



### 040003. Исследование электропроводности твердых диэлектриков.

**Цель работы:** Изучение электропроводности твердых диэлектриков:

1. Определение удельного поверхностного сопротивления и удельного объемного сопротивления твердых диэлектриков в зависимости от температуры.
2. Определение энергии активации носителей заряда в диэлектрике.

**Требуемое оборудование:**

1. Измеритель электропроводности ИЭП1 – 1 шт.
2. Измерительные кассеты – 3 шт.

#### Краткое теоретическое введение

По своему назначению электроизоляционные материалы под воздействием постоянного напряжения совершенно не должны пропускать электрический ток, т.е. должны быть непроводящими. Иными словами, удельное сопротивление электроизоляционных материалов в идеальном случае должно быть бесконечно большим.

Однако все практически применяемые электроизоляционные материалы при приложении постоянного напряжения пропускают некоторый, обычно очень незначительный ток, называемый **током утечки**. Поэтому, чем больше удельное сопротивление электроизоляционного материала,

тем выше его качество как изолятора, так как более незначительным будет ток утечки.

Ток утечки, протекающий через участок изоляции при установившемся процессе электропроводности, т.е. спустя достаточно большой промежуток времени после приложения к этому участку постоянного напряжения, также является постоянным и называется **сквозным током  $I_{СКВ}$**  (рис. 1).

До момента установления равновесного состояния в диэлектрике протекают процессы смещения связанных зарядов, создавая поляризационные токи, или **токи смещения  $I_{СМ}$** . Токи смещения упругосвязанных зарядов при электронной и ионной поляризациях столь кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать. Токи смещения различных видов замедленной поляризации называют **абсорбционными токами  $I_{АБС}$** . При постоянном напряжении абсорбционные

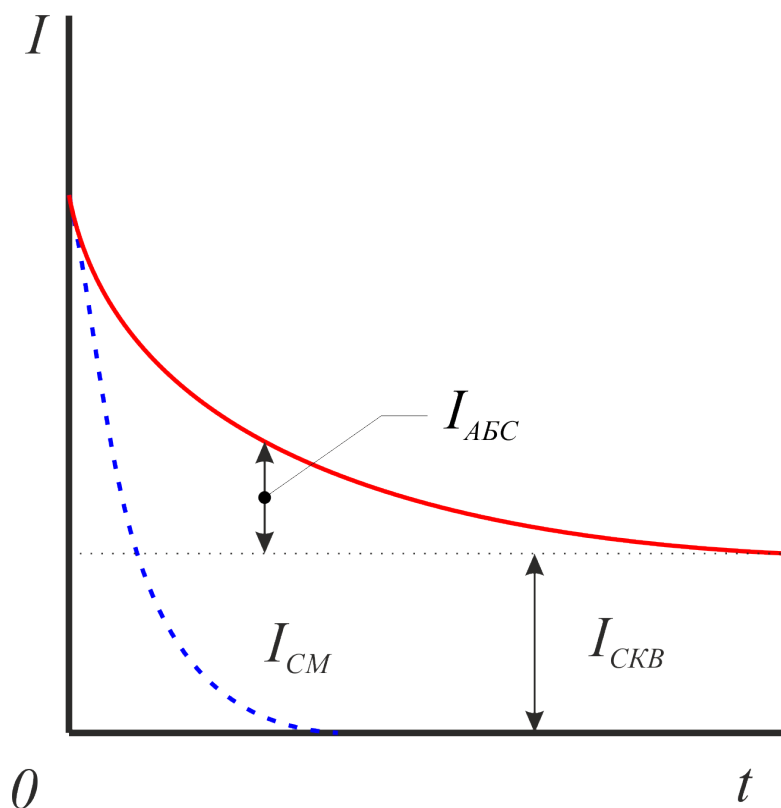


Рис. 1. Зависимость тока через диэлектрик от времени.

токи протекают только в момент включения и выключения напряжения, при переменном напряжении – в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Сопротивление участка изоляции  $R_{из}$  равно отношению приложенного к этому участку изоляции постоянного напряжения  $U$  к сквозному току  $I_{из}$  через этот участок

$$R_{из} = \frac{U}{I_{из}}, \quad (1)$$

Проводимость изоляции  $G_{из}$  – величина, обратная  $R_{из}$ :

$$G = \frac{1}{R_{из}} = \frac{I_{из}}{U} \quad (2)$$

Помимо объемной проводимости изоляции  $G_V$ , количественно определяющей возможность прохождения тока через толщину изоляции, следует учитывать также поверхностную проводимость изоляции  $G_S$ , характеризующую наличие повышенной электропроводности на поверхности раздела твердого диэлектрика с окружающей средой. Этот слой создается вследствие неизбежных загрязнений, увлажнения и т.п.

