

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 21.08.2023 11:28:10

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d59e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова



2023 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 3
по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы»

Курск 2023

УДК 621.382

Составитель О. Е. Ключникова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры КПиСС *Е.О. Брежнева*

Исследование температурной зависимости электрических свойств твёрдых диэлектриков: методические указания по выполнению лабораторной работы № 3 по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.Е. Ключникова. – Курск, 2023. – 19 с.

В методических указаниях излагаются основные понятия и определения и методические рекомендации по подготовке к выполнению лабораторной работы, её проведению и оформлению результатов опытов.

Методические указания соответствуют требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению «Биотехнические системы и технологии» и рабочей программы дисциплины «Конструкционные и биоматериалы».

Предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 12.03.04 Биотехнические системы и технологии очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции.

Подписано печать . Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,10. Уч.-изд. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ *302* Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Исследование зависимости электропроводности диэлектриков от температуры.
2. Исследование влияния температуры на тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическую проницаемость электроизоляционных материалов.
3. Изучение методики определения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости (емкости).

2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Удельная электрическая проводимость твердых диэлектриков σ как величина, количественно характеризующая электропроводность (т.е. способность пропускать через себя постоянный ток под действием приложенного к телу постоянного электрического напряжения), зависит от количества примесей, химического состава, структуры и условий, в которых проводятся измерения: температуры, влажности, напряженности электрического поля, длительности действия электрического поля и др. Электропроводность диэлектриков обусловлена дрейфом (движением) носителей (ионов и электронов), которые могут перемещаться в веществе на сравнительно большие расстояния (больше, чем размеры молекул и расстояния между молекулами, в предельном случае - сквозь всю толщину диэлектрика от одного электрода до другого). Для большинства электроизоляционных материалов в слабых полях проводимость обусловлена дрейфом ионов. Участие же электронов в электропроводности этих диэлектриков наблюдается только в сильных электрических полях.

Удельная электрическая проводимость σ определяется по формуле;

$$\sigma = \frac{1}{\rho_v} = q \cdot n \cdot \mu; \text{ Сл} \cdot \text{м}^{-1} \quad (3.1)$$

где q – заряд частицы (иона), Кл;

n – концентрация носителей, $1/\text{м}^3$;

μ – дрейфовая подвижность носителей заряда, численно равная средней скорости направленного движения, которую они приобретают в электрическом поле единичной напряженности; $m^2 \cdot B^{-1} \cdot c^{-1}$

ρ_v – удельное электрическое сопротивление, $Om \cdot m$.

Концентрация ионов n – (которые можно назвать свободными, т.е. не связанными с определенными молекулами или атомами вещества) и их подвижность μ в общем случае зависят от температуры, поэтому и σ является функцией температуры.

Уменьшение удельного сопротивления диэлектриков при их нагревании объясняется ослаблением молекулярных связей, ростом подвижности частиц, ростом концентрации свободных носителей за счет температурной диссоциации молекул. Например, электротехнический фарфор при комнатной температуре имеет $\rho_v = 10^8 Om \cdot m$, а при $300^\circ C$ – $\rho_v = 10^4 Om \cdot m$.

В ряде случаев с ростом температуры удельное сопротивление диэлектрика в некотором интервале температур может возрастать. Это наблюдается, например, у смолистых диэлектриков. Рост удельного сопротивления в этом случае обусловлен протекающими при нагревании процессами полимеризации и связанным с этими процессами значительным повышением вязкости.

Механизм ионной проводимости и ее температурную зависимость для твердых диэлектриков можно пояснить следующим образом.

В твердом теле ион взаимодействует с окружающими его заряженными частицами. Энергия этого взаимодействия W зависит от положения иона (от его координаты x) относительно окружающих частиц (рис. 3.1).

