

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 18-21
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*



Воронеж 2024

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Составитель

канд. физ.-мат. наук А. С. Бадаев

Радиоматериалы и радиокомпоненты: методические указания к выполнению лабораторных работ № 18-21 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. С. Бадаев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2024. – 41 с.

Данные методические указания представляют собой лабораторный практикум по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты». В методических указаниях изучаются электропроводность твердых диэлектриков, их электрической прочности, исследуются диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери, возникающие в диэлектриках, изучаются свойства сегнетоэлектриков. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты».

Методические указания предназначены для студентов 4 и 5 курсов, специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле РМиРК_18-21.pdf.

Ил. 20. Табл. 2. Библиогр.: 1 назв.

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1.1. 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.

1.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение природы электропроводности диэлектриков; измерение электрического объемного и поверхностного сопротивлений слоистых пластиков текстолита и стеклотекстолита марки СТ-4; экспериментальное исследование и анализ температурных зависимостей объемного сопротивления пластиков; расчёт электропроводности и определение энергии активации носителей заряда исследуемых диэлектриков.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

1.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

1.2.1. Задание № 1

Ознакомиться с физической природой электропроводности диэлектриков. В заготовку отчёта занести зависимость тока через диэлектрик от времени. Указать и дать определение тока утечки, сквозного и абсорбционного токов, привести выражение для объемных и поверхностных сопротивлений и проводимостей диэлектриков.

1.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 6 – 8; с. 16 – 20.

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).

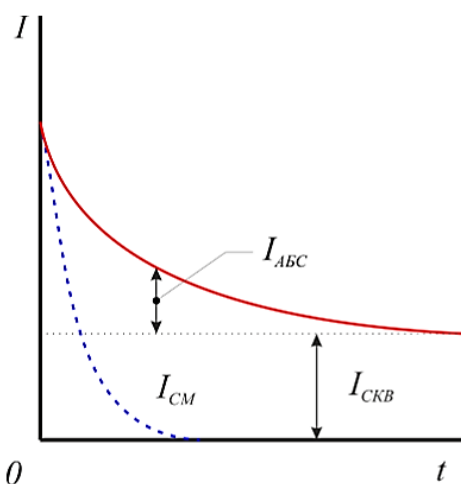


Рис. 1. Зависимость тока через диэлектрик от времени

До момента установления равновесного состояния в диэлектрике протекают процессы смещения связанных зарядов, создавая поляризационные токи, или *токи смещения* I_{CM} . 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_{ABC} . При постоянном напряжении абсорбционные 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 толщу 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. 2.2), что $I_{из} = I_V + I_S$, что $G_{из} = G_V + G_S$ так что

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

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 ρ_V характеризующая материал величина, называемая *удельным объемным сопротивлением*. Отсюда

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

Для более точного определения величины ρ_s может быть измерено поверхностное сопротивление между помещенными на поверхности диэлектрика электродами в виде двух коаксиальных колец (рис. 2).

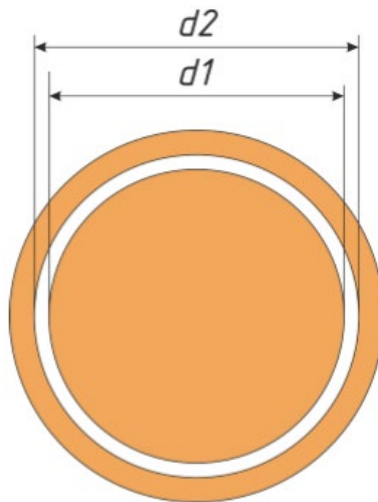


Рис. 2. Электроды в виде двух коаксиальных колец

В этом случае связь между R_s и ρ_s определяется соотношением:

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

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.

1.2.2. Задание № 2

Изучить влияние температуры на электропроводность твёрдых диэлектриков. В заготовку отчёта занести зависимость логарифма относительной проводимости от обратной абсолютной температуры.

Ознакомиться с определением энергии активации носителей заряда и их природы из этой зависимости.

1.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 20 – 22.

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 μ . 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:

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

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

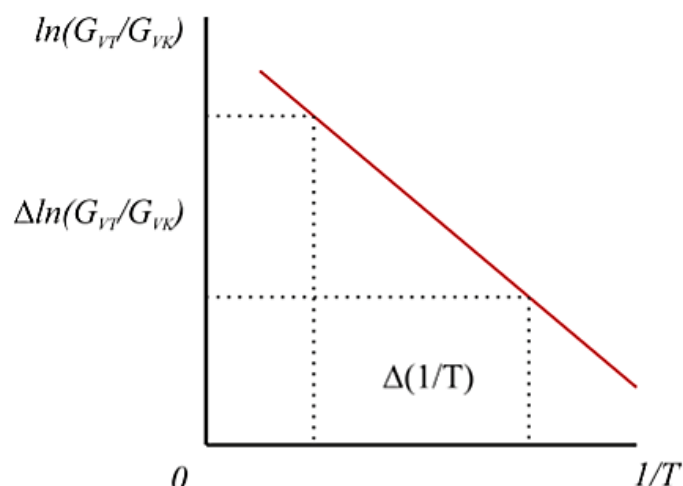


Рис. 3. Зависимость логарифма отношения G_{VT}/G_{VK} от обратной абсолютной температуры

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.

1.2.3. Задание № 3

Ознакомиться с основными электрофизическими свойствами и областями применения листовых слоистых пластиков. В заготовке отчёта привести таблицы с характеристиками текстолитов и стеклотекстолитов.

1.2.3.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 95 – 100.

1.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие материалы называют диэлектрическими?
2. Каков механизм электропроводности твердых диэлектриков и почему электропроводность диэлектриков мала? Какими токами определяется проводимость диэлектриков при постоянном и переменном напряжениях?

3. Приведите формулы для определения удельного, объемного и поверхностного сопротивлений и в каких единицах их измеряют?
4. Как влияет влажность на величину удельного поверхностного сопротивления твердых диэлектриков различной структуры?
5. Как влияет температура на электропроводность твердых диэлектриков?
6. Объясните зависимость логарифма относительной проводимости диэлектриков от обратной температуры. Как определить энергию активации носителей заряда и их природу из этой зависимости?
7. Назовите области применения листовых слоистых пластиков в радиоэлектронике.
8. Какие требования предъявляются к материалам печатных плат?
9. Приведите значения поверхностного сопротивления промышленных тексто- и стеклотекстолитов.

1.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

При выполнении работы используются приборы и оборудование, входящие в состав комплекса МУК-РМ1.

Таблица 1

Используемое оборудование	
Модульный учебный комплекс МУК-РМ1	
Измеритель электропроводности ИЭП1	1 шт.
Измерительная камера ИК1/2-3 для измерения сопротивления диэлектрических образцов	1 шт. и более

1.4.1. Задание № 1

Изучить порядок работы с приборами и подготовить их к работе. Исследование зависимости сопротивления диэлектрических материалов от температуры проводится с помощью прибора ИЭП1 (рис. 4). Он содержит термокамеру, терморегулятор и измеритель сопротивлений в диапазоне $10...10^{13}$ Ом.



Рис. 4. Внешний вид ИЭП1

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.