Соответственно вводятся понятия объемного  $R_V$  и поверхностного  $R_S$  сопротивлений изоляции и объемного  $I_V$  и поверхностного  $I_S$  токов:

$$I_V = UG_V = \frac{U}{R_V}; \quad I_S = UG_S = \frac{U}{R_S} \quad (3)$$

Очевидно (рис. 2), что , так что,  $I_{из}=I_V + I_S$   $G_{из}= G_V+G_S$

$$\frac{1}{R_{из}} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_S}; \quad R_{из} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S} \quad (4)$$

т.е. сопротивление изоляции определяется как результирующее двух сопротивлений – объемного и поверхностного, включенных параллельно друг другу между электродами.

Для участка изоляции с постоянным поперечным сечением  $S$  и толщиной  $h$  (форма плоского конденсатора) объемное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_V = \rho_V \frac{h}{S} \quad (5)$$

где –  $\rho_V$  характеризующая материал величина, называемая **удельным объемным сопротивлением**. Отсюда

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h}, \quad (6)$$

Для более точного определения величины  $\rho_s$  может быть измерено поверхностное сопротивление между помещенными на поверхности диэлектрика электродами в виде двух коаксиальных колец (рис. 2). В этом случае связь между  $R_s$  и  $\rho_s$  определяется соотношением:

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (7)$$

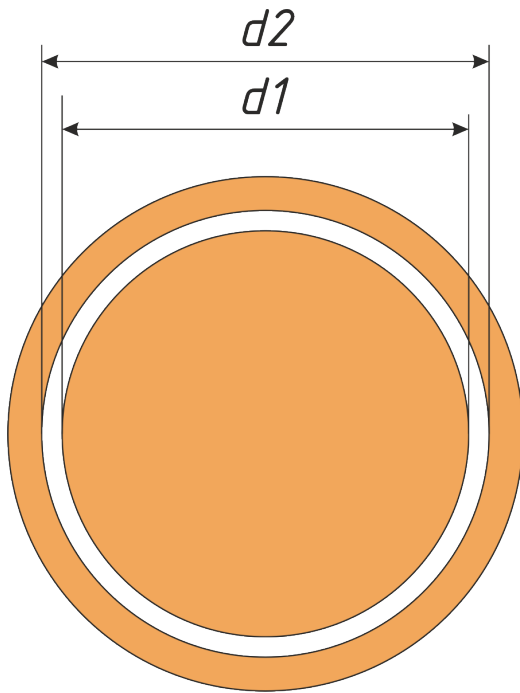


Рис. 2

где  $d_1$  – диаметр внутреннего электрода,  
 $d_2$  – внутренний диаметр кольцевого электрода.

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (8)$$

Величина удельного поверхностного сопротивления очень сильно зависит от условий измерения и состояния поверхности диэлектрика.

Электропроводность диэлектриков чаще всего носит не электронный, а ионный характер. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны в диэлектриках много больше энергии теплового движения и лишь ничтожное количество электронов может переходить за счет теплового движения из валентной зоны в зону проводимости, становясь

носителями тока. Ионы же часто оказываются более слабосвязанными в узлах решетки, и энергия активации  $W$ , необходимая для их ухода из нормального положения в решетке в дефектные, сравнима с тепловой энергией  $kT$ . Например, в кристалле NaCl ширина запрещенной зоны  $\Delta E = 6$  эВ, а энергия активации иона Na  $W = 0.85$  эВ.

Электропроводность твердых диэлектриков растет с увеличением температуры по экспоненциальному закону:

$$G_v = en\mu = A \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) \quad (9)$$

Увеличение с температурой электропроводности в диэлектриках часто обусловлено не только изменением концентрации свободных ионов, но и ростом их подвижности  $\mu$ . Во многих случаях зависимость электропроводности  $G_v$  от температуры хорошо описывается формулой

$$G_v = a \exp\left(-\frac{b}{T}\right) \quad (10)$$

где  $a$  – постоянная, зависящая от природы диэлектрика;  
 $b$  – коэффициент, определяющий энергию активации;  
 $T$  – температура образца диэлектрика, в К.

