

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

О.А. Доценко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ
ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОВОДИМОСТИ 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

Д 714

Рецензент

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

Доценко Ольга Александровна

Исследование температурной зависимости электрической проводимости твердых диэлектриков: методические указания к лабораторному занятию по дисциплинам «Материаловедение и технология материалов», «Материалы и компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и радиокомпоненты» / О.А. Доценко. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 15 с.

В методических указаниях кратко изложено влияние температуры на электрические параметры материалов и элементов. 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

© Доценко О.А., 2022

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

Содержание

Введение	4
1 Общие сведения	4
1.1 Механизм ионной проводимости твердых диэлектриков	5
1.2. Температурная зависимость электрической проводимости	8
1.3. Саморазряд конденсатора	10
2 Описание установки	11
3 Порядок работы.....	13
4 Задание	14
5 Вопросы для самопроверки.....	15
6 Список рекомендуемой литературы	15

Введение

Цель работы – экспериментальное исследование зависимости электрической проводимости твердых диэлектриков от температуры и расчет некоторых характеристик диэлектриков и конденсаторов.

1 Общие сведения

Электрическая проводимость твердых диэлектриков как величина, количественно характеризующая электропроводность, зависит от их химического состава, структуры и условий, в которых они эксплуатируются (температуры, напряженности электрического поля и др.). Электропроводность диэлектриков может быть обусловлена перемещением ионов и электронов. В некоторых диэлектриках, например, в двуокиси титана (TiO_2), преобладает электронный тип проводимости. Но у большинства используемых в радиоаппаратуре твердых диэлектриков в слабых электрических полях проводимость обусловлена движением ионов. Участие электронов в электропроводности этих диэлектриков наблюдается только в сильных электрических полях. Удельная электрическая проводимость γ диэлектрика определяется как

$$\gamma = qn\mu, \quad (1.1)$$

где q – заряд иона,
 n – концентрация ионов, участвующих в электропроводности, в единице объема диэлектрика,
 μ – дрейфовая подвижность электронов.

Концентрация n и подвижность μ ионов зависят от температуры. Следовательно, удельная электрическая проводимость γ диэлектрика является функцией температуры.

1.1 Механизм ионной проводимости твердых диэлектриков

В твердом теле ион взаимодействует с окружающими его заряженными частицами. Энергия этого взаимодействия W зависит от положения ионе (от его координаты X) относительно окружающих частиц от зарядов ионов, т.е. от химического состава и структуры вещества (рисунок 1.1). Каждый ион стремится занять положение, которому соответствует минимум потенциальной энергии.

Положение 1 на рисунке 1.1 соответствует иону, который находится в узле кристаллической решетки. Потенциальная энергия его минимальна и равна W_1 . Для выхода из потенциальной ямы ион должен преодолеть потенциальный барьер высотой $W_3 - W_1 = \Delta W_1$. Энергия ΔW_1 называется энергией активации собственных ионов диэлектрика.

В реальных диэлектриках практически всегда имеются ионы примеси. Они сравнительно слабо закреплены (положение 2 на рисунке 1.1)

Для их выхода из потенциальной ямы необходима энергия активации ΔW_2 значительно меньшая, чем ΔW_1 (см. рисунок 1.1).

Аналогично ведут себя ионы основного вещества, располагающиеся вблизи дефектов кристаллической решетки и в междоузлиях.



Рисунок 1.1 – Зависимость потенциальной энергии иона твердого диэлектрика от координаты в электрическом поле окружающих заряженных частиц

Движение ионов в твердом теле рассматривают как их тепловое освобождение из потенциальной ямы и переход в другую потенциальную яму. В отсутствие внешнего электрического поля переходы ионов за счет тепловой энергии по всем направлениям равновероятны. Так, например, для перехода иона из положения 1 в направлениях $+x$ и $-x$ нужно преодолеть барьер одной и той же высоты ΔW_1 , а для перехода примесного иона – барьер ΔW_2 . Хаотичное движение ионов не приводит к появлению электрического тока.