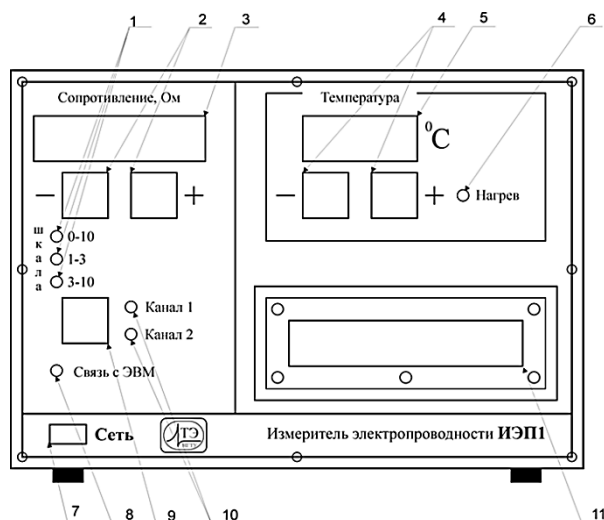


Рис. 5. Панель ИЭП1: 1 – индикатор шкалы; 2 – кнопки выбора поддиапазона; 3 – индикатор результата измерения; 4 – кнопки выбора температуры; 5 – индикатор температуры; 6 – индикатор нагрева; 7 – кнопка выключателя “Сеть”; 8 – индикатор связи с ЭВМ; 9 – кнопка переключения канала; 10 – индикатор выбора 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 300С. При этом на экране высветится сообщение “OFF”.

Примечание. При работе прибора на индикаторе *1* 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. 6.

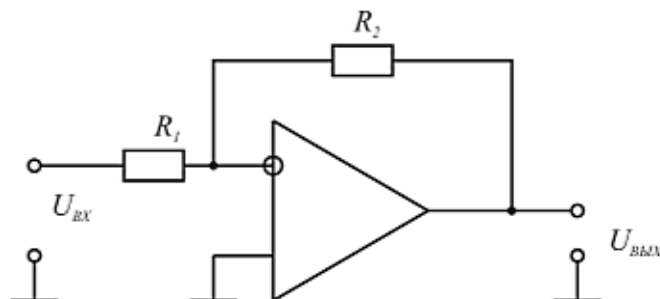


Рис. 6. Схема включения операционного усилителя

При измерениях с обратно пропорциональной шкалой источник напряжения и измеряемый объект образуют искусственный генератор тока. Образцовый резистор включают в цепь обратной связи.

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.

1.4.2. Задание № 2

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.

Определение сопротивления 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).

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 : текстолит – 2 мм; стеклотекстолит – 4 мм.

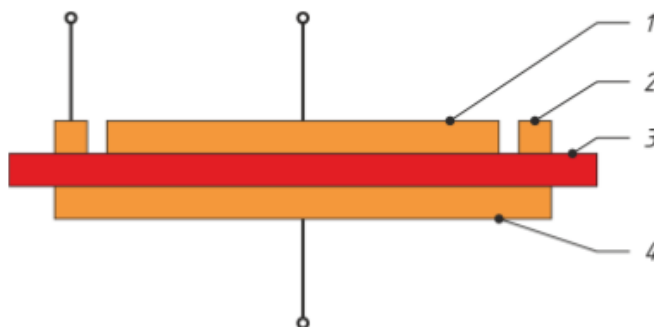


Рис. 7. Расположение электродов на плоском образце: 1 – общий электрод, 2 – кольцевой электрод для определения R_S , (канал 2) 3 – исследуемый образец диэлектрика, 4 – электрод для определения R_V (канал 1)

1.4.3. Задание № 3

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.*

1.4.4. Задание № 4

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

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

1.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и

графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Объясните методику измерения R и снятия зависимости $R(t)$ с помощью прибора ИЭП1 и измерительной камеры ИК1/2-3.
2. Что такое объёмные и поверхностные сопротивления и проводимости диэлектриков? Как они определяются?
3. Что называется энергией активации носителей заряда? Как она измеряется в эксперименте?
4. Сравните полученные значения сопротивлений текстолита и стеклотекстолита с промышленными образцами.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

2.1.1. Цель работы

Исследовать зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ и электрической прочности $E_{пр}$ воздуха от расстояния между электродами в однородном и неоднородном электрических полях.

2.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является исследование зависимости пробивного напряжения воздуха от расстояния до электродов различной геометрии, соответственно, в однородных и неоднородных электрических полях, и определение электрической прочности воздуха.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

2.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В. Не проводить эксперимент без закрытой крышки измерительной камеры ИК2. Не менять электроды при включенной установке.

2.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.2.1. Задание № 1

Изучить электрическую прочность диэлектриков, параметры её характеризующие, виды электрического пробоя. В заготовку отчёта занести ВАХ диэлектриков при пробое, формулы для определения электрической прочности и напряжения пробоя.

2.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 28 – 32.

Электрическая прочность — это способность диэлектрического материала сохранять свое высокое удельное сопротивление под действием напряженности электрического поля. Электрическая прочность E_{np} определяется из выражения

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \text{ МВ/м,} \quad (13)$$

где h — толщина диэлектрика; U_{np} — пробивное напряжение, приложенное к диэлектрику, приводящее к долговременному или кратковременному образованию каналу сквозной проводимости под действием электрического поля. Диэлектрик при этом теряет свои электроизоляционные свойства.

На рис. 8 приведена типичная вольтамперная характеристика, которая показывает изменение тока при пробое диэлектрика. При напряжении, большем напряжения пробоя $U > U_{np}$, на вольтамперной характеристике появляется участок АВ с отрицательной проводимостью, что обусловлено образованием канала сквозной проводимости. В результате этого падение напряжения уменьшается, электрический ток резко возрастает, и диэлектрик в месте пробоя становится проводником

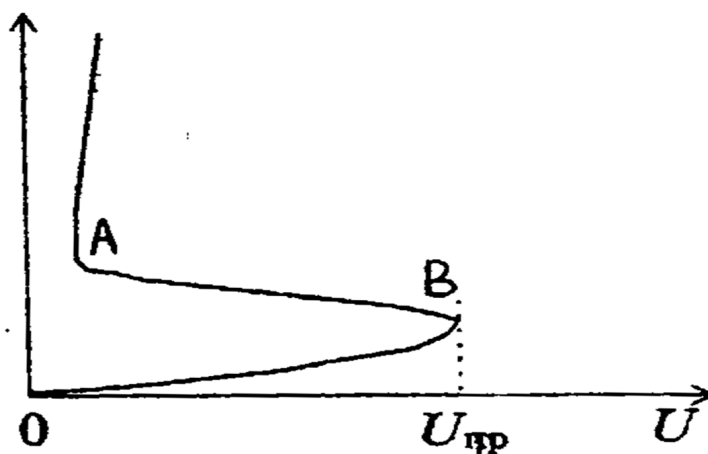


Рис. 8. Вольтамперная характеристика диэлектрика при пробое

Электрическая прочность зависит не только от агрегатного состояния диэлектриков (газ, жидкость, твердый диэлектрик) и их структуры, но может изменяться в зависимости от толщины диэлектрика, формы электродов и условий теплоотвода.

Электрическая прочность воздуха невелика по сравнению с большинством жидких и твердых диэлектриков. В нормальных условиях, т.е. при давлении 0,1 МПа и температуре 200 °С, при расстоянии между электродами в 1 см электрическая прочность $E_{np} = 3,2$ МВ/м.

В твердых диэлектриках возможны три основных вида пробоя: электрической, тепловой, электрохимический. Все эти виды пробоя могут иметь место в одном диэлектрическом материале в зависимости от характера внешнего электрического поля – постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты, наличия дефектов, условия охлаждения.