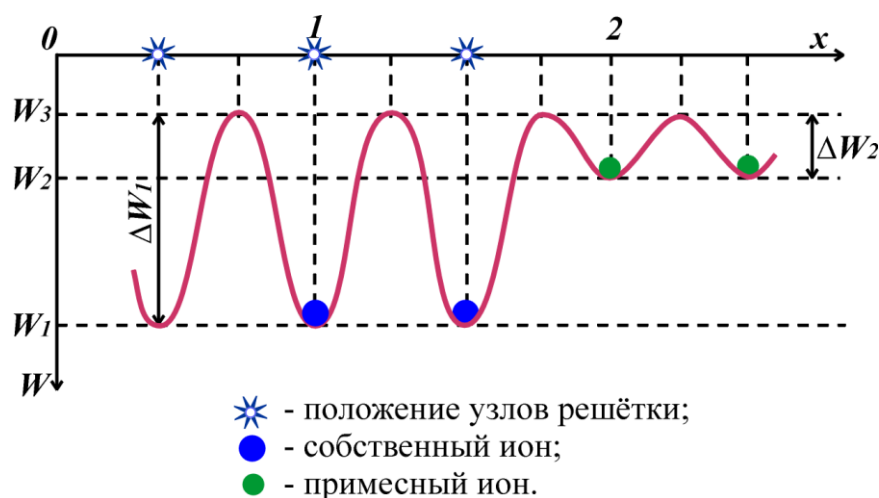


Рис. 3.1. Зависимость энергии взаимодействия W от положения иона

Каждый ион стремится занять положение, которому соответствует минимум потенциальной энергии W .

В положении 1 (см. рис. 3.1) ион обладает энергией ΔW_1 и находится в узле кристаллической решетки, т.е. в наиболее устойчивом положении. В реальных диэлектриках практически всегда имеются примеси инородных веществ, которые существенно влияют на проводимость. Такие ионы слабо закреплены и для их перевода в “свободное положение” необходимо затратить энергию ΔW_2 значительно меньше ΔW_1 (см. рис. 3.1).

В отсутствие внешнего поля ион совершает периодические колебания с частотой ν_0 . пределах потенциальной ямы и за счет тепловых флуктуаций может приобрести энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера и перехода в соседнее положение. При этом переход ионов за счет тепловой энергии по всем направлениям равновероятны, и для перехода иона из положения 1 в направлениях $+x$ и $-x$ нужно преодолеть барьер одной и той же высоты ΔW_1 и ΔW_2 . Такое хаотическое движение заряженных частиц не приводит к появлению электрического тока.

