

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.М. Славникова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАГИ НА
ПОВЕРХНОСТНОЕ И ОБЪЕМНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ
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
С 470

Рецензент

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

Славникова Марина Михайловна

Исследование влияния влаги на поверхностное и объемное сопротивления диэлектриков: методические указания к лабораторному занятию по дисциплинам «Материаловедение и технология материалов», «Материалы и компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и радиокомпоненты» / М.М. Славникова. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 17 с.

В методических указаниях кратко изложено влияние влаги 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

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

Содержание

Введение.....	4
1 Основные понятия.....	4
2 Удельное объемное сопротивление.....	6
3 Удельное поверхностное сопротивление	8
4 Методика измерений.....	11
4.1 Измерение тока в диэлектрике.....	11
4.2 Измерение объемного сопротивления.....	11
4.3 Измерение поверхностного сопротивления.....	13
5 Устройство измерительного прибора	15
6 Меры безопасной работы	15
7 Порядок работы.....	16
8 Задание	16
9 Вопросы для самопроверки.....	16
10 Список рекомендуемой литературы.....	17

Введение

Атмосферная влага, воздействуя на негерметизированные элементы РЭА и ЭВА, может вызвать существенные изменения их электрических свойств. Данная лабораторная работа преследует цель:

исследовать влияние влаги на электрическое сопротивление диэлектриков в зависимости от их химического состава и строения.

1 Основные понятия

В диэлектрике под действием приложенного постоянного напряжения протекает ток I , имеющий две составляющие (рисунок 1.1): ток I_S , идущий по поверхностному слою образца (поверхностный ток), и ток I_V , проходящий через объем образца (объемный ток).

$$I = I_S + I_V \quad (1.1)$$

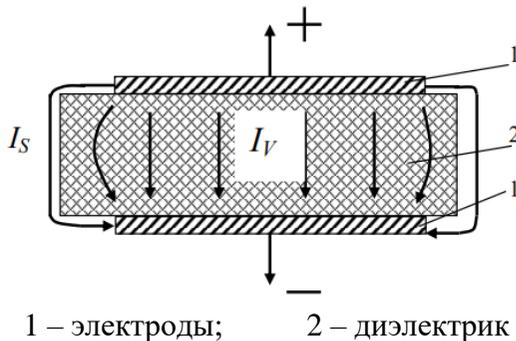


Рисунок 1.1 – Схема токов в диэлектрике при действии постоянного напряжения

Можно измерить каждый из этих токов отдельно и, зная величину приложенного напряжения U , рассчитать соответственно поверхностное R_S и объемное R_V сопротивления диэлектрика:

$$R = \rho \frac{l}{q} R_s = \frac{U}{I_s}, R_V = \frac{U}{I_V}, \quad (1.2)$$

Для сравнительной характеристики твердых диэлектриков пользуются величинами удельного объемного ρ_V и удельного поверхностного ρ_S сопротивлений. Часто наряду с ρ_V и ρ_S используют удельную поверхностную (σ_S) и удельную объемную (σ_V) проводимости диэлектрика:

$$\sigma_S = \frac{1}{\rho_S}, \sigma_V = \frac{1}{\rho_V}.$$

Удельное объемное сопротивление ρ_V численно равно сопротивлению кубика материала с ребром 1 м, если ток проходит сквозь кубик от одной его грани до противоположной. Для плоского образца

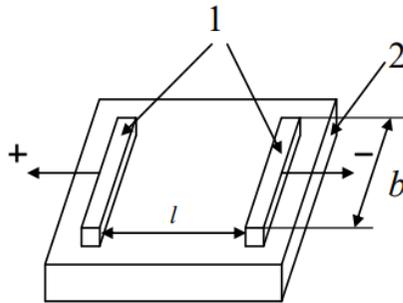
$$\rho_V = R_V \frac{S}{l}, \quad (1.3)$$

где ρ_V – удельное объемное сопротивление, Ом·м;
 R_V – объемное сопротивление образца, Ом;
 S – площадь электрода, м²;
 l – толщина образца, м.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S численно равно сопротивлению квадратного участка, мысленно вырезанного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата. Для плоского образца (рисунок 1.2.)

$$\rho_S = R_S \frac{b}{l}, \quad (1.4)$$

где ρ_S – удельное поверхностное сопротивление, Ом;
 R_S – поверхностное сопротивление материала между параллельными электродами, Ом;
 b – длина электрода, м;
 l – расстояние между электродами, м.



