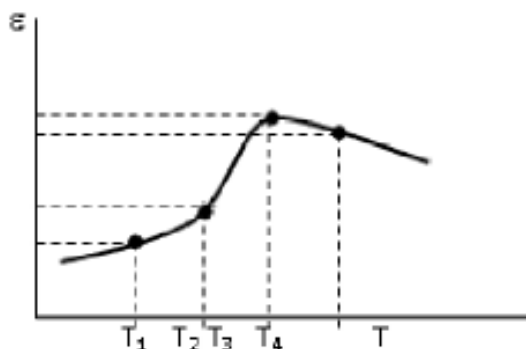
В материалах с чисто электронной поляризацией наблюдается слабое, практически линейное снижение диэлектрической проницаемости с ростом температуры T . Объяснение этому тривиальное – с возрастанием температуры всякое вещество расширяется и снижается концентрация молекул. При этом, очевидно, снижаются поляризованность и восприимчивость.

В *ионных диэлектриках* объемное расширение материала приводит к возрастанию эффективного размера плеча каждой ионной связи, а потому и к увеличению эффективного индуцированного момента, приходящегося на один ион. Связанный с этим эффект увеличения восприимчивости ионной поляризации, как правило,

доминирует над уменьшением восприимчивости электронной поляризации, и в целом, температурная зависимость диэлектрической проницаемости ионных кристаллов оказывается возрастающей.

Таким образом, практически во всех материалах, в которых отсутствуют релаксационные виды поляризации, зависимость $\epsilon(T)$ является монотонной и слабой с $TK\epsilon \sim \pm 10^{-5} \div 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

В *полярных диэлектриках*, в которых присутствует релаксационная поляризация, температурная зависимость диэлектрической проницаемости может быть гораздо более сложной, и связано это, прежде всего, с сильными зависимостями от температуры значений восприимчивости и времени релаксации. Предположим, что диэлектрик имеет один тип релаксаторов. Соответствующая явная зависимость $\epsilon(T)$ при фиксированной частоте f_0 показана на рисунке 1.5.



Рисунке 1.5 – Зависимость диэлектрической проницаемости в диэлектриках с релаксационной поляризацией от температуры

Допустим, диэлектрик сначала находится при относительно низкой температуре T_1 , и на него подано напряжение с достаточно большой фиксированной частотой, такой, что $f_0 > 1 / \tau(T_1)$. При такой температуре релаксационная поляризация не активирована. В этом диапазоне температур проявляются только процессы упругой поляризации, ϵ слабо зависит от температуры, и значение ϵ относительно мало. Повышение температуры при фиксированной частоте f_0 , как видно из рисунка 1.5, вначале приводит к росту ϵ , а затем к относительно медленному спаду. Таким образом, в полярных диэлектриках зависимость $\epsilon(T)$ может иметь вид кривой с максимумом.

Физическая трактовка проста. Вначале рост температуры стимулирует перескоки ионов и диполей. Однако после того как процесс поляризации активирован, температура играет отрицательную роль в отношении к поляризации. Перескоки становятся столь частыми, что вероятность перескоков с ориентацией моментов в сторону поля все более сравниваются с вероятностью обратных перескоков. Температура все более нарушает поляризационный порядок, иными словами, при повышении температуры, тепловые колебания вносят все больший хаос в ориентацию моментов диполей.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для различных диэлектриков приведена на рисунке 1.6.

Увеличение температуры в сегнетоэлектриках активизирует движение доменных границ и поляризацию сегнетоэлектрика. Поэтому, если сегнетоэлектрик находится в относительно неизменном электрическом поле, соответствующем участку необратимого смещения доменных границ, с повышением температуры до точки

Кюри его поляризованность и диэлектрическая проницаемость будут расти (рисунок 1.7). Дальнейший рост температуры приведет к разрушению доменной структуры и резкому уменьшению этих величин до значений, свойственных обычным диэлектрикам.

В параэлектрической фазе (то есть выше температуры Кюри) сегнетоэлектрики также обладают высокой диэлектрической проницаемостью, которая спадает с ростом температуры по закону Кюри – Вейсса

$$\varepsilon = C / (T - T_K) \quad (1.5)$$

где C – константа Кюри;

T_K – температура Кюри – Вейсса.

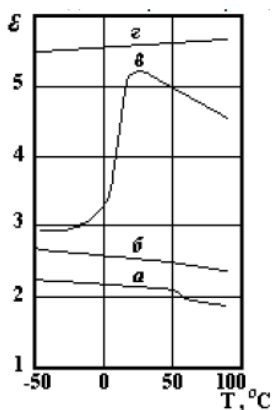


Рисунок 1.6 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для различных диэлектриков: а – парафин; б – полистирол; в – хлорированный дифенил; г – хлористый натрий

