

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 ( $\text{TiO}_2$ ), 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  $\gamma$  диэлектрика определяется как

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

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

Концентрация  $n$  и подвижность  $\mu$  ионов зависят от температуры. Следовательно, удельная электрическая проводимость  $\gamma$  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  $\Delta W_1$  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  $\Delta W_2$  значительно меньшая, чем  $\Delta W_1$  (см. рисунок 1.1).

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

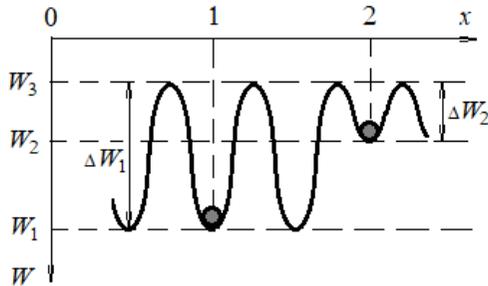


Рисунок 1.1 – Зависимость потенциальной энергии иона твердого диэлектрика от координаты в электрическом поле окружающих заряженных частиц

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  $\Delta W_1$ , а для перехода примесного иона – барьер  $\Delta W_2$ . 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  $\gamma$  – 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.

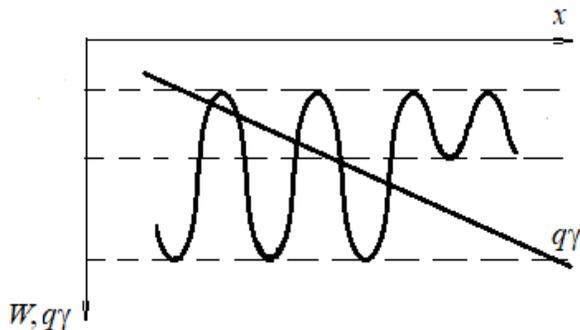


Рисунок 1.2 – Зависимость потенциальной энергии иона от координаты во внешнем поле  $\gamma \cdot q$  и в электрическом поле окружающих заряженных частиц  $W$

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.

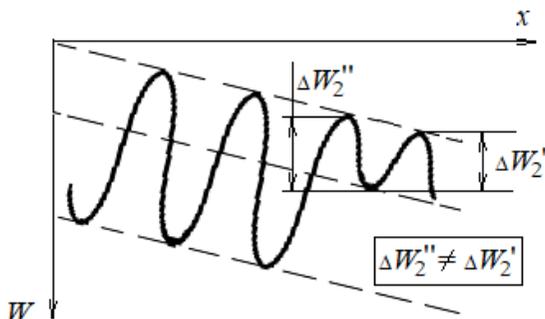


Рисунок 1.3 – Зависимость потенциальной энергии иона от координаты в твердом теле при воздействии равномерного электрического поля

## 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;  
 $\Delta W$  – 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).

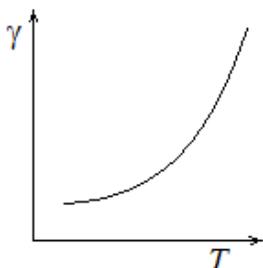


Рисунок 1.4 –  
Зависимость  
электрической  
проводимости от  
температуры

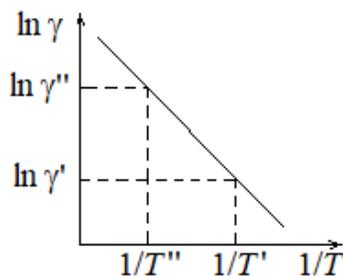


Рисунок 1.5 – Зависимость  
электрической проводимости от  
температуры в  
полулогарифмической системе  
координат

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,  
 $\Delta W$  – энергия активации ионов, эВ;  
 $\gamma'$  и  $\gamma''$  – 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;

$\Delta W_1$  и  $\Delta W_2$  – 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  $\tau$  – постоянная времени саморазряда конденсатора, с.

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

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

$$\tau = R \cdot C = \rho \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$$

где  $R$  – объемное сопротивление изоляции конденсатора, Ом;

$C$  – емкость конденсатора, Ф;

$\rho$  – удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·м;

$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф·м<sup>-1</sup>;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость.

## 2 Описание установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.1.

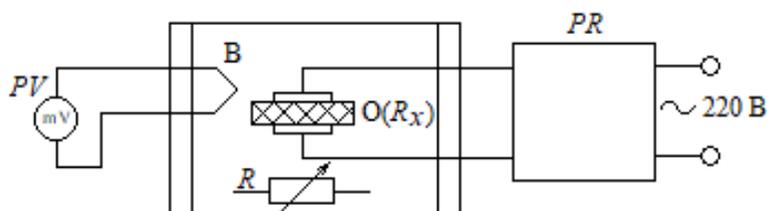


Рисунок 2.1 – Схема установки

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.

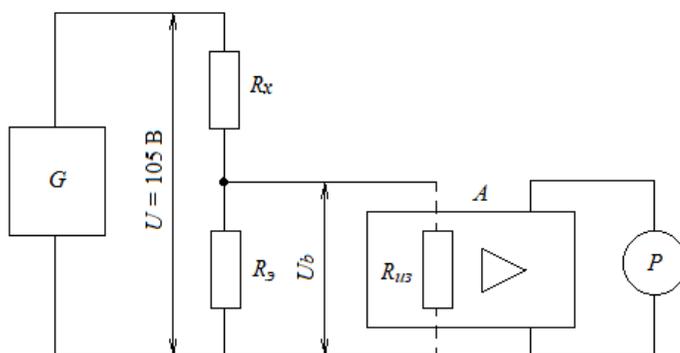


Рисунок 2.2 – Схема тераомметра

### 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub>. 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

$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$1/T, 1/\text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma=1/R$	$\ln \gamma$	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.