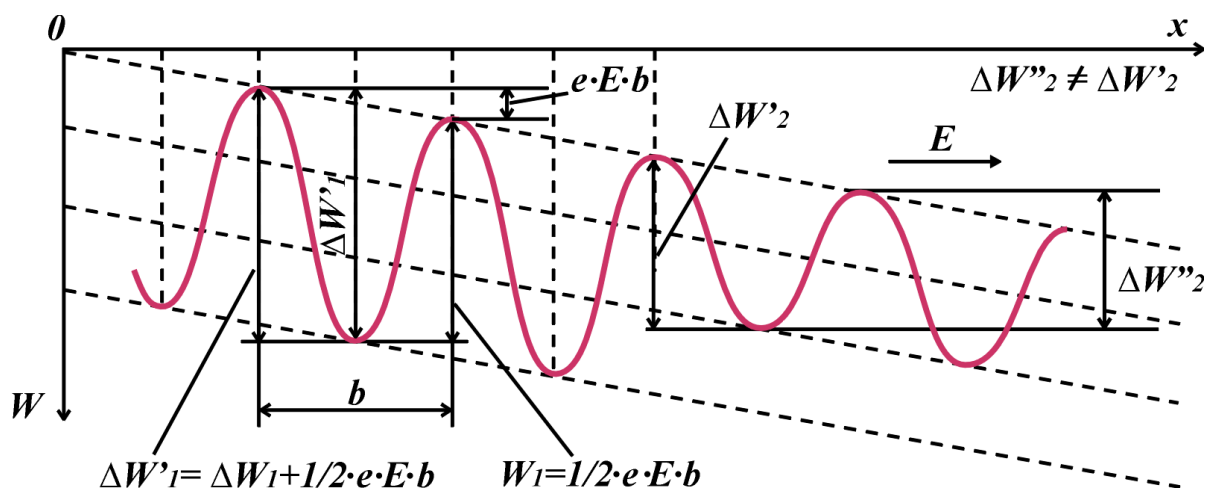


Рис. 3.2. График зависимости $W = f(x)$

При воздействии на диэлектрик внешнего электрического поля E к потенциальной энергии иона ΔW добавляется энергия его взаимодействия с электрическим полем. Поэтому высота потенциального барьера в направлении действия поля уменьшится, а в противоположном направлении – увеличивается на $e \cdot E \cdot b/2$ (где b – расстояние между двумя соседними положениями равновесия). С учетом сказанного график зависимости $W = f(x)$ принимает вид, представленный на рис. 3.2.

Высота потенциальных барьеров для перемещения в направлении $+x$ и $-x$ теперь не одинакова ($\Delta W''_2 \neq \Delta W'_2$). Следовательно, возрастает вероятность перемещения положительных ионов (катионов) в направлении вектора напряженности электрического поля E , а отрицательных ионов (анионов) в противоположном направлении, и в диэлектрике появляется электрический ток.

С повышением температуры растет вероятность высвобождения иона из потенциальной ямы и его перемещение в твердом теле. Вследствие этого с повышением температуры увеличивается электропроводность твердых диэлектриков,

В общем случае температурная зависимость электрической проводимости описывается эмпирическим соотношением вида:

$$A_1 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_{a1}}{kT}\right) + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_{a2}}{kT}\right), \quad (3.2)$$

где A_1, A_2 – константы;

$\Delta W_{a1}, \Delta W_{a2}$ энергия активации, (т.е. некоторый избыток энергии над средней энергией иона) необходимая для дрейфа собственных и примесных ионов, соответственно, эВ;

T – температура, К;

$k = 8,61 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана.

В этом выражении первый член описывает температурную зависимость проводимости за счет основных (собственных) ионов, а второй - за счет примесных. Поэтому при низких температурах в электропроводности участвуют, главным образом, примесные ионы, а при высокой температуре - ионы, соответствующие основному химическому составу (основные ионы).

Температурная зависимость электрической проводимости $\sigma = f(T)$ представлена на рис. 3. Но на практике удобнее пользоваться этой зависимостью, построенной в полулогарифмическом масштабе: $\ln \sigma = f(1/T)$ (рис. 4), т.к. здесь четко выделены участки собственной и примесной проводимости и можно определить энергию активации собственных и примесных носителей.

Для двух значений проводимости σ_1 и σ_2 измеренных при температурах T_1 и T_2 , соответственно, можно записать соотношение:

$$\sigma_1 = A_1 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_{a1}}{kT_1}\right), \quad \sigma_2 = A_2 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_{a2}}{kT_2}\right). \quad (3.3)$$

Прологарифмируем эти выражения и вычтем из второго первое:

$$\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1 = \ln A_2 - \frac{\Delta W_{a2}}{kT_2} - \ln A_1 + \frac{\Delta W_{a1}}{kT_1} = \frac{\Delta W_{a1}}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (3.4)$$

Откуда энергия активации для собственных ионов:

$$\Delta W_{a1} = k \cdot \frac{\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1}{1/T_1 - 1/T_2}, \quad \text{эВ.} \quad (3.5)$$

Аналогично энергия активации для примесных ионов:

$$\Delta W_{a2} = k \cdot \frac{\ln \sigma_4 - \ln \sigma_3}{1/T_3 - 1/T_4}, \quad \text{эВ.} \quad (3.6)$$

Ионная проводимость наблюдается в стеклах, полимерных и некоторых керамических материалах. Электронный механизм проводимости, который обусловлен, в основном, примесными электронами и дефектами структуры, характерен для многих типов керамических материалов, тонких оксидных диэлектриков, некоторых полимерных диэлектриков. Диэлектрики имеют не только малую концентрацию носителей (электронов и дырок), но также и чрезвычайно низкую подвижность $\mu = 10^{-14} \div 10^{-16} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