1 – электроды; 2 – диэлектрик.

Рисунок 1.2 – Схема размещения параллельных электродов на плоском образце при измерении поверхностного сопротивления

Расчет по формуле (1.4) дает приблизительно правильный результат.

Методика точного измерения и расчета ρ_s приведена ниже в разделе 3.

2 Удельное объемное сопротивление

Величина удельного объемного сопротивления диэлектрика зависит от его химического состава, структуры и её дефектности, а также от окружающих условий (температуры, влажности среды и т.д.) величины и времени воздействия напряжения.

Электропроводность большинства твердых диэлектриков обусловлена передвижением ионов, а у некоторых (например, у TiO_2 и титаносодержащей керамики) может быть вызвана наличием свободных электронов.

Диэлектрики с монокристаллической структурой обладают большим сопротивлением, чем те же диэлектрики с поликристаллической структурой.

Поликристаллах атомные плоскости соседних зерен могут располагаться под большим углом друг относительно

друга. Кристаллическая решетка между зернами сильно искажена. Ионы на границе между зернами слабее закреплены, чем внутри зерен и сравнительно легко перемещаются вдоль границ зерен в электрическом поле. Поэтому диэлектрики с поликристаллической структурой обладают значительно меньшим сопротивлением, чем монокристаллические диэлектрики того же состава.

Даже весьма малые количества примеси, иногда с трудом обнаруживаемые химическим анализом, способны заметно уменьшить сопротивление диэлектрика, т.к. слабо закрепленные в решетке ионы примесей могут легко мигрировать во внешнем электрическом поле. Примеси сильно влияют на сопротивление диэлектрика в основном в области низких температур.

Почти все диэлектрики в большей или меньшей степени гигроскопичны, т.е. обладают способностью поглощать («впитывать» влагу). Молекула воды имеет очень маленькие размеры (табл. 3.1). Вода проникает внутрь диэлектриков даже по внутримолекулярным порам. Поэтому пропитка и покрытие защитными веществами не обеспечивает полную влагозащиту диэлектриков, а только замедляет процесс поглощения влаги.

Удельное сопротивление воды значительно меньше, чем у твердых диэлектриков. В диэлектриках, имеющих сквозные поры, поглощенная влага, может образовывать проводящие водяные мостики, связывающие электроды и резко снижающие сопротивление. Например, у мрамора, находящегося в атмосфере 70 % относительной влажности, ρ_v на шесть порядков меньше по сравнению с ρ_v сухого мрамора. Если же влага распространяется по объему материала в виде отдельных, не соединяющихся между собой малых включений (материал имеет закрытые поры), то влияние влаги на величину ρ_v менее существенно. Примером такого материала может служить керамика.

Наиболее заметное снижение ρ_v под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, которые содержат растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой объемной проводимостью.

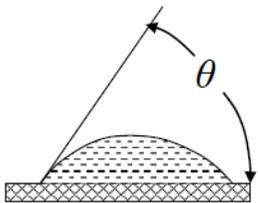
Таблица 2.1 – Ориентировочные размеры пор изоляционных материалов

Характер пористости	Размер пор, ангстрем	Примечание
Макропоры в керамике	$10^3 - 10^6$	Размер молекулы воды 2,7 ангстрема
Капилляры в волокнах целлюлозы	1000	
Поры в стенках волокна	10 – 100	
Межмолекулярная пористость	10 – 50	
Внутримолекулярная пористость	до 10	

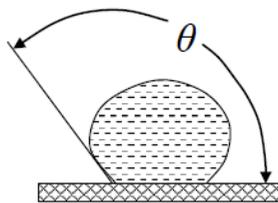
3 Удельное поверхностное сопротивление

Удельное поверхностное сопротивление зависит от свойств самого диэлектрика, состояния его поверхности и окружающих условий.

Образование адсорбированной пленки воды на поверхности диэлектрика зависит от его способности смачиваться водой. Если диэлектрик хорошо смачивается, то капля воды растекается по его поверхности и краевой угол смачивания меньше 90° (рисунок 3. 1).



а) диэлектрик смачивается
водой



б) диэлектрик не смачивается
водой

Рисунок 3.1 – Форма капли воды на поверхности
твердых диэлектриков

В этом случае на поверхности диэлектрика легко образуется сплошная пленка воды, сильно уменьшающая величину поверхностного сопротивления. Такие диэлектрики называются гидрофильными. Если вода не смачивает диэлектрик, то она не растекается, а собирается в виде отдельных капель на поверхности и не оказывает большого влияния на величину поверхностного сопротивления. Такие диэлектрики называются гидрофобными. Таблица 3.1. иллюстрирует соотношение удельного поверхностного сопротивления и краевого угла смачивания для некоторых твердых диэлектриков.

