

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

**Методические указания к  
лабораторным работам**

**Казань 2017**

УДК 620.2.  
ББК 30.3  
С40

*Рецензенты:*

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой  
Физики КГЭУ *В.Л. Матухин*;  
доктор технических наук, профессор кафедры Технологии пластических  
масс КНИТУ *А.Е. Заикин*

**С40      Электротехнические материалы**

Методические указания к лабораторным / Сост.: О.С. Сироткин, А.Е. Сухарников, А.Е. Бунтин, А.М. Павлова, Лазарева А.В., Р.О. Сироткин – Казань: Казан. гос.энерг. ун-т, 2017. – 101 с.

В методических указаниях изложены 9 лабораторных работ по электротехническому материаловедению, посвященных исследованию свойств диэлектриков, сегнетоэлектриков, полупроводников, проводников и магнитных материалов.

Методические указания предваряется инновационными аспектами материаловедения, раскрывающими влияние специфики природы и тонкой химической структуры различных материалов на их естественное разделение на диэлектрики, полупроводники и проводники.

УДК 620.2.  
ББК 30.3

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехнические материалы (ЭТМ) используются в качестве изделий, эксплуатируемых в качестве элементов для создания конструкций в виде электронных схем, осуществляющих прохождение электрического тока, его изоляцию, генерацию, усиление, выпрямление и т.д. Этими элементами, в виде соответствующих изделий, являются электропровода, кабели, волноводы, изоляторы, резисторы, магниты, трансформаторы, генераторы, диоды, транзисторы, термисторы, лазеры, запоминающие устройства ЭВМ и т.д. Получение конкретного изделия с необходимыми эксплуатационными характеристиками возможно только из ЭТМ с комплексом соответствующих физико-химических свойств. А эти свойства являются функцией строения конкретного материала. Причем именно тонкая химическая микроструктура материала и является исходной для последующих мезо- и макроуровней и определяющей формирование ряда базисных инноваций современного материаловедения.

Традиционно по поведению в электрическом поле ЭТМ делятся на три основных класса: диэлектрические, полупроводниковые и проводниковые. Их значения удельного сопротивления (и ширины запрещенной зоны, эВ) находятся соответственно в пределах  $10^{-8}$ -  $10^{-5}$  (0-0,05),  $10^{-6}$ - $10^8$  (0,05-3) и  $10^7$ - $10^{17}$  (более 3) Ом·м и определяются химической природой веществ [1], оцениваемой через соотношение компонент химической связи элементов (табл. 1) в рамках многоуровневой организации структуры материала (табл. 2).

Таблица 1

Удельное электрическое сопротивление различных материалов при 20°С и постоянном напряжении [1]

Класс материала	$C_K/C_M$ , %	Ширина ЗЗ, эВ	$\rho_0$ , Ом·м	Тип проводимости
Проводники	$C_K < C_M$	0	$10^{-8} - 10^{-5}$	Электронный
Полупроводники	$C_K \approx$ или $> C_M$	0,05-3,00	$10^{-5} - 10^8$	Электронный и дырочный
Диэлектрики	$C_K > C_M$	Более 3	$10^8 - 10^{18}$	Ионный, электронный и др.

А по поведению в магнитном поле электротехнические материалы делятся на два класса: магнитные (сильномагнитные) и немагнитные (слабوماгнитные). Обычно для объяснения электропроводящих свойств используется зонная теория твердого тела, хотя она сегодня логично дополняется универсальной моделью химической связи элементов тонкой структуры материалов и единой теорией строения химических соединений, веществ, металлов и неметаллов. Поэтому сегодня особое значение приобретают попытки более строгой системной научной классификации материалов (рис. 1), включая и ЭТМ. Ведь особенности их свойств определяются спецификой их природы и структурных особенностей (состав, тип связи элементов и строение в целом), которые реально и определяют их свойства. Поэтому классификация материалов по их структуре, является более фундаментальной и важной в научно-педагогическом плане, чем их разделение по свойствам, областям и т.д. Ведь именно специфика структуры материалов и определяет не только их разделение на металлы и неметаллы, но и различные классы электротехнических материалов.

Современная классификация уровней структурной организации материалов предполагает наличие в них нескольких уровней (табл. 2). Общая характеристика уровней структурной организации (строения) металлических и неметаллических полимерных материалов: *микроструктура*: тонкая (электронно-ядерная и молекулярная) и нано-, *мезо-* и *макроструктура*. Отметим единство их базовой (электронно-ядерной) химической структуры. Проведена основная градация типов связывания элементов структуры различных материалов (химические, физические, механические и смешанные) на разных уровнях их организации.

Основой для лабораторных работ, проводимых на каф. МВТМ КГЭУ и изложенных в данном объединенном практикуме, являются два лабораторных практикума «Электротехнические материалы» (В.И. Уваров, Э.В. Сахабиева. Казань: КГЭУ, 2005 г.) и (О.С. Сироткин, А. Е. Сухарников, П.Б. Шибяев, А.М. Трубачева, И.А. Женжурист, Д.Ю. Павлов, А.Е. Бунтин, А.В. Рязанова. – Казань: КГЭУ, 2009 г.).

Целью издания является обеспечение лабораторных работ методическими материалами и формирование у студентов знаний в области электротехнических материалов.

Задачи:

- установление причинно-следственной связи между химическим составом, строением и свойствами электротехнических материалов - проводников, полупроводников, диэлектриков и магнитных материалов;
- установление физико-химических закономерностей изменения

строения и свойств электротехнических материалов под действием физических, химических, биологических и других факторов;

– формирование знаний о конкретных видах проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалах, их свойствах и областях применения как компонентов электроэнергетического и электротехнического оборудования.

– приобретение студентами практических навыков по определению электрических и магнитных свойств электротехнических материалов.

Формируемые компетенции *ОПК-2* – способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач.

*Знать:*

– физико-химические основы строения электротехнических материалов, электрические и магнитные свойства электротехнических материалов и методы их определения ( $Z_1$ ),

– физико-химические закономерности изменения строения и свойств электротехнических материалов под действием физических, химических, биологических и других факторов ( $Z_2$ ).

*Уметь:*

– осуществлять рациональный выбор электротехнических материалов для изготовления электроэнергетического и электротехнического оборудования, исходя из заданных условий эксплуатации и с учетом требований технологичности, экономичности, экологической безопасности, надежности и долговечности изделий ( $Y_1$ );

– проводить испытания по определению электромагнитных свойств материалов, используемых в электротехнике и электроэнергетике ( $Y_2$ );

*Владеть:*

– навыками работы со справочной литературой и базами данных при выборе электротехнических материалов ( $B_1$ );

– методиками выполнения расчетов применительно к использованию электротехнических материалов в простых конструкциях электротехнического и электроэнергетического оборудования ( $B_2$ );

– техническими средствами определения параметров электротехнических материалов и конструкций ( $B_3$ ).