Электрический пробой проявляется в диэлектриках при кратковременном (импульсном) воздействии напряжения. Электрический пробой по своей природе является чисто электрическим процессом, когда немногие электроны от катода ускоряются электрическим полем и создают электронную лавину от катода к аноду. Развитие лавины ускоряет образование проводящего канала, в котором создается высокое давление, приводящее к появлению трещин или полному разрушению изоляционного материала. Чисто электрический пробой наблюдается у однородных диэлектриков с высокой температурой плавления, таких как окислы, щелочно-галогенидные соединения и некоторые органические полимеры. Электрическая прочность таких диэлектриков при электрическом пробое может достигать до 1000 МВ/м.

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепла, выделяемое в переменном поле в диэлектрике вследствие диэлектрических потерь, превышает количество тепла рассеиваемого в окружающее пространство. Тепловой пробой характерен для полярных диэлектриков и диэлектриков с полярными включениями. Кроме того, электротепловое и пробивное напряжение зависит от нагревостойкости материала. Органические диэлектрики с низкой температурой плавления, например полистирол, полихлорвинил, имеют меньшее значение теплового пробивного напряжения, чем неорганические материалы (керамика, кварцевое стекло).

Напряжение теплового пробоя для плоского диэлектрика с нанесенными электродами, находящимися в переменном электрическом поле частотой f , определяются по следующей приближенной формуле

$$U_{np} = k \sqrt{\frac{\lambda h}{f \varepsilon \alpha t g \delta_o}}, \text{ В} \quad (14)$$

где λ – суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности диэлектрика во внешнюю среду;

α – температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь;
 $\operatorname{tg} \delta_0$ – тангенс угла диэлектрических потерь при температуре окружающей среды;
 h – толщина диэлектрика;
 k – числовой коэффициент, равный $1,5 \cdot 10^5$, если размерность всех величин в системе СИ.

Из формулы (13) следует, что величина напряжения при тепловой пробое увеличивается с ростом толщины образца и коэффициента теплоотдачи от диэлектрика во внешнюю среду и снижается при высоких частотах, большом коэффициенте диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_0$ и большом температурном коэффициенте тангенса угла диэлектрических потерь α .

Ионизационный пробой является разновидностью теплового пробоя и происходит в диэлектриках с воздушными включениями, например, в пористой керамике. Пробой в этом случае обусловлен ионизационными процессами в воздушных включениях, приводящих к постепенному растрескиванию материала. Так как электрическая прочность газов меньше по сравнению с твердыми диэлектриками, то наличие воздушных включений в твердых диэлектриках приводит к снижению электрической прочности.

Поверхностный пробой диэлектриков возникает вследствие возникновения больших поверхностных токов, обусловленных снижением поверхностного сопротивления R_s . Причиной этого является наличие на поверхности загрязнений, влаги, шероховатости, трещин. Чем выше выражены гидрофильные свойства диэлектрика, тем сильнее снижается поверхностное пробивное напряжение; электрическая прочность при этом может снижаться до 0,1 МВ/м. При достаточной мощности источника тока поверхностный пробой может перейти в дуговой, т.е. развиваться по воздуху.

Электрохимический пробой возникает при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, при длительной эксплуатации изделия во влажной среде и повышенной температуре. Этот вид пробоя обусловлен такими процессами в диэлектрике, как электролиз, электромиграция, перенос ионов. Электрохимический пробой чаще наблюдается в конденсаторной керамике, содержащей окислы с переменной валентностью, например, диоксид титана TiO_2 , чем в керамике, содержащей окислы SiO_2 , MgO , BaO , Al_2O_3 .

В газах под действием электрического поля заряженные частицы (электроны, отрицательные и положительные ионы газа) перемещаются в направлении поля или против него в зависимости от их знака и приобретают на длине свободного пробега дополнительную к тепловой энергию:

$$W = qE\lambda, \quad (15)$$

где E – напряженность электрического поля;
 q – заряд частицы;
 λ – длина свободного пробега.

Если эта энергия становится больше или равной энергии ионизации газовых молекул W_u , то при столкновении с молекулой газа происходит ударная ионизация, т.е. расщепление молекулы на электроны и положительные ионы. Освобожденные при этом «вторичные» электроны под действием поля, в свою очередь, ионизируют молекулы газа, образуя электронную лавину.

В однородном поле пробой газа наступает внезапно с образованием электрической искры, в неоднородном поле ему предшествует явление короны. Пробивное напряжение при однородном поле выше пробивного напряжения в неоднородном поле при прочих равных условиях. Кроме этого, пробивное напряжение и электрическая прочность газа зависят от рода тока, давления и химического состава газа.

2.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Что понимается под явлением пробоя в диэлектриках? Как определяется электрическая прочность диэлектриков?
2. Какие существуют механизмы пробоя твердых диэлектриков? Каковы условия проявления каждого из них?
3. Приведите и объясните типичную ВАХ диэлектрика при пробое.
4. Что такое пробивное напряжение? Чему оно равно?

2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

При выполнении работы используются приборы и оборудование, входящие в состав комплекса МУК-РМ1.

Измерение пробивного напряжения и определение электрической прочности воздуха производится с помощью генератора высоковольтного напряжения ГНВ1 и измерительной камеры ИК2 (рис. 9). Максимальное напряжение, подаваемое на электроды камеры, составляет 20 кВ.



Рис. 9. Генератор высоковольтного напряжения ГНВ1 и измерительная камера ИК2

2.4.1. Задание № 1

Изучить порядок работы с приборами (лабораторная работа №1) и подготовить их к работе.

Для измерения пробивного напряжения необходимо перевести ГНВ1 в режим «Автомат». В этом режиме после нажатия кнопки «Пуск» выходное напряжение будет меняться автоматически от 0 до 20 кВ пошагово. При превышении напряжения свыше 20 кВ (нет пробоя) загорается индикатор перегрузки по напряжению «>20кВ» и источник отключается.

В случае возникновения пробоя загорится индикатор «>200мкА», фиксируется значение пробивного напряжения и источник отключается.

2.4.2. Задание № 2

Измерить напряжение пробоя между электродами плоскость-плоскость в зависимости от расстояния между ними.

Для этого:

1. Установите в электрододержатель измерительной камеры два электрода плоскость-плоскость и установите между электродами начальное расстояние 0.5 см, используя риски микрометра на стержне электрода.
2. Закройте крышку камеры.
3. Включите тумблер «Сеть». Переведите ГНВ1 в режим «Автомат».
4. Измерьте напряжение пробоя.
5. Повторите п. 4 три раза. Найдите среднее арифметическое значение, которое принимается за пробивное напряжение воздуха при данном расстоянии между электродами.
6. Меняя расстояние между электродами, измерьте пробивное напряжение при расстояниях 0.75, 1, 1.25, 1.5 см.

Результаты исследований свести в таблицу, построить график зависимости $U_{пр}=f(h)$. Определить электрическую прочность воздуха.

2.4.3. Задание № 3

Провести исследования задания №2 для электродов игла-плоскость и шар-шар.

2.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позво-

ляет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Объясните устройство лабораторной установки и методику измерений пробивных напряжений и электрической прочности воздуха.
2. Проанализируйте зависимость $U_{пр}=f(h)$ для разных электродов.
3. Объясните разницу в электрической прочности воздуха при разных конфигурациях электродов и электрических полей.
4. В чём практическая значимость исследования электрической прочности диэлектриков?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

3.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

3.1.1. Цель работы

Исследование зависимости диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в твердых диэлектриках от температуры.