Обычно резкое уменьшение ρ_s наблюдается, когда относительная влажность воздуха не превышает 50–60 %. Особенно сильно влага уменьшает ρ_s , если в диэлектрике есть вещества, растворимые в воде.

Таблица 3.1 – Значения удельного поверхностного сопротивления и краевого угла смачивания для некоторых твердых диэлектриков

Название диэлектрика	Краевой угол смачивания, град.	ρ_s , Ом
Фторопласт-4 (Фторлон)	113	$5,0 \cdot 10^{17}$
Полистирол	98	$3,0 \cdot 10^{15}$
Оргстекло	73	$1,5 \cdot 10^{15}$
Ультрафарфор	50	$1,0 \cdot 10^{13}$

Большое значение имеет состояние поверхности диэлектрика. Загрязнения (особенно водорастворимыми веществами) снижают удельное поверхностное сопротивление (таблица 3.2.). Шероховатость поверхности способствует накоплению на ней загрязнений и влаги. Для того чтобы повысить ρ_s , применяют разнообразные методы очистки и обработки поверхности диэлектриков (промывка дистиллированной водой последующей сушкой, прокаливание при 600–700 °С, глазуровка поверхности и т.д.).

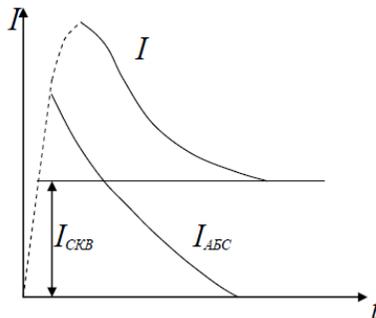
Таблица 3.2 – Влияние очистки поверхности диэлектриков на величину удельного поверхностного сопротивления при относительной влажности воздуха 70 %

Название диэлектрика	Удельное поверхностное сопротивление до очистки, Ом	Удельное поверхностное сопротивление после очистки, Ом
Щелочное стекло	$2 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{11}$
Плавленый кварц	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{13}$
Слюда	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

4 Методика измерений

4.1 Измерение тока в диэлектрике

При измерении сопротивления изоляции необходимо учитывать, что после включения постоянного напряжения ток в диэлектрике мгновенно возрастает от нуля до некоторой величины, а затем постепенно уменьшается со временем до постоянной величины – сквозного тока (рисунок 4.1).



- $I = I_{АВС} + I_{СКВ}$ – суммарный ток в диэлектрике;
 $I_{АВС}$ – ток абсорбции, вызванный процессами поляризации и накопления объемных зарядов;
 $I_{СКВ}$ – ток сквозной, создаваемый дрейфом в электрическом поле свободных электронов и ионов;
 t – время с момента включения напряжения.

Рисунок 4.1 – Зависимость тока в диэлектрике от времени воздействия постоянного напряжения

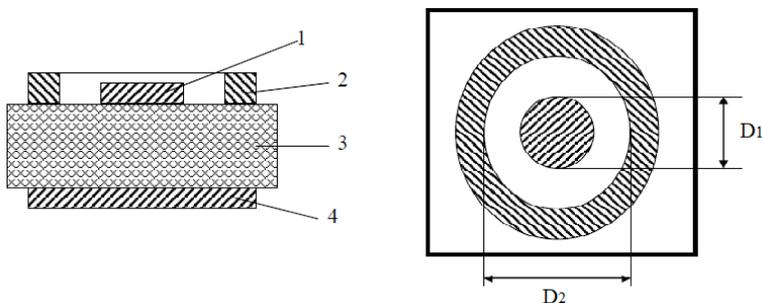
Расчет сопротивления ведут по сквозному току. У большинства твердых диэлектриков $I_{АВС}$ уменьшается до нуля за время не более одной минуты. Поэтому отсчет показаний измерительного прибора, согласно государственному стандарту, следует производить через 1 минуту после включения напряжения.

4.2 Измерение объемного сопротивления

Измерение объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков производят на плоских образцах, на поверхности

которых приклеиваются с помощью вазелинового или трансформаторного масла три электрода, как показано на рисунок 4.2.