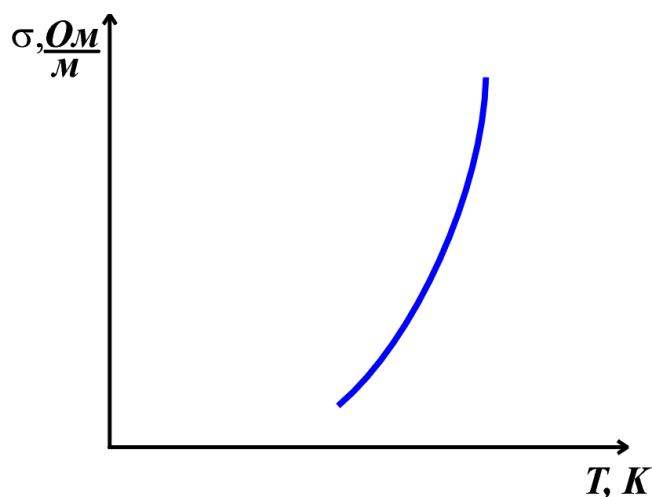


Рис. 3.3. Температурная зависимость электрической проводимости $\sigma = f(T)$

На электронную проводимость диэлектриков значительное влияние оказывают процессы на контакте электрода с диэлектриком. Различают блокирующий, инжектирующий и нейтральный контакты.

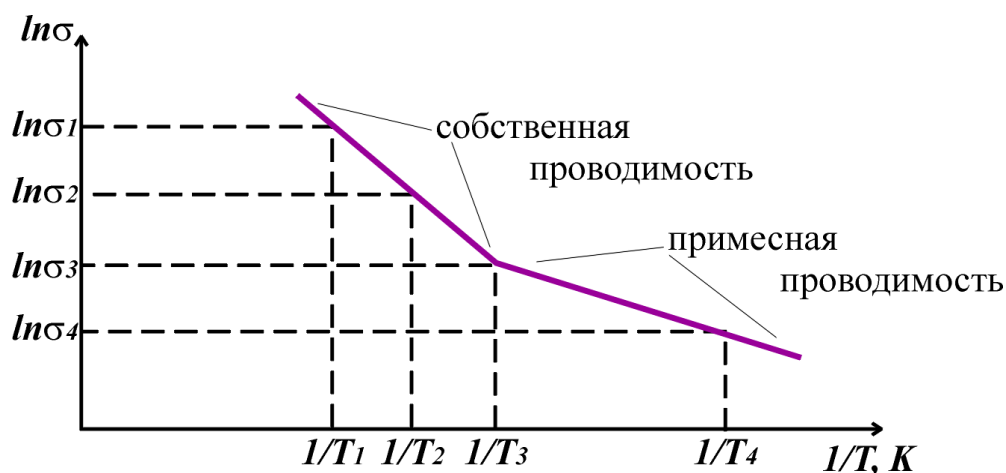


Рис. 3.4. Температурная зависимость электрической проводимости $\ln \sigma = f(1/T)$

При приложении к диэлектрику электрического поля он поляризуется, т.е. приобретает наведенный электрический момент. Различают упругую и релаксационную поляризации. Время установления упругих процессов поляризации $10^{-12} - 10^{-15}$ с. Поэтому, если в диэлектрике существуют только упругие процессы поляризации, то диэлектрическая проницаемость ε не зависит от частоты до СВЧ диапазона и очень слабо зависит от температуры. Скорость установления поляризации характеризуется временем релаксации, которая зависит от температуры следующим образом:

$$\tau = \exp(W / kT / (2 \cdot \nu)),$$

где W – энергия активации (т.е. энергия, необходимая для преодоления сил взаимодействия между диполями при их повороте из одного положения в другое), эВ;

K – постоянная Больцмана, эВ/К;

T – абсолютная температура, К;

ν – частота собственных тепловых колебаний ионов или молекул, c^{-1} .