При воздействии на диэлектрик внешнего электрического поля, каждый ион обладает потенциальной энергией в этом поле, равной $\gamma \cdot q$, где q – заряд иона, а γ – потенциал электрического поля в точке расположения иона. Если поле в диэлектрике равномерное, то потенциал изменяется с координатой по линейному закону и зависимость от координаты имеет вид, представленный на рисунке 1.2.

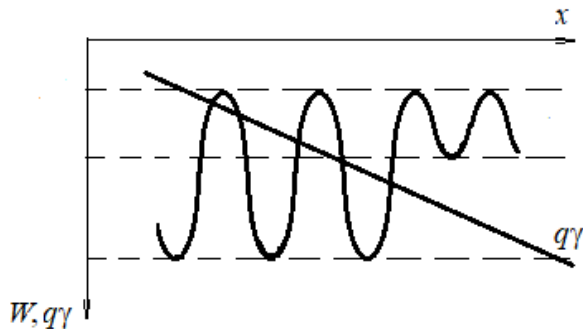


Рисунок 1.2 – Зависимость потенциальной энергии иона от координаты во внешнем поле $\gamma \cdot q$ и в электрическом поле окружающих заряженных частиц W

Просуммировав обе составляющие потенциальной энергии иона, получим для потенциальной энергии иона график, представленный на рисунке 1.3.

Высота потенциальных барьеров при перемещении ионов в направлениях $+x$ и $-x$ теперь не одинаковая: $\Delta W_2'' \neq \Delta W_2'$.

Следовательно, возрастает вероятность перемещения положительных ионов в направлении вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} , а отрицательных ионов – в противоположном направлении, и в диэлектрике появляется электрический ток.

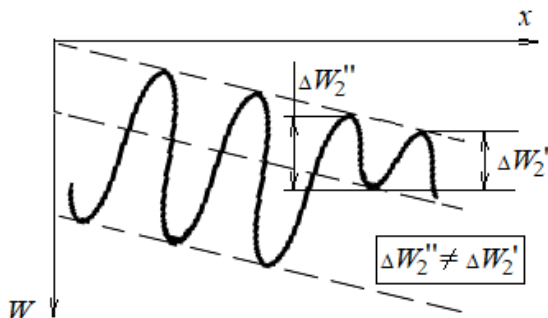


Рисунок 1.3 – Зависимость потенциальной энергии иона от координаты в твердом теле при воздействии равномерного электрического поля

1.2. Температурная зависимость электрической проводимости

С повышением температуры растет вероятность освобождения иона из потенциальной ямы и его перемещения в твердом диэлектрике. Вследствие этого, с повышением температуры увеличивается электропроводность диэлектриков.

Если в электрической проводимости принимают участие ионы одного вида, то математически зависимость удельной электрической проводимости диэлектрика от температуры описывается выражением

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (1.2)$$

где A – коэффициент, не зависящий от температуры;
 ΔW – энергия активации ионов;
 k – постоянная Больцмана;
 T – абсолютная температура.

График зависимости удельной электрической проводимости от температуры представлен на рисунке 1.4. На практике удобнее пользоваться графиком, построенном в полулогарифмической системе координат (рисунок 1.5).

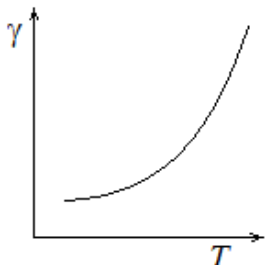


Рисунок 1.4 –
Зависимость
электрической
проводимости от
температуры

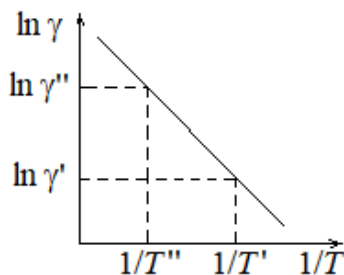


Рисунок 1.5 – Зависимость
электрической проводимости от
температуры в
полулогарифмической системе
координат