Базисные инновации современного материаловедения, как единой науки о металлических и неметаллических материалах:

1. Система базовых (основных и производных) понятий; 2. Унифицированная классификация основных уровней структуры; 3. Единая универсальная модель тонкой химической структуры; 4. Система химических связей и соединений (СХСС), объединяющая «чистые» металлы и неметаллы и раскрывающая общий характер влияния исходной тонкой химической микроструктуры на последующие уровни их структурной организации и специфику их свойств, включая оценку индивидуального вклада различных уровней в характеристику конкретного свойства



Рис. 1. Инновационная схема современного материаловедения (Сироткин О.С. 2007 г)

Таблица 2.

## Классификация основных уровней структурной организации металлических и полимерных материалов

Уровни структуры и их размерный интервал		Структурные элементы в металлах	Структурные элементы в полимерах
<b>1. Микроструктура:</b>			
т о н к а я	<i>1а) электронно-ядерная;</i> ~1 – 5 Å (1·10 <sup>-10</sup> м)	Атомные остовы и обобществленные электроны, которые осуществляют химическую связь (преимущественно металлическую в металлах и преимущественно ковалентную в полимерах); точечные дефекты: вакансии и т.д. (0,0001-0,0005 мкм)	
	<i>1б) молекулярная;</i> ~5 – 10 Å (0,5-1·10 <sup>-9</sup> м)	<i>Молекулы в металлах отсутствуют,</i> поэтому структурными элементами данного уровня в них могут быть дефекты соответствующих размеров (0,0005-0,001 мкм)	Фрагменты макромолекул (атомные группировки) и единичные межзвенные (ван-дер-ваальсовы (ВДВ) и водородные) связи и низкомолекулярные вещества
	<i>1в) наноструктура;</i> ~10 – 10 000 Å (10 <sup>-9</sup> -10 <sup>-6</sup> м)	Наночастицы (0,001-0,1 мкм) и поверхности раздела; Фрагменты, блоки, полигоны (0,1-1 мкм) и область когерентного рассеивания (0,001-0,01 мкм); Линейные дефекты: дислокации и дисклинации (0,1-1 мкм)	Макро(олиго-)молекулы, внутри- и межмолекулярное ВДВ и водородное взаимодействие; Надмолекулярные соединения: наночастицы и поверхности раздела; кристаллиты, ламели и границы раздела; линейные дефекты
<b>2. Мезоструктура</b> ~10 <sup>4</sup> -10 <sup>7</sup> Å (10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-3</sup> м)		Субзерна (1-100 мкм) и субграницы; Зерна (100-1000 мкм) и границы между ними; Поверхностные дефекты (дислокационные ансамбли)	НМС: небольшие аксиалиты, эдриты и сферолиты диаметром до нескольких десятков мкм; Поверхностные и небольшие объемные дефекты (поры и т.д.)
<b>3. Макроструктура</b> ~10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup> Å (10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-1</sup> м)		Структуры, образованные зернами (волокна, дендриты и т.д.) и поверхность раздела; Крупные объемные дефекты (усадочные раковины, поры, трещины и т.д.)	НМС: крупные надмолекулярные образования в виде крупных аксиалитов, эдритов и сферолитов (от нескольких десятков мкм и выше); Объемные дефекты (трещины и т.д.)

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩИХ И УДЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

#### Цель работы

1. Изучить физические основы электропроводности диэлектриков и методику измерения удельных объемного  $\rho_v$  и поверхностного  $\rho_s$  сопротивлений диэлектриков;
2. Исследовать влияние различных факторов на проводимость диэлектриков.

#### Основные теоретические положения

Через диэлектрик, помещенный в постоянное электрическое поле, протекает электрический ток, ток, который складывается из двух составляющих: *тока поляризации и тока утечки, или тока сквозной проводимости.*

Токи поляризации вызваны упругим смещением связанных зарядов в процессе поляризации. При постоянном напряжении эти токи протекают в короткие промежутки времени в момент включения и выключения напряжения и затем постепенно затухают. У большинства диэлектриков время существования поляризационных токов не превышает долей секунд, но в некоторых случаях достигает десятков секунд и дольше, что наблюдается при замедленных видах поляризации. Токи, связанные с замедленными видами поляризации, называют токами абсорбции. С ними приходится считаться при определении сопротивления диэлектриков.

Токи сквозной проводимости обусловлены наличием в диэлектрике свободных зарядов. Ток сквозной проводимости протекает через диэлектрик все время, пока он находится под напряжением, и по величине этого тока определяется сопротивление диэлектрика.

Для сравнительной оценки различных материалов применительно к цепи постоянного тока используют величину их удельного сопротивления.

Для твердых диэлектриков различают два удельных сопротивления: объемное и поверхностное.

Удельное объемное сопротивление  $\rho_v$  численно равно сопротивлению куба с ребром 1 м, если ток проходит через две противоположные грани этого куба.

В системе СИ  $\rho_v$  выражается в Ом\*м. Удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$  численно равно сопротивлению квадрата по поверхности

диэлектрика со стороной  $1\text{ м}$  и измеряется в Ом.  $\rho_v$  и  $\rho_s$  характеризуют два различных свойства диэлектрика: проводить электрический ток через толщину или по поверхности диэлектрика. Для полной характеристики изоляционного материала нужно знать его объемное и поверхностное сопротивления.

Зная величину приложенного напряжения и величину тока, проходящего через образец, можно найти объемное сопротивление образца диэлектрика,  $R_v$ , Ом:

$$R_v = \frac{U}{I_v}$$

Величина  $R_v$  зависит как от качества диэлектрика, так и от геометрических размеров образца.

$$R_v = \rho_v \frac{d}{S}, \quad \rho_v = R_v \frac{S}{d}$$

где  $d$  – толщина диэлектрика, м,  $S$  – площадь электрода,  $\text{м}^2$ .

При измерении объемного сопротивления весьма существенное значение имеет заземление охранного кольца – электрода Б. При незаземленном кольце на электрод А попадает не только ток, протекающий в объеме диэлектрика через расчетное сечение  $S$ , но и ток  $I_{\text{повр}}$  протекающий по поверхности диэлектрика, а также ток  $I_v^1$ , протекающий по объему диэлектрика, минуя сечение  $S$ .

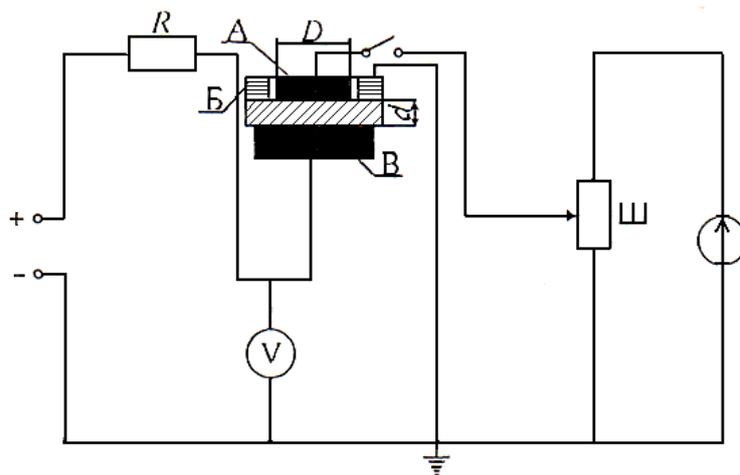


Рис. 1.1. Схема для определения объемного сопротивления

Поверхностный ток вызывается чаще всего свободными ионами тех загрязнений, которые могут быть на поверхности материала. Для измерения поверхностного сопротивления электроды на испытываемом образце должны

быть расположены так, чтобы электрическое поле вызывало движение свободных ионов в тонком поверхностном слое диэлектрика.