При наличии упругих видов поляризации $\tau > 10^{-5}$ с. Устойчивость работы элементов электронной аппаратуры в значительной мере зависит от стабильности свойств материалов, из которых они изготовлены. Так у конденсаторов при изменении температуры окружающей среды происходит изменение их емкости, за счет изменения диэлектрической проницаемости ε диэлектрика, при этом изменяется также и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

Для количественной оценки термостабильности диэлектрической проницаемости пользуются температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости $Tk\varepsilon$. Он равен относительному изменению диэлектрической проницаемости при изменении температуры на один градус

$$Tk\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dT}, K^{-1}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

T – температура, К.

Абсолютное значение температурного коэффициента диэлектрической проницаемости $Tk\varepsilon$ характеризует степень стабильности диэлектрической проницаемости.

У большинства диэлектриков ε плавно изменяется с температурой и можно, сказать, что в небольшом интервале температур изменение ε подчиняется приблизительно линейному закону, тогда:

$$Tk\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Практически обычно снимается зависимость емкости от температуры и рассчитывается температурный коэффициент емкости:

$$Tk\varepsilon = \frac{1}{c} \cdot \frac{c_2 - c_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{c} \cdot \frac{\Delta c}{\Delta T}.$$

Зависимость емкости от температуры обусловлена изменением диэлектрической проницаемости и геометрических размеров:

$$Tk\varepsilon = \frac{1}{c} \cdot \frac{\Delta c}{\Delta T} = Tk\varepsilon + \beta,$$

где c – емкость образца;

Δc – изменение емкости при изменении температуры на ΔT ;

β – температурный коэффициент линейного расширения.

Обычно $\beta \ll Tk\varepsilon$, и поэтому $Tk\varepsilon \approx TKE$. Величина и знак $Tk\varepsilon$ зависят от механизма поляризации и изменения концентрации частиц с температурой.

При электронной поляризации сила связи электронов с ядрами от температуры не зависит, а концентрация атомов (ионов) в единице объема с ростом температуры уменьшается (за счет температурного расширения материала). Поэтому, у материалов с электронной поляризацией ε с ростом температуры уменьшается и $Tk\varepsilon < 0$, однако, эта зависимость слабая ($Tk\varepsilon \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$). При этом потери обусловлены только потерями на электропроводность.

С ростом температуры тела расширяются, силы связи между молекулами и между ионами ослабляются, поэтому ионная поляризация с ростом температуры усиливается, и $TK\varepsilon$ должен быть положительным. Однако с ростом температуры концентрация частиц в единице объема уменьшается. Если этот фактор влияет больше, чем изменение сил связи, то $TK\varepsilon < 0$. У большинства ионных кристаллов $TK\varepsilon > 0$ у некоторых, например, у рутила (TiO_2) $TK\varepsilon < 0$.

При дипольной поляризации и температурной зависимости ε главную роль играет изменение кинетической энергии W диполей, участвующих в релаксационной поляризации. На рис. 5 приведена типичная зависимость ε от температуры для веществ, у которых наряду с упругими видами поляризации возможна и релаксационная поляризация.

До температуры T_1 кинетическая энергия полярных молекул настолько мала, что они не могут участвовать в релаксационном процессе. На этом участке происходят только упругие процессы поляризации, и ε очень слабо зависит от температуры. Релаксационные потери отсутствуют, потери обусловлены только потерями электропроводности.