3.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является исследование температурной зависимости электроёмкости и тангенса угла потерь плоского конденсатора, в качестве диэлектрика которого выступает исследуемый материал. Измерения производятся с помощью прибора ЛСМ1. В состав этого прибора входит термостатированная печь, в которую может быть помещена измерительная камера ИК1-3 с исследуемым образцом. В камере установлен один плоский конденсатор с одним из следующих диэлектриков: стеклотекстолит, текстолит, гетинакс.

По произведённым измерениям, зная геометрические размеры электродов можно произвести расчёт диэлектрической проницаемости материала.

Работа может быть выполнена как в ручном варианте, так и с применением ПК.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

3.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

3.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

3.2.1. Задание № 1

Изучить диэлектрическую проницаемость и поляризацию диэлектриков.

3.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 8 – 16.

Характерным для любого диэлектрика процессом, возникающим при воздействии на него электрического напряжения, является поляризация – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

О явлениях, обусловленных поляризацией диэлектриков, можно судить по значению диэлектрической проницаемости, а также по величине диэлектрических потерь, если поляризация диэлектрика сопровождается рассеянием энергии.

Относительная диэлектрическая проницаемость представляет собой отношение заряда Q , полученного при некотором напряжении на конденсаторе, изготовленном из данного диэлектрика, к заряду Q_0 , который можно было бы получить на конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0} = 1 + \frac{\Delta Q}{Q_0} \quad (16)$$

Величина относительной диэлектрической проницаемости является безразмерной величиной.

Рассматривая явления поляризации с учетом агрегатного состояния и структуры диэлектрика, следует различать два основных вида поляризации.

К первому виду относится поляризация, протекающая в диэлектрике под воздействием электрического поля практически мгновенно, вполне упруго, без рассеяния энергии. К этому виду относятся электронная и ионная поляризации.

Поляризация второго вида нарастает и убывает замедленно и сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. нагревом. Поляризация такого вида называется релаксационной. К этому виду относятся дипольно-

релаксационная, ионно-релаксационная и электроннорелаксационная, а также миграционная поляризация, возникающая в твердых диэлектриках неоднородной структуры.

3.2.2. Задание № 2

Ознакомиться с диэлектрическими потерями в диэлектриках.

3.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 23 – 28.

В диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, происходит некоторое выделение энергии. Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

При изучении поведения диэлектрика с потерями в переменном поле воспользуемся эквивалентной параллельной схемой замещения реального диэлектрика (рис. 10, а).

Построим векторную диаграмму токов и напряжений в конденсаторе, включенном под переменное напряжение. Воспользуемся при этом параллельной схемой замещения (рис. 10, б).

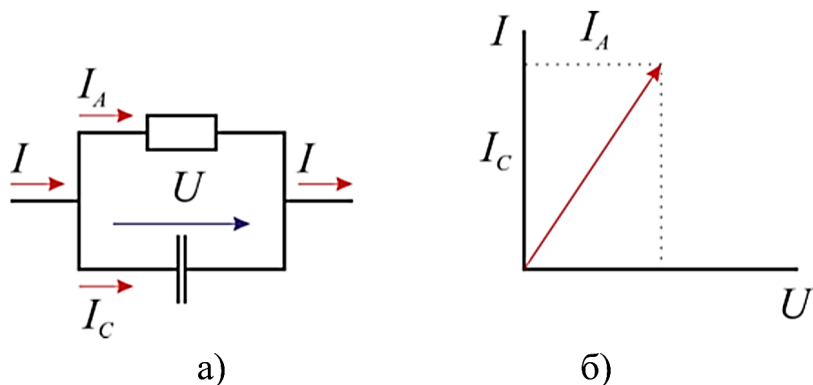


Рис. 10. Схема замещения диэлектрика: а) – параллельная схемой замещения реального диэлектрика; б) – векторная диаграмма токов и напряжений в конденсаторе

Если бы в диэлектрике конденсатора мощность совсем не рассеивалась («идеальный диэлектрик»), то вектор тока I опережал бы вектор напряжения U точно на 90° , а ток был бы чисто реактивным I_C . Но в реальном диэлектрике наряду с реактивным током имеет место ток активный (ток потерь). Таким образом, полный ток, складывающийся из двух токов (активного и реактивного), опережает напряжение на угол φ , несколько меньший 90° , т.е. величина угла φ связана с величиной активного тока (тока потерь). Чем больше I_a , тем сильнее

угол φ отклоняется от 90° . Но в качестве характеристики потерь взят не сам угол φ , а угол δ , дополняющий угол φ до 90° , т.е. $\delta = 90 - \varphi$.

Угол δ называют *углом диэлектрических потерь*. Чем больше этот угол, тем больше (при прочих равных условиях) диэлектрические потери.

Обычно в качестве параметра материала дают *величину тангенса угла потерь*. Очевидно, что тангенс угла потерь равен отношению активного и реактивного токов:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_A}{I_C} \quad (17)$$

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе делятся на четыре основных вида.

1. Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией.
2. Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводимостью.
3. Ионизационные диэлектрические потери.
4. Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Величина тангенса угла диэлектрических потерь может быть вычислена по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1.8 \cdot 10^{12}}{\varepsilon f \rho} \quad (18)$$

где f – частота приложенного напряжения, Гц;

ρ_v – удельное сопротивление диэлектрика.

3.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Что называют поляризацией? Какие виды поляризации считают мгновенными и какие замедленными и в чем их различие?
2. Какие виды поляризации наблюдаются в неполярных и полярных органических диэлектриках и в диэлектриках ионной структуры?
3. Что характеризует относительная диэлектрическая проницаемость диэлектриков и как она изменяется от температуры и частоты?
4. Что называют диэлектрическими потерями, и какие существуют механизмы диэлектрических потерь?
5. Чем характеризуют способность диэлектриков рассеивать энергию в электрическом поле? Какой угол называют углом диэлектрических потерь?

6. Каков характер изменения $\operatorname{tg}\delta$ в зависимости от частоты при наличии релаксационных потерь в диэлектриках?
7. Какие значения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ должны иметь диэлектрики, применяемые в области высоких и сверхвысоких частот?

3.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

При выполнении работы используются приборы и оборудование лабораторного комплекса МУК-РМ1:

- Измеритель ёмкости и индуктивности ЛСМ1;
- Измерительная камера ИК1-3 с исследуемыми диэлектрическими материалами: гетинаксом, текстолитом, стеклотекстолитом марки СТ4.

3.4.1. Задание № 1

Изучить порядок работы с приборами и подготовить их к работе.



Рис. 11. Измеритель индуктивности и емкости ЛСМ1

В настоящей работе используется измеритель индуктивности и емкости ЛСМ1 (рис. 11). С его помощью можно определить емкость конденсатора, индуктивность катушек, а также тангенс угла потерь.

Для включения прибора необходимо нажать кнопку 12 “Сеть” (рис. 12), при этом загорится индикатор результата измерения 1, индикатор выбора температуры 4, индикаторы 8, 9, 10.

Исследуемые образцы находятся в измерительной кассете ИК1. Толщина образцов в камере ИК1-3: гетинакс – 2 мм; текстолит – 2 мм; стеклотекстолит СТ4 – 4 мм; размеры электродов – 60×60 мм. Для ее установки в прибор необходимо поднять шторку 11, установить кассету с образцами в термокамеру прибора до упора. При этом шторка должна опуститься.

Установите кнопкой 14 требуемый режим измерения (емкость или тангенс угла потерь). Кнопками 2 установите требуемый диапазон.

Кнопкой 13 установите требуемый канал для измерения.