Зная диаметр  $D$  электрода  $A$  и внутренний диаметр  $D_1$  кольцевого электропровода  $B$ , можно вычислить величину удельного поверхностного сопротивления по формуле:

$$R_s = \frac{U}{I_s}, p_s = R_s \frac{S}{l}$$

Длина пути утечки тока по поверхности диэлектрика равна ширине зазора между электродами, т.е.

$$l = \frac{D_1 - D}{2}, \quad S = \pi (D_1 + D)/2$$

$$p_s = R_s \pi \frac{D + D_1}{D_1 - D}$$

Так как поверхность загрязнить легче, чем толщину материала, то обычно  $p_s$  численно хотя бы на один порядок ниже, чем  $p_v$  ( $p_v \geq p_s$ ).

Объемное сопротивление диэлектриков  $R_v$  зависит от температуры и величины приложенного напряжения, а для гигроскопичных диэлектриков – и от влажности и времени приложенного напряжения.

С повышением температуры удельное объемное сопротивление твердых и жидких диэлектриков, как правило, снижается. Это объясняется ослаблением межмолекулярных и ионных связей и ростом подвижности молекул, ионов вещества.

В сильных электрических полях с увеличением приложенного напряжения сопротивление диэлектриков уменьшается, что объясняется «вырыванием» электронов силами электрического поля из объема диэлектрика, т.е. образованием свободных зарядов и материала электродов (происходит диффузия электронов электрода в диэлектрик), что и создает в диэлектрике дополнительную электропроводность электронного характера.

Снижение же сопротивления с ростом напряжения в сравнительно слабых полях объясняется образованием в диэлектрике объемных зарядов, перераспределением влаги в порах диэлектрика, влиянием контактов с электродами.

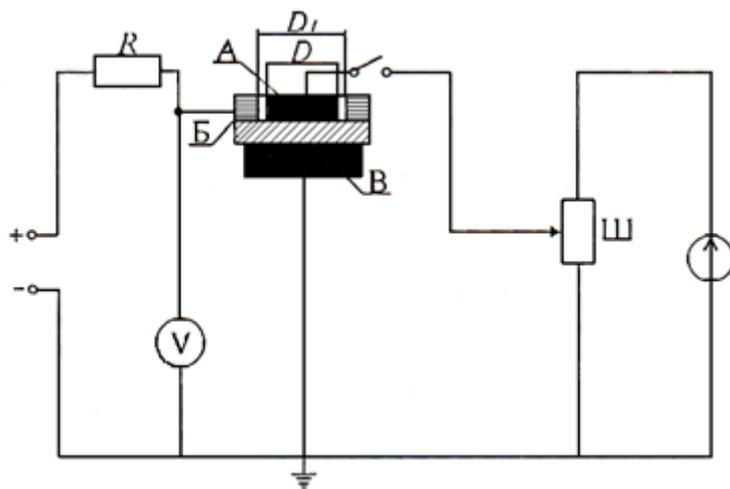


Рис. 1. 2 Схема для определения поверхностного сопротивления

Сопротивление диэлектриков зависит также от времени приложения напряжения. Длительность приложения напряжения влечет за собой снижение величины его сопротивления, что следует объяснить постепенным развитием в его объеме путей наименьшего электрического сопротивления и образования объемных зарядов – происходит старение диэлектрика.

На величину поверхностного сопротивления твердых диэлектриков влияет состояние их поверхности и способность к адсорбированной на ней влаги. Как правило, диэлектрики нейтрального строения (парафины, полистирол и др.) слабо адсорбируют влагу (не смачиваются), в связи, с чем их удельное поверхностное сопротивление численно бывает почти равным удельному объемному сопротивлению. Если поверхность диэлектриков шероховатая, то, в связи с удержанием пыли, осевшей из воздуха, или других случайно попавших частиц, поверхностное сопротивление диэлектриков будет значительно снижена.

В целях увеличения поверхностного сопротивления твердых диэлектриков, особенно при работе на открытом воздухе, их поверхность обычно шлифуется, лакируется, покрывается глазурью и пр.

Сопротивление образца диэлектрика измеряется методом непосредственного отсчета, который к определению тока протекающего через образец, при подведении к нему известного напряжения  $U$ . Ток, протекающий через образец, определяется по формуле:

$$I = \alpha C/n$$

где  $\alpha$  – число деления шкалы гальванометра, на которое отклонился «зайчик» спустя 1 мин после подачи на образец напряжения,  $C$  – динамическая постоянная гальванометра ( $7,2 \cdot 10^{-9}$  А/дел),  $n$  – дробное шунтовое число, указывающее, какая часть от полного тока прошла через гальванометр,  $I$  – ток, А.

Тогда искомая величина сопротивления образца:

$$R_x = (U \cdot n) / (\alpha \cdot C)$$

#### Описание лабораторной установки

Установка (рис. 1.3.) состоит из источника питания ВС-23, баллистического со световым указателем гальванометра, шунта к гальванометру (Ш).

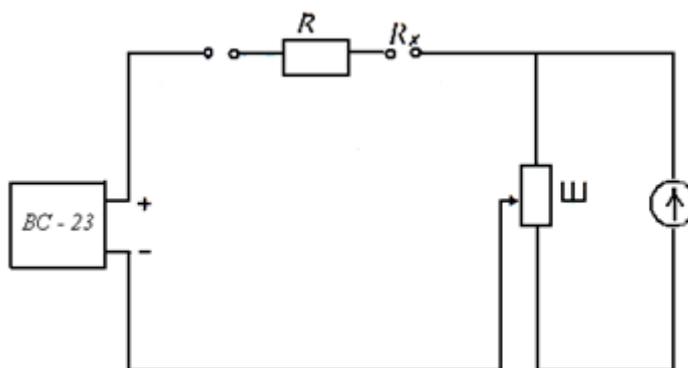


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки для определения сопротивления диэлектриков

#### Последовательность и методика проведения эксперимента

##### 1.1. Измерение объемного и поверхностного сопротивлений.

Измерение объемного  $R_v$  и поверхностного  $R_s$  сопротивлений образцов диэлектриков производится в следующем порядке:

1) При определении  $R_v$  установить образец диэлектрика между электродами А, Б и В согласно схеме, представленной на рис. 1. 1. При определении  $R_s$  использовать схему, представленную на рис. 1. 2.