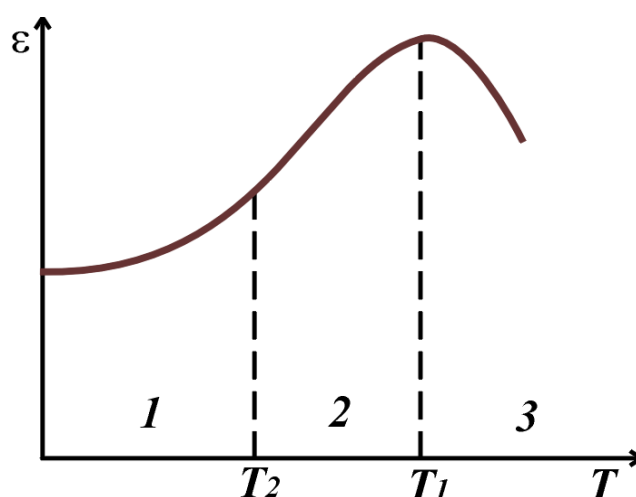


Рис. 3.5. Типичная зависимость ε от температуры

С ростом температуры кинетическая энергия полярных молекул возрастает. Они могут поворачиваться на большие углы и участвовать в поляризации — ориентироваться в электрическом поле.

При этом ε растет ($TK\varepsilon > 0$), т.е., чем больше T тем большая доля диполей успевает ориентироваться по полю. Однако, диполи поворачиваются сравнительно медленно, (поляризация отстает по фазе от напряженности поля) и каждый поворот вызывает дипольные потери энергии, $tg\delta$ и P_a растут с ростом температуры.

При дальнейшем увеличении температуры ($T > T_2$) тепловое движение молекул становится настолько интенсивным, что электрическое поле не может удержать их в поляризованном состоянии, при котором электрический момент молекул совпадает по направлению с вектором поля и ε уменьшается ($TK\varepsilon < 0$). При этом диполи слабо взаимодействуют друг с другом, быстро ориентируются по полю и их повороты не вызывают дополнительных потерь энергии, $tg\delta$ и P_a уменьшаются, а потери обусловлены в этом случае в основном потерями на электропроводность.

На рис. 3.6 приведены температурные зависимости для диэлектриков с упругой поляризацией, а на рис. 3.7 с релаксационной поляризацией.

Обычно релаксационные потери существуют одновременно с потерями на электропроводность. Если просуммировать эти два вида потерь (см. рис. 3.6 и 3.7), то график зависимости $tg\delta$ от температуры будет иметь вид, представленный на рис. 3.8.

Положение максимума $tg\delta$ определяется из условия $\omega \cdot \tau = 1$. Если в это условие подставить значение $\omega = 2\pi \cdot f$ и $\tau = \exp\left(\frac{W}{kT}\right)/(2 \cdot \nu)$, то получим:

$$\frac{\pi \cdot f \cdot \exp(W/k \cdot T)}{\nu} = 1.$$

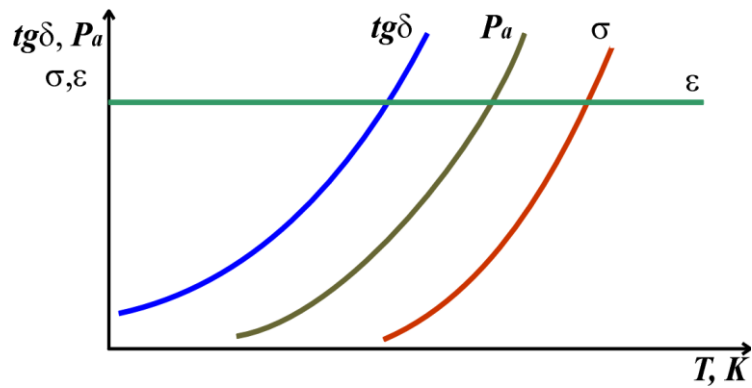


Рис. 3.6. Температурные зависимости для диэлектриков с упругой поляризацией

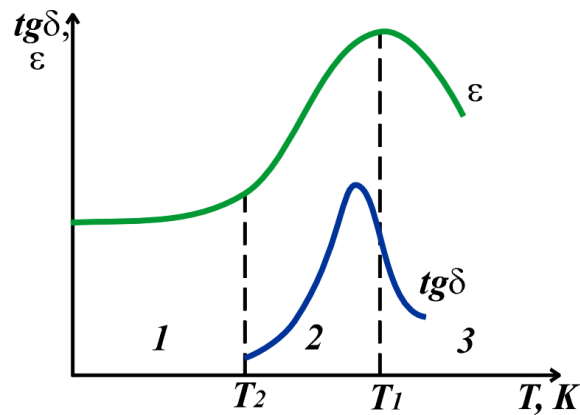


Рис. 3.7. Температурные зависимости для диэлектриков с релаксационной поляризацией

Из этого выражения видно, что при увеличении частоты ($f_2 > f_1$), условие выполняется при соответствующем увеличении температуры ($T_2 > T_1$), т.е. $tg\delta$ будет проходить через максимум при более высокой температуре.