На рис. 3 приведена зависимость логарифма отношения  $G_{VT}/G_{VK}$  от обратной абсолютной температуры. Здесь  $G_{VT}$  – объемная электропроводность при температуре  $T$ , а  $G_{VK}$  – объемная электропроводность при комнатной температуре.

По наклону участков кривой можно определить энергию активации носителей заряда и их физическую природу:

$$W = k_B t g \alpha = k_B \frac{\Delta \ln \frac{G_{VT}}{G_{VK}}}{\Delta \frac{1}{T}} \quad (11)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана ( $8,625 \cdot 10^{-5}$  эВ/К);  $W$  – энергия активации носителей заряда в твердом диэлектрике в электронвольтах.

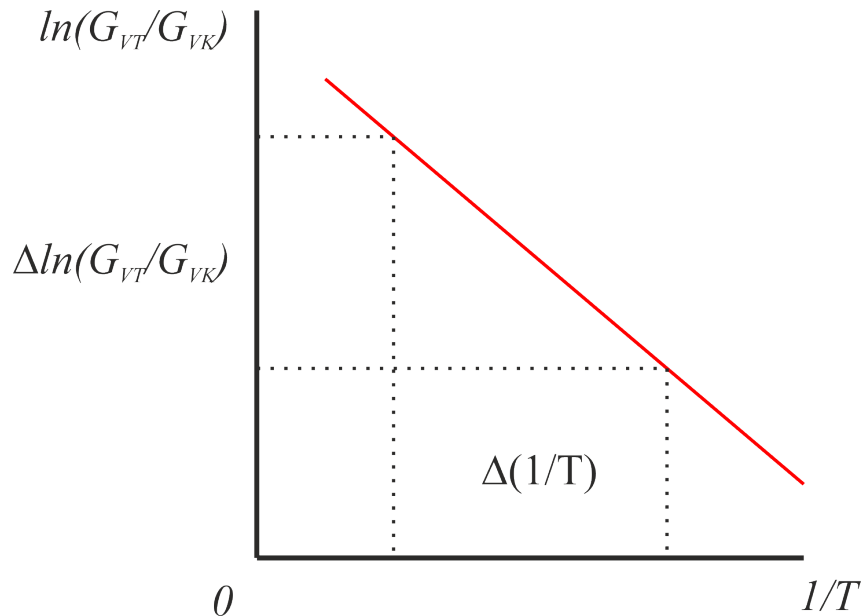


Рис. 3

На величину поверхностного сопротивления твердых диэлектриков особенно значительно влияют состояния их поверхности и условия образования на ней влажной пленки: смачиваемость, шероховатость, пористость, растворимость диэлектрика в воде. Как правило, диэлектрики неполярного строения (парафин, полистирол, полиэтилен) слабо адсорбируют влагу (не смачиваются), в связи с чем их удельное поверхностное сопротивление близко к удельному объемному сопротивлению. Если поверхность таких диэлектриков имеет шероховатость, то в связи с удержанием ею пыли, осевшей из воздуха, или других случайно попавших частиц, поверхностное сопротивление диэлектрика будет значительно снижено. Поэтому в целях увеличения поверхностного сопротивления твердых диэлектриков, особенно при работе на открытом воздухе, их поверхность обычно шлифуется, полируется, покрывается глазурью и т. д.

### Методика проведения эксперимента



Рис. 4

Исследование зависимости сопротивления проводниковых материалов от температуры проводятся с помощью прибора ИЭП1 (рис. 4). Он содержит термокамеру, терморегулятор и измеритель сопротивлений в диапазоне  $10 \dots 10^{13}$  Ом.

Применяемый в приборе метод измерения сопротивлений основан на сравнении измеряемого сопротивления и образцового сопротивления с помощью операционного усилителя, охваченного глубокой обратной связью (рис. 5). В приборе имеются два диапазона измерений и используются две шкалы – линейная и обратно пропорциональная. Измерения сопротивлений в диапазоне  $10^2 \dots 10^6$  Ом проводятся по линейной шкале, а в диапазоне

$10^7 \dots 10^{13}$  Ом – по обратно пропорциональной шкале.