2) Включить сеть 220 В, при этом должна загореться зеленая сигнальная лампочка. Через 2-3 минуты включить тумблер «Высокое напряжение», при этом загорается красная сигнальная лампочка, а вольтметры показывают напряжение. Соответствующей ручкой регулировки выходных напряжений установить необходимое напряжение;

3) записать установившееся отклонение светового пятна гальванометра  $\alpha$  (число делений), напряжение  $U$  и значение силы тока, прошедшего через шунт  $I_{ш}$ . Замер тока производить через одну минуту после включения образца под напряжение;

4) замерить геометрические размеры образца: толщину  $d$  (м), диаметр меньшего электрода  $D$  (м), внутренний диаметр кольцевого электрода  $D_1$  (м).

5) рассчитать  $R_x$ ,  $\rho_v$ ,  $\rho_s$ , а так же значение удельной потери мощности при постоянном напряжении  $\rho_- = \frac{E^2}{\rho_v}$ , Вт/м<sup>3</sup>.

1. 2. Исследование зависимости объемного сопротивления  $R_v$  образцов диэлектриков от величины приложенного напряжения.

Измерения производить через каждые 1 кВ. Для каждого материала сделать пять замеров в интервале значений напряжения 1 – 5 кВ. Результаты измерений и расчетов записать в таблицу.

1. 3. Исследование зависимости  $R_v$  образцов диэлектриков от времени приложения напряжения. Замеры производить в течение 10-15 мин. с интервалом 1 мин.

Полученные результаты проведенных экспериментов записать в таблицы 1, 2, 3.

Таблица 1.1

Таблица 1Материал	Измерения				Расчеты			
	d, см	D, см	U, кВ	$\alpha$ , дел	n	$R_v$ , Ом	$\rho_v$ , Ом	$\rho_-$ , Вт/м <sup>3</sup>
Текстолит	0,2	5	1	3	0,2			
			2	12				
			3	18				
			4	24				
			5	31				
Паронит	0,1	5	1	5	0,1			
			2	13				
			3	20				
			4	25				
			5	30				

Таблица 1.2

Материал	Измерения					Расчет	
	d, см	D, см	U, кВ	$\alpha$ , дел	n	$R_s$ , Ом	$\rho_s$ , Ом
Текстолит	7	5	1	10	1		
			2	23	1		
			3	20	5		
			4	35	5		
			5	40	5		
Паронит	7	5	1	7	0,5		
			2	21	0,5		
			3	38	0,5		
			4	30	1		
			5	20	5		

Таблица 1.3

Материал	Измерения				Расчет	
	$\tau$ , мин	U, кВ	$\alpha$ , дел	n, $\mu\text{кА}$	$R_v$ , Ом	$\rho_v$ , Ом
Текстолит	1	5	31	0,5		
	1,5		27			
	2		25			
	2,5		24			
	3		24			
Паронит	1	5	51	1		
	1,5		33			
	2		34			
	2,5		35			
	3		35			

### Обработка результатов эксперимента

По результатам измерений построить графики зависимости  $p_v = f(U)$  и  $p_s = f(U)$ ,  $p_v = f(\tau)$  для исследуемых материалов.

Отчет по работе должен содержать следующие разделы

*Цель работы.*

1. *Основные теоретические положения;*
2. *Описание эксперимента.* Раздел должен содержать рис.1.2 и рис.1.3;
3. *Результаты эксперимента.* Раздел должен содержать таблицы 1.1-1.3 и графики зависимостей  $p_v = f(U)$  и  $p_s = f(U)$ ,  $p_v = f(\tau)$  для исследованных диэлектриков;
4. *Выводы по работе.*
5. *Ответы на контрольные вопросы.*

### Контрольные вопросы

1. Как определяются и в каких единицах измеряются  $p_v$  и  $p_s$  диэлектриков?
2. Как и почему измеряется сопротивление диэлектрика при повышении приложенного к нему напряжения  $p_v = f(U)$  и  $p_s = f(U)$ ?
3. Как измеряется и в каких единицах измеряется  $p_v = f(\tau)$  при  $U = \text{const}$ ?
4. Как определить удельные потери мощности при постоянном напряжении  $p_v = f(U)$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### Цель работы

1. Изучить теоретические основы поляризации и диэлектрических потерь в твердых диэлектриках.
2. Освоить методику определения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков на лабораторном стенде МВ-004.

#### Основные теоретические положения

##### Виды зарядов в диэлектриках

Степень полярности молекул диэлектриков оценивают *дипольным моментом*:

$$\mu = |q| \cdot l, \text{ Кл} \cdot \text{м}, \quad (2.1)$$

где  $|q|$  – абсолютная величина заряда, Кл;  $l$  – расстояние между центрами положительных и отрицательных зарядов, м.

Если  $l = 0$ , то есть центры положительных и отрицательных зарядов в молекуле находятся в одной точке,  $\mu = 0$ , молекула называется *неполярной*.

Если  $l > 0$ , то есть центры положительных и отрицательных зарядов в молекуле не совпадают,  $\mu > 0$ , молекула называется *полярной или дипольной или просто «диполем»*.

Соответственно, *диэлектрики, состоящие из полярных молекул, называются полярными, а диэлектрики, состоящие из неполярных молекул – неполярными*.

Реальный диэлектрик состоит из *сильно связанных зарядов, слабо связанных зарядов и свободных зарядов*

*Сильно(упруго) связанные заряды* (электроны, ионы) – под действием электрического поля практически мгновенно упорядоченно смещаются из равновесных положений на ограниченные расстояния: электроны смещаются в пределах атома или иона, ионы – в пределах элементарной кристаллической ячейки. После прекращения действия электрического поля

заряды практически мгновенно возвращаются в исходное равновесное положение.

*Слабо связанные заряды – диполи* в полярных молекулярных веществах; *ионы* в кристаллах с неплотно упакованной кристаллической решеткой, в аморфных веществах ионного строения, ионы, находящиеся в узлах решетки вблизи вакансий, ионы примесей и т. п.; *избыточные электроны и «дырки»* в диэлектриках-полупроводниках. В отсутствие электрического поля слабо связанные заряды могут находиться в нескольких равновесных положениях. Под действием электрического поля происходит направленное перемещение зарядов из одного равновесного положения в другое или поворот диполей. Смещение слабо связанных зарядов происходит на гораздо большие расстояния, чем смещение сильно связанных зарядов. После прекращения действия электрического поля заряды медленно возвращаются в исходное равновесное положение.

*Свободные заряды – свободные электроны и ионы*, образующиеся в диэлектриках под действием высокой температуры, сильного электрического поля, ионизации диэлектрика или его примесей, а также диффузии электронов из металлических электродов. Под действием электрического поля свободные заряды приобретают в диэлектрике направленное движение, разряжаются на электродах и создают ток сквозной проводимости.

### **Относительная диэлектрическая проницаемость**

При действии электрического поля на диэлектрик в нем протекает процесс поляризации.