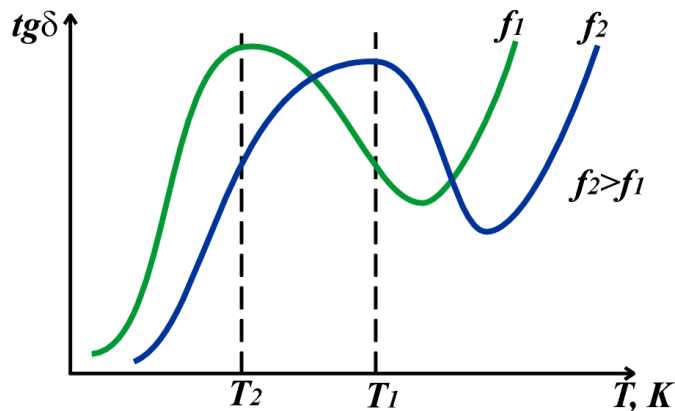


Рис. 3.8. Суммарные зависимости $tg\delta$ от температуры

У неполярных диэлектриков (полистирол, полиэтилен, политетрафторэтилен и др.), в которых происходит только электронная поляризация, ε медленно уменьшается с ростом температуры за счет изменения концентрации атомов в единице объема. $Tk\varepsilon$ таких материалов меньше нуля ($Tk\varepsilon < 0$) и мал по абсолютному значению $Tk\varepsilon \sim 10^{-4} K^{-1}$.

$Tk\varepsilon$ у полярных органических диэлектриков может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от состава и температуры (см. рис. 3.5) и достигает $10^{-2} K^{-1}$. У высокочастотной конденсаторной керамики $Tk\varepsilon$ по абсолютной величине тем больше, чем больше ε . Так у керамики на основе титаната стронния $\varepsilon = 230$, а $Tk\varepsilon = -(3,3 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$. Эта керамика используется для изготовления высокочастотных конденсаторов, от которых не требуется высокая стабильность при изменении температуры.

Для высокочастотных термостабильных конденсаторов применяют станнатные и лантановые керамические материалы, у которых $Tk\varepsilon = \pm 20 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, а $\varepsilon = 15 \div 40$. У керамических материалов для низкочастотных конденсаторов обычно имеется высокая температурная нестабильность ε .

3. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к лабораторной работе необходимо проработать следующие вопросы:

- 1) в чем заключается физический смысл влияния температуры на электропроводность, диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрических материалов;
- 2) в чем состоит различие влияния температуры на параметры диэлектрика для диэлектриков с различными видами поляризации;
- 3) изучить методику проведения исследований на лабораторной установке.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В состав лабораторной установки входят:

- 1) цифровой измеритель емкости Е8-4;
- 2) измеритель добротности Е4-7;
- 3) тераомметр Е6-13;
- 4) термостат с приспособлением для установки образцов материалов, регулятором температуры и термометром.

Диаметр электродов $D = 50\text{мм}$.

5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования используются тонкие диски из следующих материалов:

- 1) гетинакс;
- 2) стеклотекстолит;
- 3) фторопласт.

Состав материалов может быть уточнен преподавателем, ведущим занятие.