Для измерения объемного сопротивления образец подключается по схеме, представленной на рисунке 4.3. Ток, прошедший сквозь толщину диэлектрика на верхний электрод (объемный ток), измеряется чувствительным токовым прибором. Поверхностный ток I_S и объемный ток I_V попадают на заземленное охранное кольцо и не регистрируются токовым прибором. Объемное сопротивление R_V можно рассчитать по формуле (1.2), а удельное объемное сопротивление ρ_V - по формуле (1.3), принимая, что S равно площади верхнего электрода 1 (см. рисунок 4.1 и 4.2).



- 1 – верхний электрод;
- 2 – охранное кольцо;
- 3 – образец диэлектрика;
- 4 – нижний электрод.

Рисунок 4.2 – Образец диэлектрика с электродами

При измерении объемного сопротивления охранное кольцо должно быть заземлено. В противном случае токовый прибор измерит не только ток I_V , прошедший через сечение S , но и ток I_V , который протекал по объему на охранное кольцо, а также и поверхностный ток I_S (рисунок 4.4). Рассчитанное по этому суммарному току сопротивление будет меньше объемного сопротивления, а рассчитать ρ_S будет невозможно.

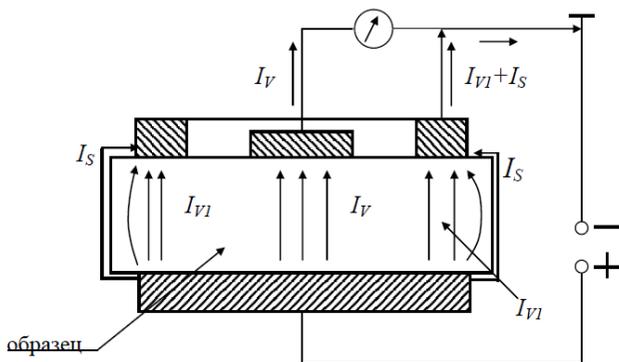


Рисунок 4.3 – Схема протекания токов в диэлектрике при заземленном охранном кольце

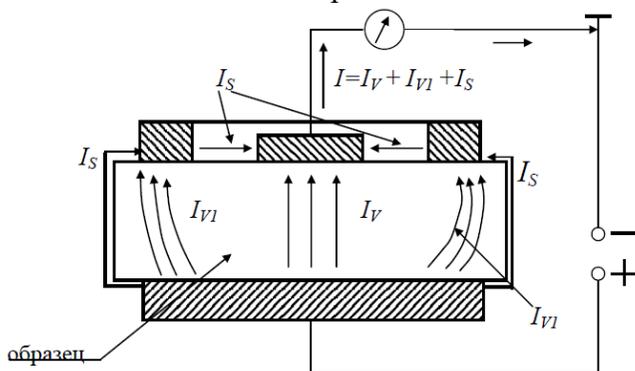


Рисунок 4.4 – Схема протекания токов в диэлектрике при незаземленном охранном кольце

4.3 Измерение поверхностного сопротивления

При измерении поверхностного сопротивления диэлектрика подключение электродов образца производится по схеме, представленной на рисунок 4.5. Измеряемый ток в этом случае протекает по кольцевой поверхности диэлектрика между верхним электродом 1 и охранным кольцом 2. Нижний электрод 3 должен быть заземлен.

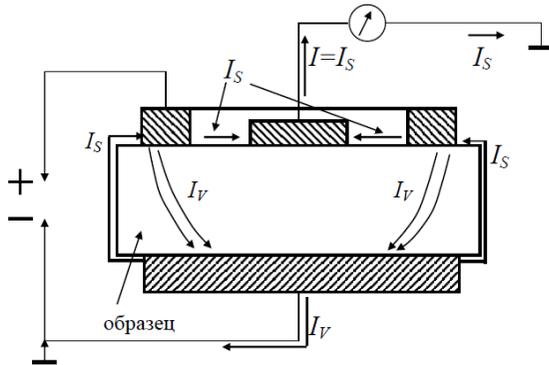


Рисунок 4.5 – Схема протекания токов в диэлектрике при заземленном нижнем электроде

Поверхностное сопротивление диэлектрика можно рассчитать по формуле (1.2). При измерениях с данной системой электродов удельное поверхностное сопротивление рассчитывается по формуле (4.1).

$$\rho_S = R_S \frac{2\pi}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad (4.1)$$

где ρ_S – удельное поверхностное сопротивление, Ом;

R_S – поверхностное сопротивление, Ом;

D_1 – диаметр верхнего электрода, м;

D_2 – внутренний диаметр кольцевого электрода, м.