*Поляризация* - ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация полярных молекул под действием электрического поля.

Количественной мерой поляризации единицы объема диэлектрика служит *поляризованность*  $P$ , являющаяся векторной суммой индуцированных дипольных моментов  $p_0$  всех ( $n$ ) частиц (микрообъемов) диэлектрика:

$$P = \sum_{i=1}^n p_0 = np_0 = \varepsilon_0 n \alpha E', \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $\alpha$  – поляризуемость данной частицы (микрообъема),  $E'$  – напряженность локального электрического поля, действующего на частицу (микрообъем).

*Поляризуемость  $\alpha$  является микроскопической характеристикой поляризации диэлектрика.*

Для линейных диэлектриков в области слабых электрических полей:

$$P = \varepsilon_0 \chi E, \quad (2.3)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость,  $E$  – напряженность электрического поля, действующего на диэлектрик.

*Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  характеризует способность вещества к поляризации, является макроскопической характеристикой поляризации диэлектрика.*

*Численное значение относительной диэлектрической проницаемости показывает, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора при замене вакуума между его обкладками на исследуемый диэлектрик:*

$$\varepsilon = \frac{C_x \cdot d}{S} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0} \quad (2.4)$$

где  $C_x$  – суммарная емкость конденсатора, Ф;  $C_0$  – емкость конденсатора с вакуумом между обкладками, Ф;  $S$  – площадь электрода, м<sup>2</sup>;  $d$  – толщина диэлектрика между электродами, м.

Из формулы (2.4) следует, что  $\varepsilon$  не может быть меньше единицы. Для вакуума  $\varepsilon = 1$ .

Величина, характеризующая изменение  $\varepsilon$  при нагревании диэлектрика на один градус, называется *температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости*:

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}, \text{ K}^{-1}. \quad (2.5)$$

### ***Виды поляризации***

Все виды поляризации подразделяются на *упругие (быстрые или деформационные)* – обусловленные смещением сильно связанных зарядов, и *релаксационные (медленные)* – обусловленные смещением слабо связанных зарядов.

К упругим видам поляризации относятся электронная и ионная. К релаксационным – дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, электронно-релаксационная, спонтанная, миграционная и резонансная.

*Электронная поляризация – упругое смещение и деформация электронных оболочек атомов и ионов относительно ядра под действием электрического поля.*

Электронная поляризация имеет место у всех диэлектриков, независимо от их агрегатного состояния и строения. В чистом виде электронная поляризация имеет место и в неполярных диэлектриках молекулярного строения. Время установления этого вида поляризации составляет  $10^{-15}$  -  $10^{-14}$  с. Величина смещения электронов при электронной поляризации невелика, что обуславливает низкую относительную проницаемость веществ с чисто электронной поляризацией (2–2,5). Такую поляризацию в чистом виде имеют неполярные вещества, например, неполярные жидкости: нефтяное масло, октол; неполярные твердые вещества: парафин, полиэтилен, фторопласт–4. Электронная поляризация присутствует во всех диэлектриках, но в некоторых на нее накладываются другие виды поляризации в зависимости от наличия способных к смещению связанных зарядов, тогда  $\epsilon$  вещества возрастает.

Относительная диэлектрическая проницаемость при электронной поляризации не зависит от частоты и напряженности электрического поля.

Если диэлектрик имеет кристаллическую структуру с ионным строением кристалла (слюда, керамика), то в нем происходит *ионная поляризация – упругое смещение сильно связанных ионов под действием внешнего электрического поляна величину менее параметра кристаллической решетки*. Время установления ионной поляризации  $10^{-13}$  –  $10^{-12}$ с.

Ионная поляризация наблюдается в кристаллических диэлектриках ионного строения с плотной упаковкой ионов. Ионная поляризация всегда сопровождается электронной поляризацией.

Относительная диэлектрическая проницаемость при ионной поляризации, не зависит от частоты и напряженности электрического поля.

Диэлектрическая проницаемость веществ с ионной поляризацией – 4-30 (у стекол и керамики может достигать значений 200–300). Для некоторых видов керамики свойственно стремление к образованию доменной структуры при температурах, меньших некоторой определенной величины (эта температура названа точкой Кюри). У таких материалов даже без приложения электрического поля наблюдается самопроизвольное смещение зарядов в пределах доменов. При наложении электрического поля в таких диэлектриках идет спонтанная поляризация. Время установления спонтанной поляризации –  $10^{-7}$  –  $10^{-9}$  с. При температуре выше точки Кюри спонтанная поляризация исчезает.

*Ионно-релаксационная поляризация – упорядоченное смещение слабо связанных ионов под действием электрического поля на величину, превышающую параметр кристаллической решетки (у кристаллических веществ) или расстояние между ионами (у аморфных веществ).*

Данный вид поляризации имеет место в твердых диэлектриках ионного строения с аморфной и кристаллической структурой с неплотной упаковкой.

В случае полярных диэлектриков, когда молекулы их имеют несимметрическое в электрическом отношении строение и обладают дипольным моментом, под действием внешнего электрического поля диполи ориентируются вдоль поля, т.е. происходит *дипольно-релаксационная поляризация*.

*Дипольно-релаксационная поляризация – преимущественная ориентация дипольных молекул вещества, находящихся в непрерывном тепловом хаотическом движении, под действием внешнего электрического поля.*

Дипольно-релаксационная поляризация наблюдается в полярных газообразных, жидких и твердых веществах молекулярного строения.

Величина диэлектрической проницаемости для полярных диэлектриков лежит в пределах 3–8. Время установления поляризации –  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  с.

Продолжительность установления дипольно-релаксационной поляризации характеризуют *временем релаксации*.

*Время релаксации – промежуток времени в течение, которого после внезапного снятия внешнего поля степень упорядоченности диполей уменьшается.* Время релаксации составляет  $10^{-8}$  ÷  $10^{-1}$  с.

В полимерных диэлектриках дипольно-релаксационная поляризация проявляется в виде двух разновидностей: дипольно–сегментальной и дипольно–групповой.

*Дипольно–сегментальная поляризация заключается в создании электрическим полем некоторой упорядоченности в положении отрезков молекулярных цепей (сегментов), совершающих хаотическое тепловое движение.*

Этот вид поляризации наблюдается при температурах выше температуры стеклования  $T_c$  в полярных и неполярных полимерах.

*Температура стеклования – температура перехода аморфного полимера при нагревании из стеклообразного состояния (СС) в высокоэластическое состояние (ВЭС).* В стеклообразном состоянии полимеры твердые и хрупкие, подобно неорганическим стеклам и способны к очень малой обратимой (упругой) деформации при нагрузке. В ВЭС

полимеры, в результате уменьшения межмолекулярного взаимодействия, обладают значительной упругой деформацией, развивающейся при приложении небольших усилий.