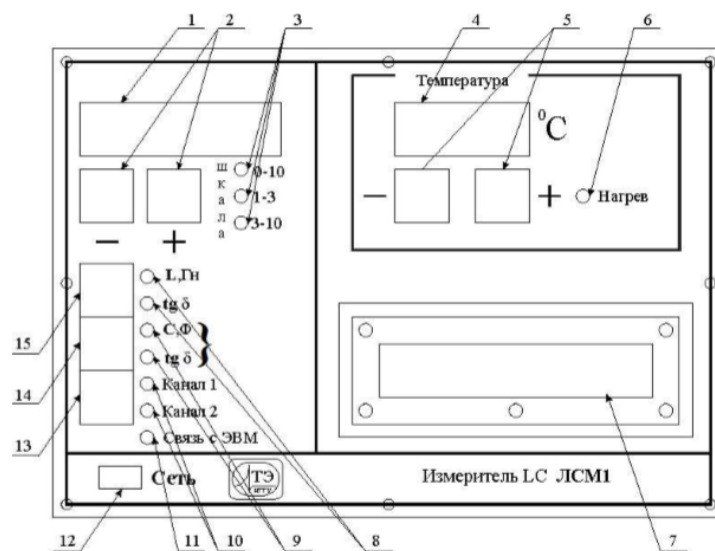


Рис. 12. Панель ЛСМ1: 1 – индикатор результата измерения; 2 – кнопки выбора поддиапазона емкости; 3 – индикатор шкалы; 4 – индикатор температуры; 5 – кнопки выбора температуры; 6 – индикатор нагрева; 7 – термокамера; 8 – индикаторы режима измерения измерения емкости; 9 – индикаторы режима измерения; 10 – индикатор выбора канала; 11 – индикатор связи с ЭВМ; 12 – кнопка выключателя «Сеть»; 13 – кнопка переключения канала; 14 – кнопка переключения режима индуктивности; 15 – кнопка переключения режима емкости

Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10.

С помощью кнопок 5 устанавливается требуемое значение температуры термокамеры. При первом нажатии кнопки на индикаторе 4 высветится установленное значение температуры. При повторном нажатии кнопки произойдет коррекция устанавливаемой температуры. Через 2 с после завершения установки индикатор 4 перейдет в режим отображения текущей температуры. Для отключения терморегулятора необходимо установить температуру менее 30 °С. При этом на экране высветится сообщение.

При работе прибора на индикаторе 1 могут отображаться следующие сообщения:

L – измеряемая величина *C* ниже выбранного диапазона;

H – измеряемая величина *C* выше выбранного диапазона;

P – измеряемое значение тангенса потерь *C* выше выбранного диапазона;

A – при измерении активная составляющая больше реактивной ($\operatorname{tg} \delta > 1$).

Зная величину емкости конденсатора, его геометрическую форму и размеры, можно вычислить величину диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора.

$$\varepsilon = \frac{Ch}{\varepsilon_0 S} \quad (19)$$

3.4.2. Задание № 2

Установите картридж в прибор. Включите кнопку 7 “Сеть” (рис. 12). При комнатной температуре измерьте C и $tg\delta$ диэлектрика на фиксированной частоте при комнатной температуре. Для этого кнопкой 9 установите требуемый I канал для измерения. Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10. Кнопками 2 установите требуемый диапазон измерения C и $tg\delta$. По полученным результатам измерения рассчитать значение ε .

3.4.3. Задание № 3

Провести измерение температурной зависимости ε . С помощью кнопок 5 установите требуемое значение температуры термокамеры. Измерения C и $tg\delta$ 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 ε . 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.*

3.4.4. Задание № 4

Постройте график зависимости $\varepsilon=f(T)$. Для тангенса потерь построить зависимость $\ln(tg\delta)=f(1/T)$, выполнив линейную аппроксимацию экспериментальных точек, и определить эффективную энергию активации носителей заряда.

3.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Расскажите о лабораторной установке для измерения C и $tg\delta$ диэлектриков и методике эксперимента.
2. Как определяется ε исследуемых образцов?
3. Проанализируйте температурные зависимости ε и $\ln(tg\delta)$. Как определяется энергия активации носителей заряда?
4. Сравните диэлектрические свойства исследуемых образцов.
5. Укажите области применения листовых слоистых пластиков в радиоэлектронике.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21 ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

4.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

4.1.1. Цель работы

Изучение основных электрических свойств сегнетоэлектриков и их зависимости от напряженности электрического поля.

4.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является изучение электрофизических свойств сегнетоэлектриков: исследование петли гистерезиса и определение её основных параметров, построение основной кулон-вольтной кривой сегнето-конденсатора, определение эффективных ёмкости и диэлектрической проводимости, определение температуры Кюри сегнетоэлектрика.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

4.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

4.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.2.1. Задание № 1

Изучить структуру и основные электрофизические свойства сегнетоэлектриков. В заготовку отчёта занести основные определения, доменную структуру, типичную температурную зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика и определение температуры Кюри. Привести типичные зависимости поляризации от напряжённости электрического поля – петли гистерезиса и их основные параметры.

4.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 141 – 143.

Сегнетоэлектрики – диэлектрики, состоящие из областей-доменов с самопроизвольной (спонтанной) поляризацией. Направление и значение вектора

спонтанной поляризации доменов может быть изменено внешним электрическим полем.

Сегнетоэлектрические домены представляют собой совокупность элементарных кристаллических ячеек, имеющих одинаковое направление вектора спонтанной поляризации, т.е. домены обладают макроскопической электрической поляризацией $P_{СП}$ в отсутствие внешнего электрического поля. Отдельные домены имеют различные направления электрических моментов, и в целом кристалл не создает вокруг себя электрического поля (рис. 13, а).

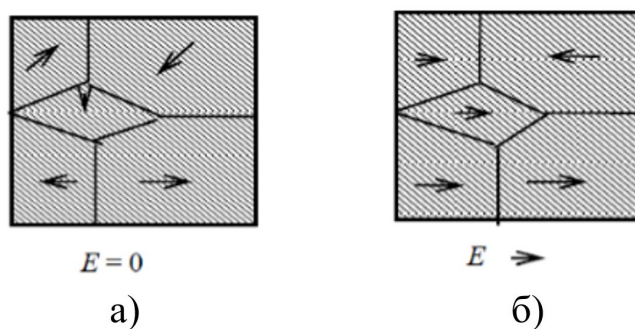


Рис. 13. Направление электрических моментов доменов кристалла

Спонтанная поляризация $P_{СП}$ существует только в определенном температурном интервале, когда сегнетоэлектрик имеет доменную структуру.

При температуре фазового перехода, называемой температурой Кюри, происходит изменение структуры кристалла, сопровождаемое возникновением (исчезновением) спонтанной поляризации. При $t^\circ > t^\circ_{Кюри}$ исчезает электрическая асимметрия элементарной ячейки, пропадает дипольный момент и домены распадаются. В области фазового перехода резко меняются и имеют аномалии почти все свойства кристалла: электрические, оптические, механические и др.

При воздействии внешнего электрического поля электрические моменты доменов ориентируются вдоль поля, создавая наряду с электронной и ионной поляризацией еще один вид – доменную поляризацию (рис. 13, б). Эта поляризация преобладает над другими механизмами. При $t^\circ > t^\circ_{Кюри}$ домены исчезают и в сегнетоэлектрике наблюдаются только ионная и электронная поляризации. Закон, описывающий поведение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры в области $t^\circ > t^\circ_{Кюри}$, называется законом Кюри-Вейсса и имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{C}{(T - T_{Кюри})} \quad (20)$$

где C – постоянная Кюри, характеризующая материал

T – температура в К,

$T_{Кюри}$ – температура Кюри, также измеренная в К.