6. ЗАДАНИЕ

1. Установить образцы исследуемых материалов в термостат.
2. С помощью цифрового измерителя емкости одновременно с выполнением п. 2. производится отсчет значений емкости и тангенса угла потерь. Отсчет производить через каждые 4°C . Результаты измерений этих двух параметров занести в табл. 2.
3. Охладить оснастку с образцами и повторить измерения по п. 3. при заданной преподавателем частоте. Результаты занести в таблицу.
4. Построить график $\sigma = f(T)$ в полулогарифмическом масштабе.
5. Рассчитать энергию активации примесных и собственных ионов испытуемого образца.
6. Построить графики зависимостей ε и $\text{tg}\delta$ от температуры.

7. Рассчитать энергию активации релаксаторов.
8. Рассчитать TKE .
9. Построить график зависимости TKE от температуры.
10. Оценить погрешности измерений и рассчитанных величин.
11. Объяснить полученные результаты.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Частота работы цифрового измерителя емкости $f = 1 \text{ кГц}$.

Перед проведением измерений обязательно осуществляйте калибровку приборов.

При расчете энергии активации для уменьшения погрешности рекомендуется использовать наиболее удаленные по температурной шкале, но лежащие на одном отрезке прямой значения $\ln \sigma$.

Связь между $\text{tg} \delta$ и $\rho_{\text{СКВ}}$ выражается соотношением:

$$\text{tg} \delta = 1,8 \cdot 10^{10} / (f \cdot \varepsilon \cdot \rho_{\text{СКВ}}).$$

Энергия активации релаксаторов рассчитывается по формуле:

$$W = K \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 \cdot T_1} \cdot (\ln f_2 - \ln f_1),$$

где $K = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ – постоянная Больцмана;

T_1 и T_2 – абсолютные температуры, при которых наблюдается максимум, К;

f_1 и f_2 – частоты, при которых производились измерения, Гц.

Так как емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h},$$

где C – емкость образца, Ф;

ε – диэлектрическая проницаемость материала;

$\varepsilon = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – диэлектрическая постоянная;

S – площадь электрода, м^2 ;

h – толщина образца, м,

то
$$\varepsilon = \frac{C_x \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot S}.$$

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова температурная зависимость электропроводности твердых диэлектриков?
2. Что такое энергия активации?
3. В каком соотношении находятся энергии активации собственных и примесных ионов? Каким видом ионов обусловлена проводимость на низких частотах?
4. Объясните зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.
5. Как $tg\delta$ зависит от температуры, если потери обусловлены только электропроводностью?
6. Нарисуйте графики зависимости ε и $tg\delta$ от температуры для диэлектриков с дипольной поляризацией.
7. Как изменится график зависимости $tg\delta$ от температуры, если изменить частоту?
8. Что такое энергия активации релаксаторов, и как ее рассчитать?
9. Что такое TKE , какую он несет информацию?
10. Какого порядка TKE у практически используемых материалов?
11. При каких механизмах поляризации TKE положителен и при каких отрицателен?
12. Объяснить зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и методику расчета TKE .

9. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы материаловедения : [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина, В.С. Казаков, О.Ю. Фоменко ; Министерство образования и науки Российской Федерации ; Сибирский Федеральный университет. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. – 152 с. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364047>.

2. Биомедицинское материаловедение [Текст]: учебное пособие / С. П. Вихров [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.

3. Корневский, Н. А. Биотехнические системы медицинского назначения [Текст]: учебник / Н. А. Корневский, Е. П. Попечителей. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 688 с. – Текст : непосредственный.

4. Гатчин, Ю. А. Материалы электронных средств [Текст]: учебное пособие / Ю. А. Гатчин, В. Л. Ткалич, П. А. Камаев [и др.]. – 2010. – 113 с.

5. Елманов, Г. Н. Физика твердого тела. Том 1 [Текст]: учебник для вузов / Г. Н. Елманов, А. Г. Залужный, В. И. Скрытный [и др.]; под общей ред. Б.А. Калина. – МИФИ, 2007. – 636 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 1
Результаты исследования температурной зависимости ε и $\operatorname{tg}\delta$ для
(наименование материала) на частоте $f =$

№, изм.	T, K	C, Φ	Q	ε	$\operatorname{tg}\delta$