*Дипольно–групповая поляризация заключается в ориентации полярных групп макромолекул (–Cl, –F, –OH, –NH<sub>2</sub>, –NO<sub>2</sub>, –COH и т.п.) и боковых ответвлений (–CH<sub>3</sub> и т.п.) под действием электрического поля. Этот вид поляризации наблюдается при  $T > T_c$  в полярных полимерах.*

*Миграционная поляризация заключается в накоплении свободных зарядов на границах раздела фаз в многокомпонентных диэлектриках (слоистые диэлектрики и диэлектрики-статистические смеси) ввиду различной электропроводности фаз. Миграционная поляризация слоистых диэлектриков (гетинакс, текстолит и др.) называется межслойной.*

*Резонансная поляризация – возникает при совпадении собственных частот колебаний молекул, атомов, валентных электронов диэлектрика с частотой приложенного электрического поля в области СВЧ и оптических частот.*

### Токи в диэлектрике

Полный ток  $J$ , протекающий через конденсатор, между обкладками которого находится диэлектрик, определяется как:

$$J = J_c + J_{abc} + J_{ск}, \quad (2.6)$$

где  $J_c$  – емкостной ток, обусловлен смещением сильно связанных зарядов в процессе электронной и ионной поляризации;  $J_{abc}$  – ток абсорбции, обусловлен смещением слабо связанных зарядов в процессах релаксационных видов поляризации;  $J_{ск}$  – ток сквозной проводимости, обусловлен движением свободных зарядов в диэлектрике под действием электрического поля.

### Диэлектрические потери

*Диэлектрические потери – часть энергии приложенного электрического поля, которая поглощается в диэлектрике. Эта энергия превращается в тепло и нагревает диэлектрик.*

Релаксационные виды поляризации сопровождаются нагревом диэлектрика, то есть сопровождаются потерями энергии электрического

поля. Упругие виды поляризации не вызывают потерь энергии электрического поля в диэлектрике.

В диэлектриках возникают следующие виды диэлектрических потерь.

*Потери на электропроводность* – обусловлены током сквозной проводимости, имеют место во всех реальных диэлектриках, в постоянном и переменном электрических полях.

*Релаксационные потери* – обусловлены релаксационными видами поляризации. Возникают в полярных, неполярных диэлектриках молекулярного строения, в аморфных и кристаллических с неплотной упаковкой ионов ионных диэлектриках. Имеют место в переменных электрических полях.

*Ионизационные потери* – обусловлены потерями энергии электрического поля на ионизацию газообразных диэлектриков и газовых включений в жидких и твердых диэлектриках.

*Потери на неоднородность структуры* – обусловлены миграционной поляризацией.

*Резонансные потери* - обусловлены резонансной поляризацией.

### **Тангенс угла диэлектрических потерь**

Диэлектрические потери анализируют с помощью *эквивалентных схем диэлектрика* и *векторных диаграмм*. Эквивалентная схема диэлектрика представляет собой последовательно или параллельно соединенные активное сопротивление  $R$  и реактивное сопротивление  $X_c$  в виде электрической емкости.

На рис. 2.1а представлена векторная диаграмма токов в диэлектрике для параллельной эквивалентной схемы замещения (рис.2.1б).

*Угол диэлектрических потерь*  $\delta$  – угол, дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением в емкостной цепи:

$$\delta = 90^\circ - \varphi. \quad (2.7)$$

*Уровень диэлектрических потерь в диэлектрике оценивают с помощью тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$* . Чем меньше  $\operatorname{tg} \delta$  тем меньше диэлектрические потери и выше качество диэлектрика.

Из векторной диаграммы (рис. 1а) следует:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{J_{aa} + J_{ck}}{J_c + J_{ap}} = \frac{J_a}{J_p}, \quad (2.8)$$

где  $J_a$  – активный ток,  $J_p$  – реактивный ток,  $J_{aa}$  – активный ток абсорбции,  $J_{ap}$  – реактивный ток абсорбции,  $J_c$  – емкостной ток,  $J_{ск}$  – ток сквозной проводимости.

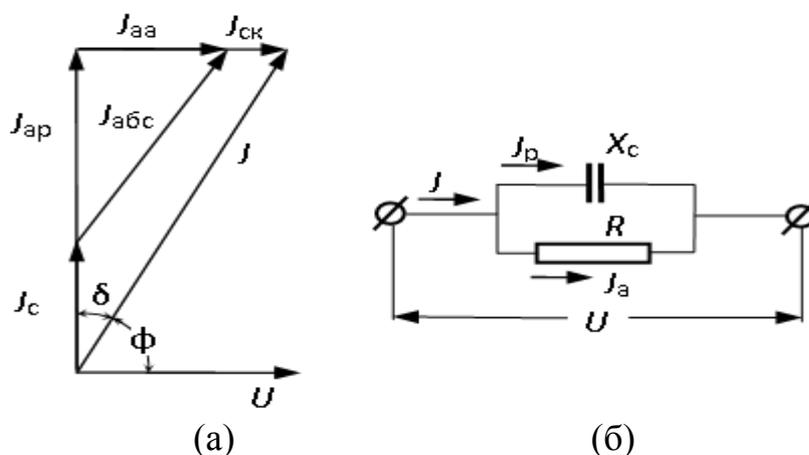


Рис. 2.1. Векторная диаграмма токов (а) и параллельная эквивалентная схема замещения (б) диэлектрика:  $J$  – полный ток,  $J_a$  – активный ток,  $J_p$  – реактивный ток,  $J_{abc}$  – ток абсорбции,  $J_{aa}$  – активный ток абсорбции,  $J_{ap}$  – реактивный ток абсорбции,  $J_c$  – емкостной ток,  $J_{ск}$  – ток сквозной проводимости,  $R$  – активное сопротивление,  $X_c$  – реактивное сопротивление,  $U$  – напряжение,  $\varphi$  – угол сдвига фаз,  $\delta$  – угол диэлектрических потерь

### Зависимости $\epsilon$ и $\operatorname{tg}\delta$ от температуры и природы диэлектрика

#### *Твердые неполярные диэлектрики молекулярного строения*

Эти диэлектрики (парафин и др.) обладают только электронной поляризацией и их  $\epsilon$  невелика ( $\epsilon = 2,0 \div 2,5$ ).

При повышении температуры относительная диэлектрическая проницаемость диэлектриков уменьшается (рис. 2.2а), причем, при температурах плавления  $T_{пл}$  и кипения  $T_{кип}$  – скачкообразно. Уменьшение  $\epsilon$  при увеличении температуры объясняется изменением числа поляризуемых молекул ( $n$ ) в единице объема вещества вследствие его температурного расширения.

Диэлектрические потери небольшие ( $\operatorname{tg}\delta \approx 10^{-4}$ ) и обусловлены только током сквозной проводимости. При нагревании  $\operatorname{tg}\delta$  незначительно нелинейно увеличивается в связи с увеличением концентрации свободных зарядов (рис. 2.2б).