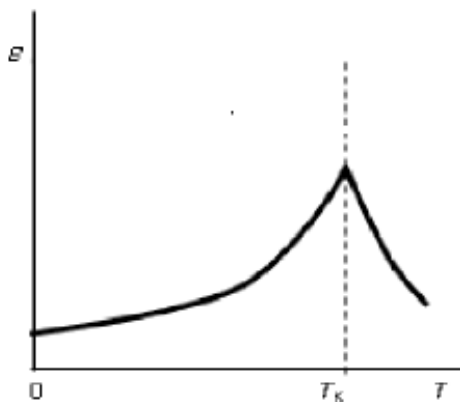


Рисунок 1.7 – Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры

2 Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют электрическую мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле. В диэлектрике, помещенном в переменное синусоидальное электрическое поле с напряжением U и угловой частотой ω , возникают электрические токи двух видов: емкостной ток и активный ток. Сила емкостного тока

$$I_c = \omega CU = \omega \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} U \quad (2.1)$$

где C – емкость образца, Ф,
 S – площадь электродов, м²,
 d – толщина диэлектрика, м.
 Активный ток равен:

$$I_a = \gamma \frac{S}{d} U \quad (1.2)$$

где γ – удельная активная проводимость диэлектрика на частоте ω .

Общий ток I равен векторной сумме емкостного и активного тока, как это изображено на векторной диаграмме на комплексной плоскости (рисунок 2.1).

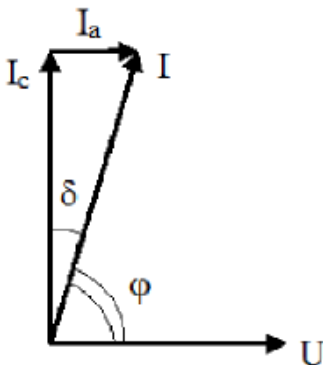


Рисунок 2.1 – Векторная диаграмма токов в диэлектрике при переменном напряжении

Если бы диэлектрик был идеальным, т.е. без потерь ($\gamma = 0$), ток был бы чисто реактивным $I = I_c = \omega CU$ и был бы направлен по мнимой оси под углом 90° к вектору U . Однако у реальных диэлектриков с γ , отличной от нуля, суммарный ток сдвинут на угол $\delta = 90^\circ - \phi$ относительно тока идеального диэлектрика (ϕ – угол сдвига фаз между током и напряжением). Чем больше γ , тем больше угол δ , характеризующий степень отличия реального диэлектрика от идеального. Угол δ между векторами плотностей переменного тока диэлектрика и емкостного тока на комплексной плоскости называют углом диэлектрических потерь. Тангенс этого угла

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{\gamma}{w \epsilon \epsilon_0} \quad (2.3)$$

является одним из важнейших параметров диэлектриков. Он не зависит от формы и геометрических размеров образца, а полностью определяется химическим составом и строением вещества.

С учетом вышеизложенного мощность потерь P для переменного напряжения рассчитывается по формуле

$$P = UI_a = U^2 w C \operatorname{tg} \delta. \quad (2.4)$$

Главным процессом, вызывающим диэлектрические потери, является процесс электропроводности. Вызванные этим потери в диэлектрике называются *потерями на электропроводность*.

Потери на электропроводность. Эти виды потерь возникают во всех диэлектриках. Больше всего они проявляются при повышенных температурах. Эти потери обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Наличие сквозного тока в переменном поле приводит к рассеянию мощности

$$P_{\text{СКВ}} = \frac{S}{d} U^2. \quad (2.5)$$

Эту часть потерь, обусловленную сквозным током диэлектрика, называют диэлектрическими потерями на электропроводность. Мощность потерь на электропроводность как видно из (2.5) не зависит от частоты. Однако тангенс угла потерь, обусловленных сквозным током,

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{СКВ}} = \frac{\gamma}{\omega \varepsilon \varepsilon_0} = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{f \varepsilon \rho} \quad (2.6)$$

обратно пропорционален частоте (ε слабо зависит от частоты). На высоких частотах (при $\rho > 10^{10}$ Ом·м – выше 10 кГц) $\operatorname{tg}\delta_{\text{СКВ}}$ очень мал – менее 10^{-4} . Следовательно, потери на электропроводность существенны лишь при низких частотах (50 – 1000 Гц).

Тангенс угла и мощность потерь на электропроводность возрастают с ростом температуры (рисунок 2.2). Это связано с увеличением удельной проводимости γ в области высоких температур. В случае повышенных температур $\operatorname{tg}\delta_{\text{СКВ}}$ может быть высоким даже при высоких частотах.

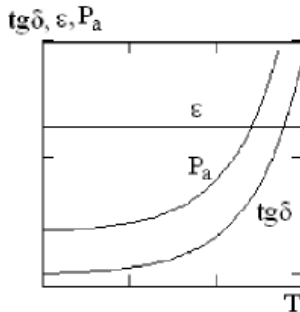


Рисунок 2.2 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости и мощности потерь от температуры в случае потерь на электропроводность

Потери на электропроводность ничтожно малы у электроизоляционных материалов с высоким удельным

сопротивлением (полиэтилен), а на высоких и сверхвысоких частотах – практически у всех материалов.

В полярных диэлектриках к потерям на электропроводность добавляются потери на поляризацию. Эти потери обычно наблюдаются только в определенном интервале температур, где проявляется поляризация, связанная с потерями. Процессы электропроводности и поляризации при анализе диэлектрических потерь считаются независимыми. Предполагается, что в данном случае справедлив принцип суперпозиции (наложения) диэлектрических потерь, в соответствии с которым общие диэлектрические потери являются суммой составляющих, вызванных отдельными механизмами потерь.