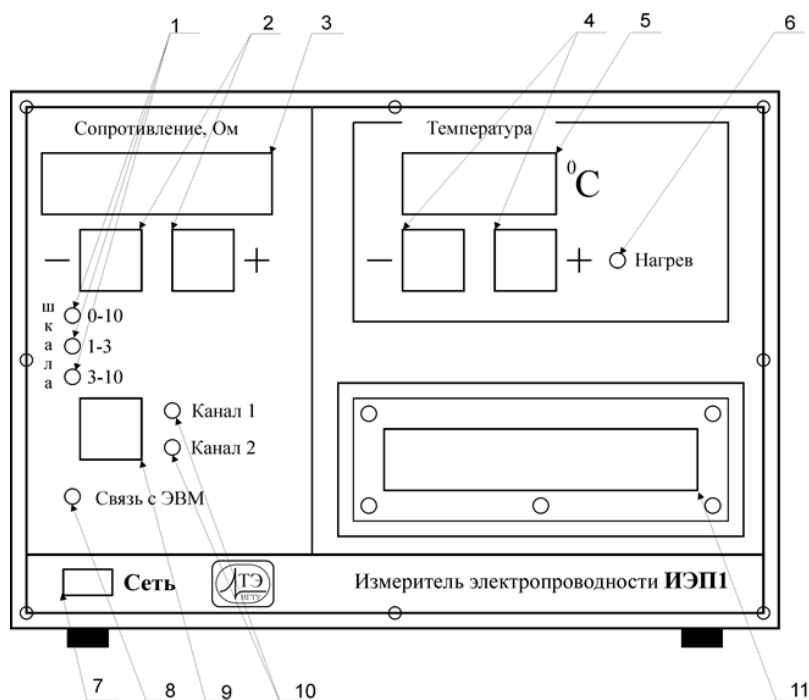


Рис. 5

На передней панели прибора расположены:

- 1 – индикатор шкалы;
- 2 – кнопки выбора поддиапазона;
- 3 – индикатор результата измерения;
- 4 – кнопки выбора температуры;
- 5 – индикатор температуры;
- 6 – индикатор нагрева;
- 7 – кнопка выключателя “Сеть”;
- 8 – индикатор связи с ЭВМ;
- 9 – кнопка переключения канала;
- 10 – индикатор выбора канала;
- 11 – термокамера.

Для включения прибора необходимо нажать кнопку 7 “Сеть” (рис. 5), при этом загорится индикатор результата измерения 3, индикатор выбора температуры 5, индикатор выбора канала 10.

Исследуемые образцы находятся в измерительной кассете ИК1. Для ее установки в прибор необходимо поднять шторку 11, установить кассету с образцами в термокамеру прибора до упора. При этом шторка должна опуститься.

Кнопками 2 устанавливается требуемый диапазон измерений.

Кнопкой 9 устанавливается требуемый канал для измерения. Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10.

С помощью кнопок 4 устанавливается требуемое значение температуры термокамеры. При первом нажатии кнопки на индикаторе 5 высветится установленное значение температуры. При повторном нажатии кнопки произойдет коррекция устанавливаемой температуры. Через 2 секунды после завершения установки индикатор 5 перейдет в режим отображения текущей температуры.

Для отключения терморегулятора необходимо установить температуру менее  $30^{\circ}\text{C}$ . При этом на экране высветится сообщение “OFF”.

**Примечание** При работе прибора на индикаторе  $I$  могут отображаться следующие сообщения: “ $L$ ” – измеряемое сопротивление ниже выбранного диапазона; “ $H$ ” – измеряемое сопротивление выше выбранного диапазона.

Для исследуемых в работе образцов, имеющих сопротивление более  $10^7$  Ом, измерения проводятся по обратнопропорциональной шкале. Для этого в приборе реализована схема рис. 8. При измерениях с обратно пропорциональной шкалой источник напряжения и измеряемый объект образуют искусственный генератор тока. Образцовый резистор включают в цепь обратной связи.

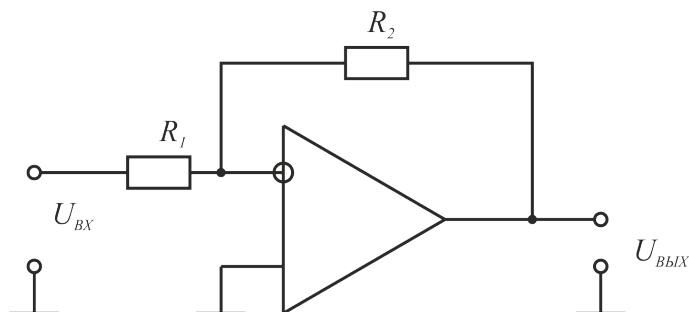


Рис. 6

Измеряемое сопротивление определяется по формуле:

$$R_1 = \frac{U_{BX}}{U_{ВЫХ}} R_2 \quad (12)$$

где  $R_2$  – измеряемое сопротивление, Ом;  
 $R_1$  – сопротивление образцового резистора;  
 $U_{ВЫХ}$  – выходное напряжение усилителя;  
 $U_{BX}$  – входное напряжение с источника сигнала.