Считается, что температура фазового перехода соответствует максимуму диэлектрической проницаемости. На рис. 14 представлен график зависимости ε

$\epsilon=f(t)$ для наиболее распространенного сегнетоэлектрика ионного типа (титанат бария BaTiO_3).

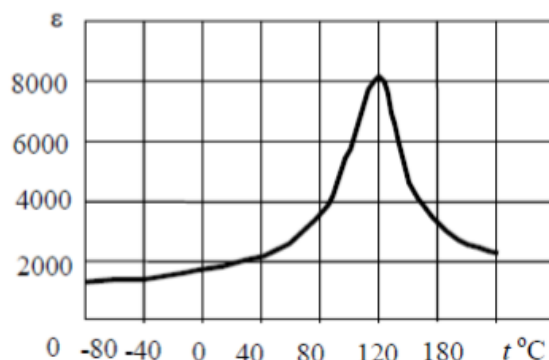


Рис. 14. График зависимости $\epsilon=f(t)$ для титаната бария BaTiO_3

Особенности сегнетоэлектриков состоят в следующем:

1. Наличие диэлектрического *гистерезиса* – отставание поляризации от величины приложенного внешнего поля.

При небольших значениях внешнего поля, пока оно не в состоянии переориентировать ни один из доменов, сегнетоэлектрик ведет себя как обычный диэлектрик. Но при некотором значении внешнего поля электрические моменты доменов начинают ориентироваться по полю. По мере увеличения внешнего поля начинается быстрый рост поляризации образца, как за счет движения доменных стенок, так и за счет поворота электрических моментов доменов. При достижении состояния, называемым *насыщением*, вектора поляризации в доменах ориентированы вдоль направления поля. Сегнетоэлектрик становится одномономенным. При дальнейшем увеличении напряженности внешнего поля общая поляризация такого кристалла слабо растет за счет увеличения индуцированной поляризации.

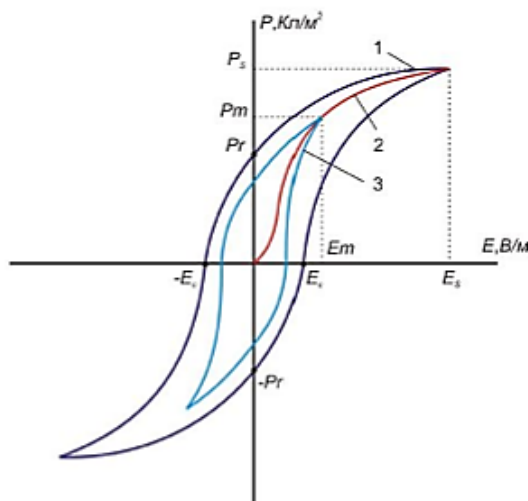


Рис. 15. Петли гистерезиса

При уменьшении электрического поля домены, в отличие от молекул полярного диэлектрика, не смогут до конца вернуться в свое первоначальное со-

стояние, и тем самым обеспечивают остаточную поляризацию. Уменьшение поляризации P при уменьшении внешнего поля пойдёт по кривой 2, отличной от кривой 1 первоначальной поляризации, т.е. поляризация будет убывать более медленно, «запаздывать». Когда поле станет равным нулю, сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризацию P_0 . Теперь для того, чтобы свести поляризацию сегнетоэлектрика к нулю, необходимо приложить поле направленное противоположно первоначальному, это поле будет действовать на домены, заставляя повернуться их в противоположную сторону и тем самым уменьшить общую поляризацию сегнетоэлектрика. Напряженность поля, при которой поляризация сегнетоэлектрика становится опять равной нулю, называется *коэрцитивной напряжённостью* E_c .

Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с металлизированными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение. Часть электрической энергии, которая при переменном напряжении в диэлектрике переходит в тепло, называют диэлектрическими потерями. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, рассеянной за один период.

Изменяя значения подаваемого напряжения, можно получить семейство петель гистерезиса и восстановить кривую первоначальной поляризации. Сняв параметры петли, можно рассчитать такие характеристики сегнетоэлектрика как поляризация насыщения, остаточная поляризация, коэрцитивная сила при определенных значениях внешнего напряжения.

4.2.2. Задание № 2

Изучить различные типы сегнетоэлектриков, указать их области применения в современной радиоэлектронике.

4.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 143 – 146.

В настоящее время известно значительное число сегнетоэлектриков, отличающихся химическим составом, кристаллической структурой и свойствами. По механизму возникновения спонтанной поляризации все сегнетоэлектрики можно разделить на две группы (примеры даны в табл. 2).

Таблица 2

Параметры некоторых сегнетоэлектриков

Кристалл	$t^{\circ}\text{Кюри}$	ε
Дополнительные сегнетоэлектрики $\text{KNa}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot 4\text{H}_{20}$	+24, -18	≈ 9000
$\text{LiNH}_4(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot \text{H}_{20}$	-167	≈ 9000
ионные BaTiO_3	+120	≈ 104
KNBO_3	+435	≈ 104
NaNBO_3	+640	≈ 104

1-я группа – возникновение $P_{СП}$ обусловлено упорядочением определенных элементов структуры (например, водородных связей).

Сюда относятся сегнетова соль и другие дополнительные сегнетоэлектрики.

2-я группа – возникновение $P_{СП}$ связано со смещением некоторых ионов, занимавших в структуре centrosymmetric position при температуре выше Кюри. Сюда относятся титанаты и аналогичные им вещества – это ионные сегнетоэлектрики.

Сегнетоэлектрики используются для изготовления нелинейных конденсаторов (сегнетокерамика типа ВК-1, ВК-2, ВК-3, ВК-4). Такие конденсаторы-вариконды применяются в различных схемах, где нужна нелинейность: для умножения и деления частоты; для детектирования сигналов; для создания частоты модуляции в схемах реле времени; в ячейках памяти; для создания диэлектрических усилителей и других устройств. В качестве материалов для варикондов чаще всего выступают твердые растворы систем $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$, $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Sn})\text{O}_3$.

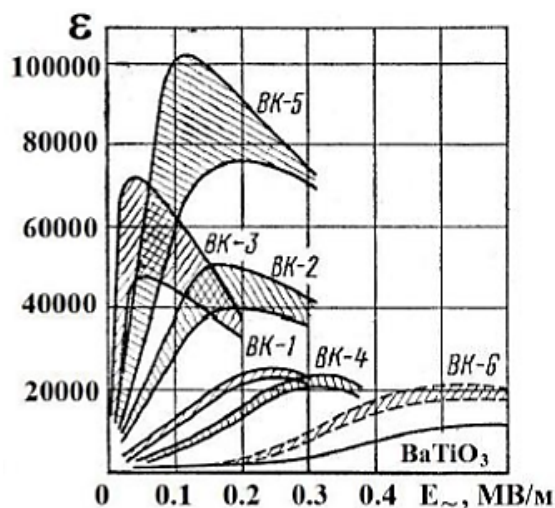


Рис. 16. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для систем $\text{BaTiO}_3 - \text{BaZrO}_3$ с разным содержанием компонентов в растворе

На рис. 16 показана зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для одной из таких систем $\text{BaTiO}_3 - \text{BaZrO}_3$ с разным содержанием компонентов в растворе.

4.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие диэлектрики называют активными и почему?
2. Какие диэлектрики называют сегнетоэлектриками? Как изменяется диэлектрическая проницаемость в сегнетоэлектриках от температуры и напряженности электрического поля?