Если электрод 3 не заземлен, то токовый прибор будет измерять не только ток, протекающий по поверхности диэлектрика между электродами 1 и 2, но и ток, который протекает между этими электродами по объему диэлектрика (рисунок 4.6). Поэтому рассчитанное значение удельного сопротивления будет меньше действительного.

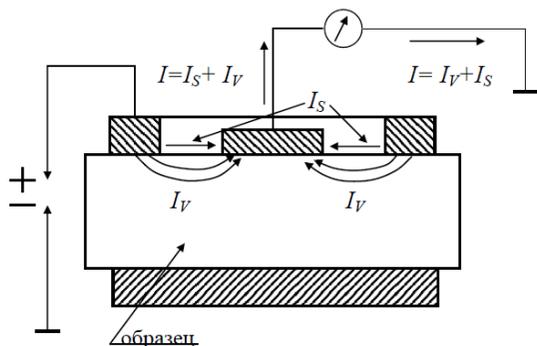


Рисунок 4.6 – Схема протекания токов в диэлектрике при незаземленном нижнем электроде

5 Устройство измерительного прибора

Для измерения сопротивления диэлектриков в данной работе используется тераомметр Е6-13А. Применяемый в приборе метод измерения сопротивлений основан на сравнении измеряемого сопротивления с образцовым. Прибор состоит из источника постоянного напряжения 100 В, электрометрического усилителя со стрелочным микроамперметром на выходе и измерительной камеры, в которой размещаются испытуемые диэлектрики. Расширение пределов измерений достигается с помощью набора образцовых резисторов. Постоянное напряжение и сопротивления резисторов известны, поэтому шкала микроамперметра проградуирована в величинах измеряемых сопротивлений.

6 Меры безопасной работы

6.1. Работать следует с заземленным прибором. Для заземления на задней стенке прибора и в измерительной камере имеются клеммы заземления.

6.2. Измерительная камера не имеет блок-контактов отключения постоянного напряжения при открывании крышки. Открывать крышку и переключать образцы можно только при условии, что ручка замыкания входа тераомметра находится в положении «УСТ.0».

7 Порядок работы

7.1. Установите ручку замыкателя входа тераомметра в положение «УСТ.О».

7.2. Включите прибор в сеть 220 В и дайте ему прогреться 30 мин.

7.3. Установите образец в измерительную камеру и подключите электроды.

7.4. Ручкой «УСТ. О ТОЧНО» установите стрелку прибора на отметку «∞».

7.5. Переведите ручку замыкателя входа в положение «ИЗМЕРЕНИЕ», для чего, слегка нажав, поверните её против часовой стрелки до упора и отпустите. При этом образец подключится к источнику постоянного напряжения 100 В.

7.6. Переключатель диапазонов установите в удобное для измерения положение и произведите отсчет.

7.7. Верните ручку замыкателя входа в положение "УСТ. О".

8 Задание

8.1. Измерьте поверхностное и объемное сопротивления сухих и влажных образцов. Рассчитайте их удельные сопротивления. Все результаты представьте в виде таблиц.

8.2. Дайте физическое объяснение полученных результатов.

9 Вопросы для самопроверки

9.1. От чего зависит объемное сопротивление диэлектриков?

9.2. Почему могут отличаться объемное и поверхностное сопротивления?

9.3. Каков механизм влияния влаги на объемное и поверхностное сопротивления диэлектриков?

9.4. Что такое удельное поверхностное сопротивление и как его рассчитать?

9.5. Почему измерение сопротивления производят на постоянном напряжении?

9.6. Как исключить влияние поверхностных токов на результаты измерения удельного объемного сопротивления?

9.7. Как измерить удельное поверхностное сопротивление на плоском образце?

9.8. В чем разница между гидрофильными и гидрофобными материалами?

9.9. Как можно увеличить поверхностное сопротивление образцов диэлектриков?

9.10. Почему сопротивление диэлектриков измеряют через некоторое время после подачи напряжения на образец?

10 Список рекомендуемой литературы

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

2 Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учебник.;4-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2004.- 368 с.

3 Электрорадиоматериалы /Под ред. Б.М. Тареева. -М.; Высшая школа, 1978.- 336 с.

4 Казарновский Д.М., Тареев Б.М. Испытания электроизоляционных материалов. - М.: Энергия, 1969. -296 с.