Релаксационные потери (потери на поляризацию). Эти потери обусловлены активными составляющими поляризационных токов. Они характерны для диэлектриков, обладающих замедленными видами поляризации, когда сказывается отставание поляризации от изменения поля (полярные диэлектрики). На рисунке 2.3 представлена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости и мощности потерь от температуры при наличии релаксационной поляризации.

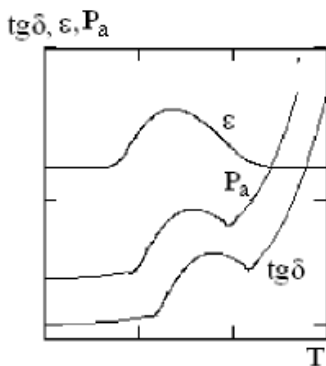


Рисунок 2.3 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости и мощности потерь от температуры при наличии релаксационной поляризации

В области низких температур, когда ϵ слабо зависит от температуры (релаксационная поляризация отсутствует), возникают только потери на электропроводность. При дальнейшем увеличении температуры рост $\text{tg}\delta$ у полярного диэлектрика связан с процессами релаксационной поляризации, что объясняется затратами энергии на ориентацию все увеличивающегося количества полярных молекул, принимающих участие в процессе дипольно-релаксационной поляризации. К потерям на электропроводность добавляются потери на релаксационную поляризацию.

Начиная с некоторой температуры, происходит переход ориентированных (по направлению электрического поля) полярных молекул в состояние теплового разброса. В связи с переходом все большего количества полярных молекул в состояние беспорядочных тепловых колебаний электрическая энергия, затрачиваемая на процесс

дипольной поляризации, уменьшается, и релаксационные потери вновь отсутствуют. В этом диапазоне температур в диэлектрике имеют место потери только на электропроводность. Таким образом, зависимость $\operatorname{tg}\delta(T)$ имеет вид кривой с выраженным максимумом (рисунок 2.3).

Потери в сегнетоэлектриках. В сегнетоэлектриках помимо рассмотренных видов потерь наблюдается еще один вид, связанный с потерями энергии в процессе перемещения доменных границ. В интервале температур, где существует спонтанная поляризация, у этих диэлектриков возникают дополнительные потери на гистерезис, исчезающие выше температуры Кюри. Переход сегнетоэлектрика в параэлектрическое состояние сопровождается резким уменьшением $\operatorname{tg}\delta$, поскольку исчезают потери на гистерезис. В этом случае зависимость $\operatorname{tg}\delta(T)$ также имеет вид кривой с выраженным максимумом при $T \sim T_K$. Сегнетоэлектрики характеризуются весьма большим тангенсом угла диэлектрических потерь, который в типичных случаях принимает значение порядка 0,1.

3 Задание

В работе используется измеритель емкости цифровой Е8-4, предназначенный для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь электрических конденсаторов с автоматическим отсчетом результатов измерений. На рисунке 3.1 представлена схема присоединения двухэлектродных конденсаторов. Подключите испытуемый конденсатор к зажимам кабеля согласно представленной схеме.

Необходимо выполнить следующие действия:

- 3.1 Измерить геометрические размеры образца.
- 3.2 Поместить образец между электродами и измерить его емкость при комнатной температуре.

Рассчитать диэлектрическую проницаемость используемого материала. По величине диэлектрической проницаемости определить тип исследуемого материала.

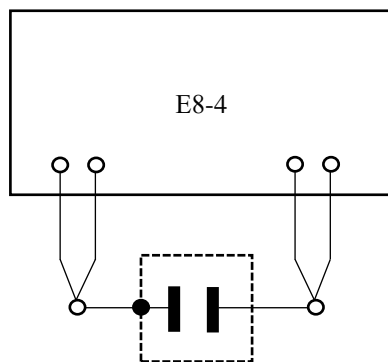


Рисунок 3.1 – Схема присоединения двухэлектродных конденсаторов

3.3 Исследовать зависимость емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образца от температуры в интервале от 20 °С до 120 °С. Отсчет производить через каждые 5 градусов. Результаты измерений представить в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

| $t, ^\circ\text{C}$ | $C_x, \text{пФ}$ | $\text{tg}\delta$ |
|---------------------|------------------|-------------------|
| | | |
| | | |
| | | |

3.4 Построить графики зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры/

3.5 Дать физическое объяснение полученных результатов.

4 Вопросы для самопроверки

4.1 При каких условиях ϵ слабо зависит от температуры?

4.2 Объясните зависимость ϵ от температуры у диэлектрика, в котором возможна релаксационная поляризация.

4.3 Почему у неполярных диэлектриков тангенс угла диэлектрических потерь с увеличением температуры монотонно возрастает?

4.4 Объясните график зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для диэлектрика, в котором возможна релаксационная поляризация.

5 Список рекомендуемой литературы

5.1 Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 448 с.

5.2 Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

5.3 Тареев В.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.