Прологарифмируем формулу (1.2)

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\Delta W}{k} \cdot \frac{1}{T}.$$

В системе координат $\ln \gamma = f(1/T)$ график представляет собой прямую линию (рисунок 1.5). Тангенс угла наклона прямой относительно оси X равен $\Delta W/k$. Следовательно, с помощью этого графика нетрудно рассчитать энергию активации ионов, участвующих в электропроводности:

$$\Delta W = k \frac{\ln \gamma'' - \ln \gamma'}{\frac{1}{T'} - \frac{1}{T''}},$$

где $k = 8,6 \times 10^{-5}$ эВ/град – постоянная Больцмана,
 ΔW – энергия активации ионов, эВ;
 γ' и γ'' – удельная электрическая проводимость при температурах T' и T'' , соответственно;
 T' и T'' – абсолютная температура.

Если в исследуемом интервале температур в электропроводности участвуют ионы двух видов, то зависимость удельной электрической проводимости от температуры математически описывается формулой вида:

$$\gamma = A_1 e^{-\frac{\Delta W_1}{kT}} + A_2 e^{-\frac{\Delta W_2}{kT}},$$

где A_1 , и A_2 – коэффициенты, относящиеся к ионам первого и второго вида, соответственно;

ΔW_1 и ΔW_2 – энергии активации этих ионов.

Если $\Delta W_1 \neq \Delta W_2$, то в системе координат $\ln \gamma = f(1/T)$ график представляет собой ломаную линию. С его помощью можно рассчитать энергию активации ионов первого и второго вида.

1.3. Саморазряд конденсатора

В ряде радиотехнических устройств используется явление изменения заряда конденсатора во времени в результате саморазряда.

Если конденсатор зарядить при постоянном напряжении до напряжения U , а затем отключить от источника и оставить с разомкнутыми электродами, то заряд конденсатора со временем будет уменьшаться за счет электропроводности диэлектрика. Напряжение $U(t)$ на обкладках конденсатора будет со временем изменяться по закону:

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где τ – постоянная времени саморазряда конденсатора, с.

За отрезок времени $t = \tau$ напряжение на конденсаторе с разомкнутыми электродами уменьшается в 6 раз.

Можно показать, что τ не зависит от геометрических размеров и формы конденсатора, а определяется исключительно свойствами диэлектрика.

$$\tau = R \cdot C = \rho \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon$$

где R – объемное сопротивление изоляции конденсатора, Ом;

C – емкость конденсатора, Ф;

ρ – удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·м;

$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф·м⁻¹;

ϵ – диэлектрическая проницаемость.

2 Описание установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.1.

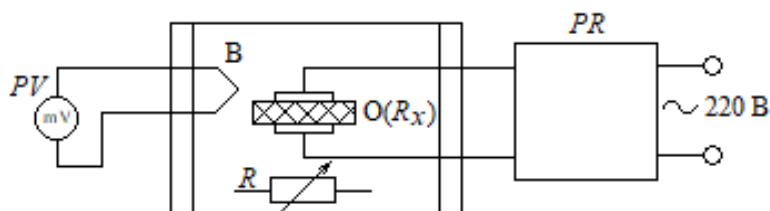


Рисунок 2.1 – Схема установки

Образец O помещается в муфельную печь. Скорость нагревания образца регулируется реостатом R . Температура образца измеряется с помощью термопары B

и милливольтметра PV , а сопротивление – тераомметром PR (рисунок 2.1).

Принцип работы тераомметра заключается в следующем (рисунок 2.2). Измеряемое сопротивление R_x присоединяется к известному калиброванному сопротивлению R_3 . Эти последовательно соединенные сопротивления R_x и R_3 подключены к специальному стабилизированному источнику постоянного напряжения G ($U = 105$ В) и образуют делитель напряжения. Падение напряжения U_b на сопротивлении R_3 измеряется при помощи усилителя постоянного тока A с большим входным сопротивлением изоляции $R_{из}$ ($R_{из} \gg R_3$) и стрелочного прибора P .

$$U_b = \frac{U}{R_x + R_3} R_3,$$

отсюда

$$R_x = \frac{UR_3}{U_b} - R_3.$$

Напряжение U и сопротивление R_3 постоянны, следовательно, R_3 обратно пропорционально U_b и шкалу микроамперметра P можно проградуировать в величинах сопротивления.