#### *Твердые полярные диэлектрики молекулярного строения*

Диэлектрики этой группы (канифоль и др.) наряду с электронной поляризацией обладают и дипольно-релаксационной. Поэтому диэлектрическая проницаемость у этих диэлектриков имеет более высокие значения, чем у неполярных диэлектриков ( $\epsilon = 3 \div 20$  и более).

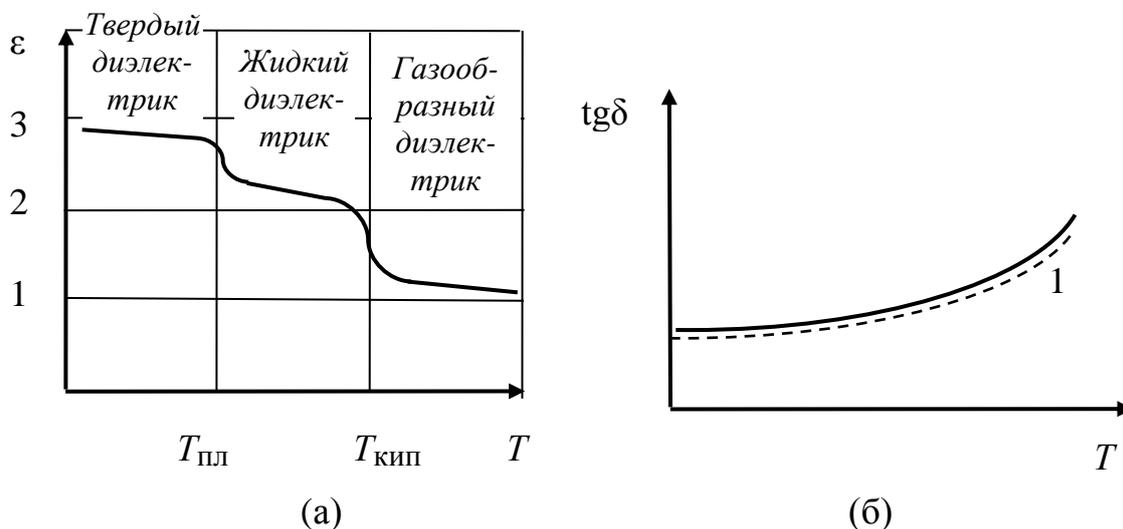


Рис. 2.2. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость (а) и  $tg\delta$  (б) неполярных диэлектриков молекулярного строения: 1 – потери на электропроводность

Зависимость  $\epsilon(T)$  для этой группы диэлектриков приведена на рис. 2.3а. С повышением температуры в результате ослабления межмолекулярных связей увеличивается ориентация диполей в направлении электрического поля, поэтому  $\epsilon$  возрастает (рис. 2.3а, участок  $ab$ ). Однако с повышением температуры возрастает, и энергия теплового хаотического движения диполей и выше температуры  $T_m$  дезориентирующее действие теплового движения начинает преобладать над ориентирующим действием электрического поля. Поэтому при дальнейшем нагревании (при  $T > T_m$ )  $\epsilon$  уменьшается (участок  $bc$ ).

Диэлектрические потери в этих диэлектриках обусловлены током сквозной проводимости и дипольно-релаксационной поляризацией.

Зависимость изменения  $tg\delta$  от температуры приведена на рис. 2.3б. При увеличении температуры до  $T'_m$  дипольно-релаксационные потери возрастают в результате ослабления межмолекулярных связей и увеличения ориентации диполей в направлении электрического поля. При этом увеличивается энергия электрического поля, потребляемая на ориентацию диполей, которая расходуется на трение и переходит в тепло (рис. 2.3б,

кривая  $ab$ ). При дальнейшем нагревании в результате роста энергии теплового хаотического движения полярных молекул дипольно-релаксационная поляризация уменьшается; уменьшаются и релаксационные потери (рис. 2.3б, кривая  $bc$ ).

Дальнейшее увеличение  $\text{tg}\delta$  при повышении температуры (рис. 2.3б, участок  $cd$ ) происходит за счет роста электропроводности диэлектрика.

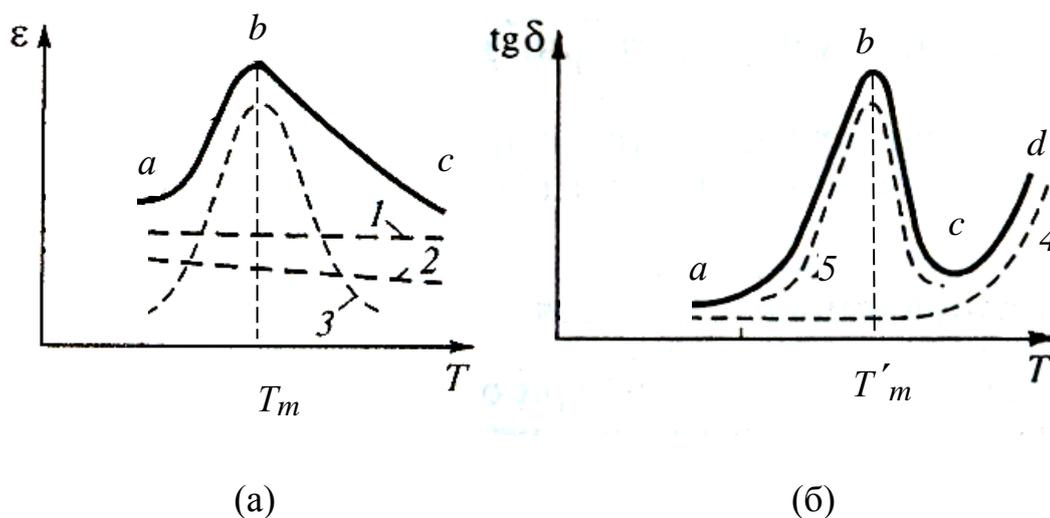


Рис. 2.3. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость и  $\text{tg}\delta$  полярных диэлектриков молекулярного строения: 1 – электронная поляризация, 2 –  $n(T)$ , 3 – дипольно-релаксационная поляризация, 4 – потери на электропроводность, 5 – дипольно-релаксационные потери

*Твердые диэлектрики ионного строения с плотной упаковкой решетки*

Для таких диэлектриков (корундовая керамика  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , слюда, кварц  $\text{SiO}_2$  и др.) характерны электронная и ионная поляризации. Значение  $\epsilon$  изменяется в пределах  $3 \div 10$ . При нагревании  $\epsilon$  возрастает линейно ( $\text{TK}_\epsilon > 0$ ) (рис. 2.4а). Это связано с увеличением смещения ионов относительно друг друга под действием электрического поля.

Диэлектрические потери обусловлены только током сквозной проводимости и имеют небольшие значения ( $\text{tg}\delta \approx 10^{-4}$ ). При повышении температуры потери незначительно возрастают, так как возрастает ток сквозной проводимости ввиду увеличения степени диссоциации примесей и ионизации диэлектрика (рис. 2.5, кривая II).