3. Приведите классификацию сегнетоэлектриков по химическому составу.
4. Как определяется точка Кюри?
5. Приведите петлю гистерезиса диэлектрика, расскажите об её основных параметрах.

4.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Работа выполняется на приборах и оборудовании учебного лабораторного комплекса МУК-РМ1. Потребуется характериометр ИСХ1 и измерительный стенд СЗ-РМ02.

4.4.1. Задание № 1

Изучить порядок работы с приборами и подготовить их к работе.

Свойства сегнетоэлектриков исследуются с помощью характериометра ИСХ1 (рис. 17, а), работающего совместно со стендом СЗ-РМ02 (рис. 17, б).

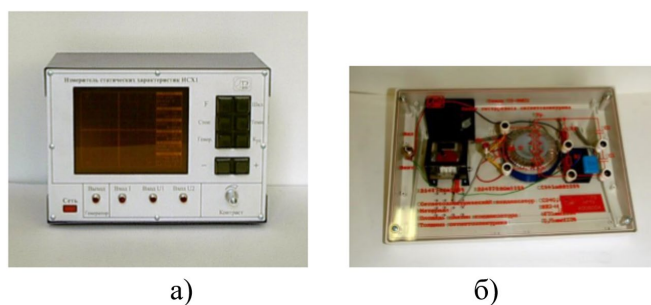


Рис. 17. Характериометр ИСХ1 и стенд СЗ-РМ02

Стенд содержит термокамеру с исследуемым сегнетоэлектрическим конденсатором, повышающий трансформатор, резистивный делитель и конденсатор с полипропиленовым изолятором (рис. 18).

Экран дисплея, разделенный на два поля, показан на рис. 20:

- поле отображения сигнала;
- информационное поле.

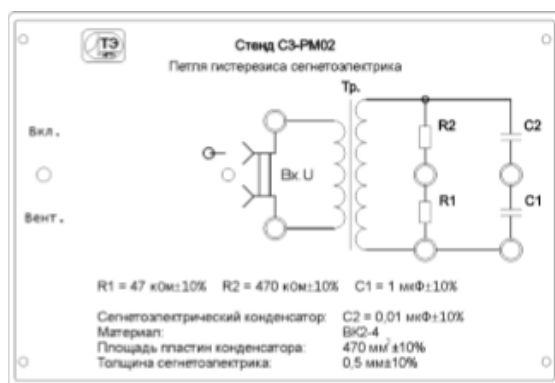


Рис. 18. Электрическая схема стенда СЗ-РМ02

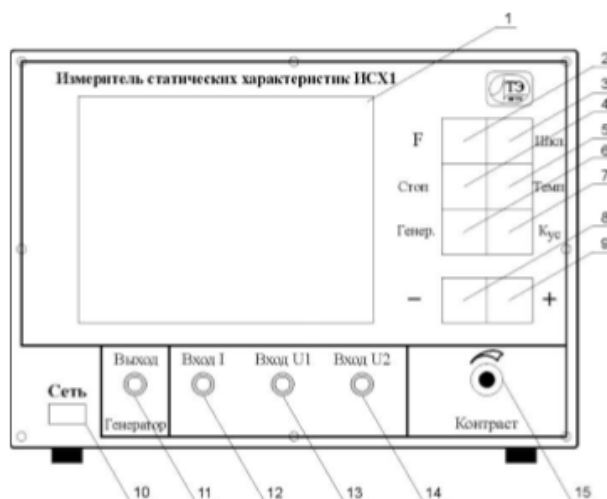


Рис. 19. Панель характериометра ИСХ1: 1 – графический дисплей; 2 – кнопка выбора режима работы «F»; 3 – кнопка выбора шкалы «Шкл.»; 4 – кнопка запоминания оцифрованного сигнала «Стоп»; 5 – кнопка выбора температурного режима «Темп»; 6 – кнопка управления генератором «Генер.»; 7 – кнопка выбора коэффициента отклонения «Кус»; 8 – кнопка уменьшения выбранной величины «-»; 9 – кнопка увеличения выбранной величины «+»; 10 – кнопка выключателя «Сеть»; 11 – выход генератора; 12 – вход тока I; 13 – вход напряжения U1; 14 – вход напряжения U2; 15 – ручка регулировки контраста изображения «Контраст»

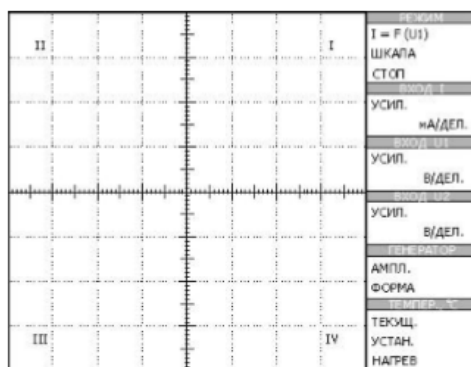


Рис. 20. Экран дисплея ИСХ1

Поле отображения сигнала содержит координатную сетку, на которую накладывается измеряемый сигнал.

Информационное поле разделено на 4 области:

- область общих установок: отображает режим работы прибора (строка «Режим»), шкалу развертки (строка «Шкала») и состояние стоп-кадр (строка «Стоп»);
- область состояния входа I, входа U1 и входа U2: отображает коэффициенты отклонения каналов;

- область состояния генератора: отображает амплитуду выходного сигнала генератора (строка «Ампл.») и форму выходного сигнала генератора (строка «Форма»);
- область состояния терморегулятора: отображает текущую температуру образцов (строка «Текущ.»), требуемую температуру образцов (строка «Устан.») и индицирует работу нагревательного элемента (строка «Нагрев»).

Порядок работы с прибором:

1. Для включения прибора нажмите кнопку «Сеть» 10, при этом загорится индикатор 1. Прогрейте прибор 5 мин.
2. Регулировка контраста изображения проводится вращением ручки 15 «КОНТРАСТ».
3. Соберите электрическую схему.
4. Для переключения режима работы нажмите кнопку 2 «F». При этом должен подсветиться текущий режим работы. Затем кнопками «+» или «-» выберите необходимый режим:
 - $I=F(U1)$ (вольт-амперная характеристика);
 - $U2=F(U1)$ (статическая характеристика);
 - $U2=F(I)$ (передаточная характеристика).
5. Установите требуемый сигнал на выходе генератора. Для этого однократным нажатием кнопки «Генер.» подсветите строку «ФОРМА» и кнопками «+» и «-» выберите необходимую форму сигнала (синусоидальная, треугольная). В работе используется синусоидальная форма сигнала. Повторным нажатием кнопки «Генер.» подсветите строку «АМПЛ.» и кнопками «+» и «-» установите необходимую амплитуду выходного сигнала (в вольтах).
6. Для изменения коэффициента отклонения нажмите кнопку 6 «Кус». При этом подсветится надпись «УСИЛ.» того канала, который соответствует выбранному режиму работы. Если режим работы предполагает совместное использование двух каналов, то переход между выбором коэффициентов отклонения каналов осуществляется повторным нажатием кнопки 6 «Кус». Установить необходимое значение коэффициента отклонения для выбранного канала можно при помощи кнопок «+» или «-».
7. Для включения режима «Стоп-кадр» необходимо нажать кнопку 4 «СТОП». При этом кадр будет остановлен для проведения измерений. Для выхода из этого режима необходимо нажать кнопку «СТОП» повторно.
8. Установка требуемой температуры (по умолчанию образцы имеют температуру окружающей среды) осуществляется нажатием кнопки «ТЕМП» и последующим выбором кнопками «+» и «-» температуры, до которой необходимо нагреть образцы. В строке «УСТАН.» отображается заданная температура, а в строке «ТЕКУЩ.» ее текущее значение.