Для расширения пределов измерения в тераомметре имеется набор из 9 сопротивлений R_3 , подключенных к многопозиционному переключателю.

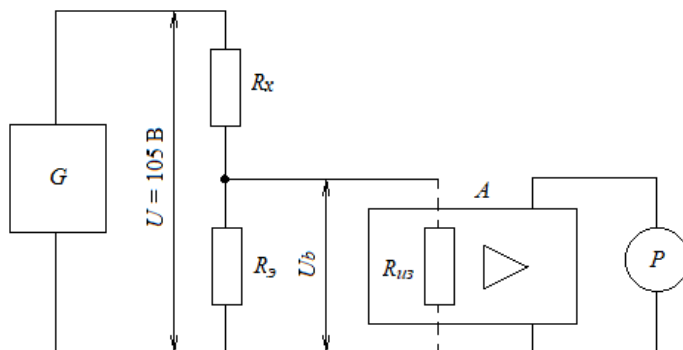


Рисунок 2.2 – Схема тераомметра

3 Порядок работы

3.1 Включить тераомметр в сеть и дать прогреться в течение 30 минут.

3.2 Откалибровать тераомметр. Поставить переключатель в положение "К□". (Положение КАЛ служит для калибровки на пределы ТОМ×1 и ТОМ×10, которые при выполнении лабораторной работы не используются).

3.3 Ручкой УСТАНОВКА ∞ установить стрелку прибора на риску ∞. Соединить проводником клеммы R_x накоротко и ручкой УСТАНОВКА 0,1 поставить стрелку прибора на риску 0,1.

3.4 Произвести измерения сопротивления. Снять закоротку и подключить образец к клеммам R_x. Переключатель пределов поставить в положение, при котором отклонение стрелки находится в пределах шкалы. Величина сопротивления определится как показание стрелочного прибора, умноженное на множитель показателя пределов.

3.5 Примечания: 1. Первые измерения производить при положении переключателя $100 \times G\Omega$.

2. При проведении измерений необходимо учесть, что схема прибора позволяет заземлить любой, но одновременно только один из зажимов "К" или "Э". Зажимы "КΩ" и "Э" относительно зажима "К" находятся под потенциалом 105 В.

3.6 Включить нагреватель печи и произвести измерения в процессе нагрева.

4 Задание

4.1 Ознакомиться с измерительной установкой.

4.2 Снять температурную зависимость электрической проводимости керамического диэлектрика $\gamma = f(t)$, изменяя температуру от 20 до 230 °С. Измерения сопротивления проводить через 10-15 °С. Построить график $\gamma = f(t)$ в полулогарифмической системе координат.

4.3 Рассчитать энергию активации для всех видов ионов.

4.4 Данные измерений записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$1/T, 1/\text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma=1/R$	$\ln \gamma$	Примечание
						<i>Материал образца</i>

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

5 Вопросы для самопроверки

5.1 Чем обусловлена электропроводность твёрдых диэлектриков? Объясните механизм электропроводности.

5.2 Какова температурная зависимость электропроводности твердых диэлектриков?

5.3 Что такое энергия активации?

5.4 В каком соотношении находятся энергия активации собственных и примесных ионов?

5.5 Докажите, что при низких температурах проводимость примесная, а не собственная.

5.6 Физический смысл явления саморазряда конденсатора?

5.7 Расскажите принцип действия тераомметра.

Список рекомендуемой литературы

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

2. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: Учебное пособие для вузов. СПб.: Питер, 2006. – 521 с.

3. Электрорадиоматериалы / Под ред. Б.М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978. – 336 с.