Определение твердых диэлектриков проводят на плоских образцах с электродами, сформированными при помощи графитового покрытия. Используется система из трех электродов рис. 5: общего электрода  $1$ , измерительного канала  $1$  (нижний электрод), и измерительного канала  $2$  (кольцевой электрод).

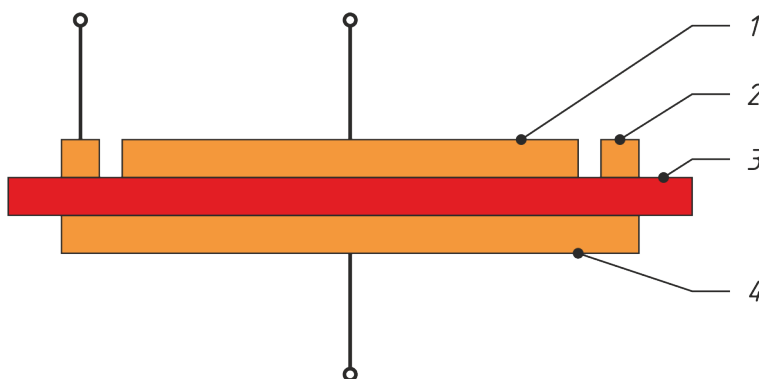


Рис. 7. Расположение электродов на плоском образце:  
 $1$  – общий электрод,  $2$  – кольцевой электрод для определения  $R_S$ ,  
 (канал 2)  $3$  – исследуемый образец диэлектрика,  $4$  – электрод для  
 определения  $R_V$  (канал 1)

Для определения  $R_V$  необходимо подключить канал 1. Для определения  $R_S$  необходимо подключить канал 2. Размеры электродов стандартизированы. Для данной измерительной системы:  $d_1=60$  мм,  $d_2=66$  мм. Толщина образцов  $h$  указана на касете.

### **Рекомендуемое задание**

1. Установите картридж в прибор. Включите кнопку 7 “Сеть” (рис. 5). При комнатной температуре измерьте объемное и поверхностное сопротивление. Для этого кнопкой 9 установите требуемый канал для измерения. Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10. Объемное сопротивление отображается по каналу 1. Поверхностное сопротивление отображается по каналу 2. Кнопками 2 установите требуемый диапазон сопротивления.

2. Провести измерение температурной зависимости для объемного сопротивления. С помощью кнопок 4 установите требуемое значение температуры термокамеры. Измерения  $R_{VT}$  производите по следующему температурному ряду: комнатная, 40, 60, 80, 100 °С. **Рекомендуется соблюдать интервал между измерениями 10 мин для стабилизации показаний прибора при нагреве образца.** По полученным значениям рассчитать  $G_{VT} = 1/R_{VT}$ . По окончании измерений отключите терморегулятор. Для этого необходимо установить температуру менее 30 °С. При этом на экране высветится сообщение «OFF». ***Осторожно выньте образец из термокамеры.***

3. По полученным данным постройте график зависимости  $\ln(G_{VT}/G_{VK})=f(1/T)$ , где  $G_{VT}$  – величина электропроводности, рассчитанная по измеренному при данной температуре;  $G_{VK}$  – величина электропроводности при комнатной температуре.

4. По наклону кривой определить энергию активации носителей заряда  $W$  (формула 11).

### **Список используемых источников**

Материаловедение. Конструкционные и электротехнические материалы. Материалы и элементы электронной техники. Практикум к лабораторным работам : учеб.-метод. пособие / И.Л. Новиков, Р.П. Дикарева, Т.С. Романова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 56 с.

февраль 2016

---

630092 г. Новосибирск пр. Карла Маркса 20, НГТУ,  
НИЛ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА (НИЛ ТЭ)

тел.: (383)-3460677

[http: www.nil.opprib.ru](http://www.nil.opprib.ru)

e-mail: [lab@opprib.ru](mailto:lab@opprib.ru)