ние. Для регулировки температуры сегнетоэлектрика стенд снабжен вентилятором.

После включения установки ИСХ1, используя соединительные провода, необходимо подключить стенд СЗ-РМ02 к измерительным клеммам прибора. Для этого сигнал с генератора подается на первичную обмотку повышающего трансформатора, а выходной сигнал U_2 снимается с эталонного конденсатора $C1$, так как напряжение на нем пропорционально его заряду (и заряду на конденсаторе $C2$, так как при последовательном включении конденсаторов их заряды равны). При этом на горизонтальный вход осциллографа подается напряжение с резистора $R1$, которое связано с общим падением напряжения во второй обмотке U следующим образом: $U = U_1(1 + R_2 / R_1)$. Таким образом, по горизонтальной оси осциллограммы откладывается значение напряжения, а по вертикальной – значения заряда.

Масштабный коэффициент для горизонтальной оси вычисляется (оси напряжений) по формуле:

$$M_U = K_{U1} \frac{R_2}{R_1} \quad (21)$$

где K_{U1} – показания коэффициента усиления сигнала по входу $U1$ (В/дел);

Масштабный коэффициент для горизонтальной оси вычисляется (оси зарядов) по формуле:

$$m_q = K_{U2} \cdot C1 \quad (22)$$

где K_{U2} – показания коэффициента усиления сигнала по входу $U2$ (В/дел).

4.4.2. Задание № 2

Определить основные параметры петли гистерезиса.

Определение основных параметров петли гистерезиса проводится при максимальном ее (предельном) размере. Для получения максимального размаха петли необходимо установить максимальное значение напряжения $U_{ген} = 10$ В. После этого определить максимальный заряд q_{max} , остаточный заряд q_r и коэрцитивную силу U_c (см. рис. 15). Данные занести в таблицу.

4.4.3. Задание № 3

Построить основную кулон-вольтную кривую сегнетоконденсатора.

При помощи генератора сигнала постепенно увеличивают напряжение $U_{ген}$ от нуля до 10 В ступенями 1 В. На экране характериографа получают все увеличивающиеся петли гистерезиса. При этом каждый раз фиксируется координаты положительной вершины петли, т.е. координаты амплитудных значений заряда q_m и напряжения U_m . Кривая, соединяющая вершины петель, есть основ-

ная кулон-вольтная кривая (рис. 15, начальная кривая 2). Для ее построения удобно использовать режим «СТОП-кадр».

Замечание. Для более точного определения координат вершин при малых значениях $U_{ген}$, изменяйте коэффициенты усиления по осям K_{U1} , K_{U2} , чтобы размер кривой был больше 5 мм x 5 мм.

4.4.4. Задание № 4

Определить эффективную емкость и эффективную диэлектрическую проницаемость

Эффективная емкость – емкость при переменном напряжении. Это емкость такого линейного конденсатора, заряд которого при амплитудном напряжении равен заряду нелинейного конденсатора при том же напряжении. Эффективная емкость равна отношению максимального заряда на обкладках конденсатора к амплитуде приложенного напряжения:

$$C_{эф} = \frac{q_m}{U_m} \quad (23)$$

Поскольку основная кулон-вольтная кривая представляет собой зависимость, в любой точке прямо пропорциональна отношению Y/X в этой точке. По построенной кулон-вольтной кривой вычисляют величины эффективной емкости для различных напряжений (через 1 В):

$$C_{эф} = \frac{m_q}{M_u} \cdot \frac{Y}{X} \quad (24)$$

По полученным данным построить график зависимости $C_{эф}=f(U_m)$.

Значение эффективной диэлектрической проницаемости находят по формуле плоского конденсатора:

$$\varepsilon_{эф} = \frac{C_{эф} h}{\varepsilon_0 S} \quad (25)$$

где h – толщина конденсатора;

S – площадь конденсатора.

Напряженность электрического поля в образце вычисляется по формуле

$$E = \frac{U_m}{h} \quad (26)$$

По полученным данным построить график зависимости $\varepsilon_{эф}=f(E)$.

4.4.5. Задание № 5

Определить температуру Кюри. Для определения температуры Кюри установите напряжение генератора 10 В. Определите X и Y -координаты положительной вершины предельной петли гистерезиса. Установите последовательно следующий температурный ряд: 30, 40, 60, 65, 70, 75 °С. *Интервал между измерениями 3 мин.* Для каждой температуры фиксируйте Y -координату вершины петли гистерезиса. По результатам измерений постройте зависимость $\varepsilon_{эф}(T)$ и определите из графика температуру Кюри, как точку максимальной величины диэлектрической проницаемости.

4.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

4.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Расскажите о порядке работы с прибором ИСХ-1 и стендом СЗ-РМО2.
2. Как определяются основные параметры петли гистерезиса?
3. Расскажите о порядке построения основной кулон-вольтной кривой сегнетоэлектрика.
4. Как определить эффективные ёмкость и диэлектрическую проницаемость?
5. Как определяется температура Кюри?
6. Приведите примеры практического использования сегнетоэлектрических материалов в устройствах РЭС. На каких свойствах материалов основано их применение?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернышов А.В. Радиоматериалы. Ч.1: Органические и неорганические диэлектрические материалы: учеб. пособие/А.В. Чернышов. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 185 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 . ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ	
ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	3
1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	3
1.1.1. Цель работы	3
1.1.2. Содержание работы	3
1.1.3. Указания по технике безопасности	3
1.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	
ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	3
1.2.1. Задание № 1	3
1.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	4
1.2.2. Задание № 2	7
1.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	7
1.2.3. Задание № 3	8
1.2.3.1. Методические указания по выполнению задания	8
1.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	8
1.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	
ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	9
1.4.1. Задание № 1	9
1.4.2. Задание № 2	11
1.4.3. Задание № 3	12
1.4.4. Задание № 4	12
1.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	12
1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	13
2.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ.....	13
2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	13
2.1.1. Цель работы	13
2.1.2. Содержание работы	13
2.1.3. Указания по технике безопасности	13
2.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	
ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	14

2.2.1. Задание № 1	14
2.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	14
2.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	17
2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	17
2.4.1. Задание № 1	18
2.4.2. Задание № 2	18
2.4.3. Задание № 3	18
2.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	18
2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ.....	19
3.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ.....	19
3.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	19
3.1.1. Цель работы	19
3.1.2. Содержание работы	19
3.1.3. Указания по технике безопасности	20
3.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	20
3.2.1. Задание № 1	20
3.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	20
3.2.2. Задание № 2	21
3.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	21
3.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	22
3.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	23
3.4.1. Задание № 1	23
3.4.2. Задание № 2	25
3.4.3. Задание № 3	25
3.4.4. Задание № 4	25
3.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	25
3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	25

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21	
ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ.....	26
4.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	26
4.1.1. Цель работы	26
4.1.2. Содержание работы	26
4.1.3. Указания по технике безопасности	26
4.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	26
4.2.1. Задание № 1	26
4.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	26
4.2.2. Задание № 2	29
4.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	29
4.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	30
4.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	31
4.4.1. Задание № 1	31
4.4.2. Задание № 2	34
4.4.3. Задание № 3	34
4.4.4. Задание № 4	35
4.4.5. Задание № 5	36
4.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	36
4.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	37

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 18-21
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Составитель

Бадаев Андрей Станиславович

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 29.05.2024.

Уч.-изд. л. 2,1.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет» 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84