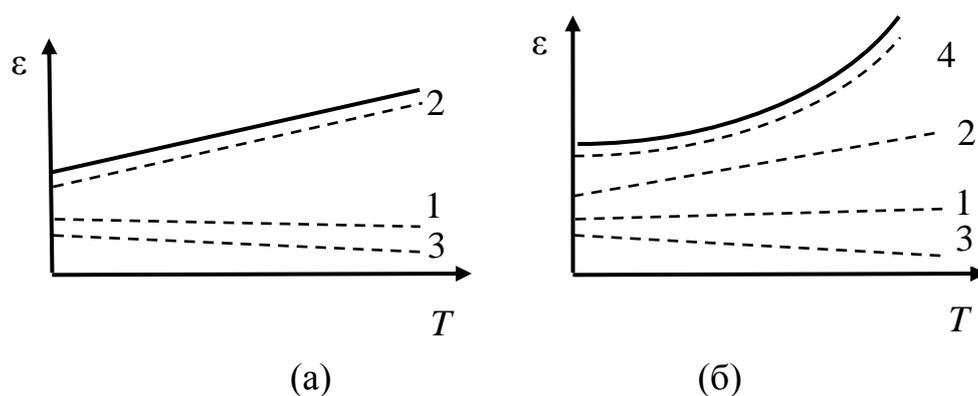


Рис. 2.4. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость диэлектриков плотной (а) и с неплотной (б) упаковки решетки ионами; составляющие поляризации: 1 – электронная, 2 – ионная, 3 –  $n(T)$ , 4 – ионно-релаксационная поляризация

*Твердые диэлектрики ионного строения с аморфной структурой и с неплотной упаковкой решетки*

Диэлектрическая проницаемость таких диэлектриков (неорганические стекла, электротехнический фарфор, асбест и др.) увеличивается нелинейно при увеличении температуры за счет увеличения интенсивности ионной и, главным образом, ионно-релаксационной поляризации (рис. 2.4б). Значение  $\epsilon$  изменяется в пределах  $4 \div 20$ . По сравнению с диэлектриками с плотной упаковкой решетки  $TK_\epsilon$  для этих диэлектриков имеет более высокие значения.

Диэлектрические потери в этом случае обусловлены током сквозной проводимости и ионно-релаксационной поляризацией (см. рис. 2.5, кривая I). Потери в этих диэлектриках выше, чем в кристаллических диэлектриках с плотной упаковкой решетки ( $\text{tg}\delta \approx 10^{-2}$ ) и сильно зависят от температуры: при нагревании  $\text{tg}\delta$  существенно возрастает.

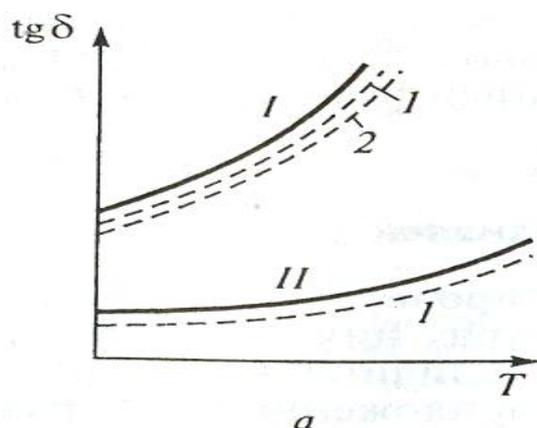


Рис. 2.5. Зависимости  $\text{tg } \delta$  от температуры диэлектриков ионного строения аморфных или кристаллических с неплотной (I) и с плотной (II) упаковкой решетки: 1 – потери, обусловленные током проводимости; 2 – потери, обусловленные ионно-релаксационной поляризацией

### Неполярные полимеры

Для полимерных неполярных диэлектриков (полиэтилен, полистирол, полипропилен и др.) при  $T < T_c$  характерна только электронная поляризация (здесь  $\epsilon = 2 \div 2,5$ ). С увеличением температуры при  $T < T_c$   $\epsilon$  слегка уменьшается, так как уменьшается  $n$  (рис. 2.6а).

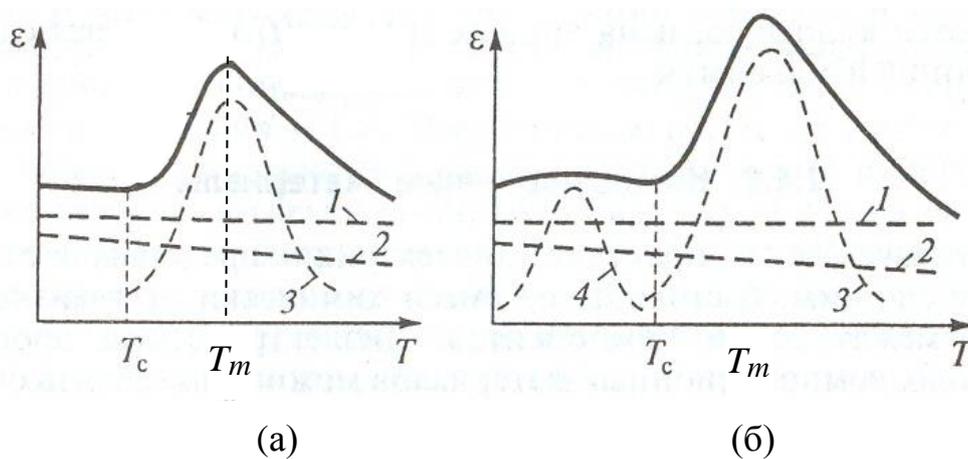


Рис. 2.6. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  неполярного (а) и полярного (б) полимера от температуры; составляющие поляризации: 1 – электронная, 2 –  $n(T)$ , 3 – дипольно-сегментальная поляризация,

При  $T > T_c$  имеет место дипольно-сегментальная и электронная поляризации. Здесь при нагревании полимера до  $T_m$   $\epsilon$  возрастает в результате

ослабления межмолекулярных связей и увеличения степени ориентации сегментов макромолекул в направлении электрического поля. Однако с повышением температуры возрастает, и энергия теплового хаотического движения сегментов и выше температуры  $t_m$  дезориентирующее действие теплового движения начинает преобладать над ориентирующим действием электрического поля. Поэтому при дальнейшем нагревании (при  $T > T_m$ )  $\epsilon$  уменьшается.

Диэлектрические потери при  $T < T_c$  имеют небольшую величину ( $\text{tg} \delta = 10^{-4} \div 10^{-3}$ ) и очень слабо зависят от температуры (рис. 2.7а). При нагревании (при  $T < T_c$ )  $\text{tg} \delta$  незначительно возрастает, так как слегка возрастает ток сквозной проводимости (см. рис. 2.7а, кривая 1). Кривая зависимости  $\text{tg} \delta = f(T)$  при  $T > T_c$  возрастает и проходит через максимум, обусловленный дипольно-сегментальной поляризацией. С дальнейшим увеличением температуры  $\text{tg} \delta$  растет вследствие увеличения тока сквозной проводимости.

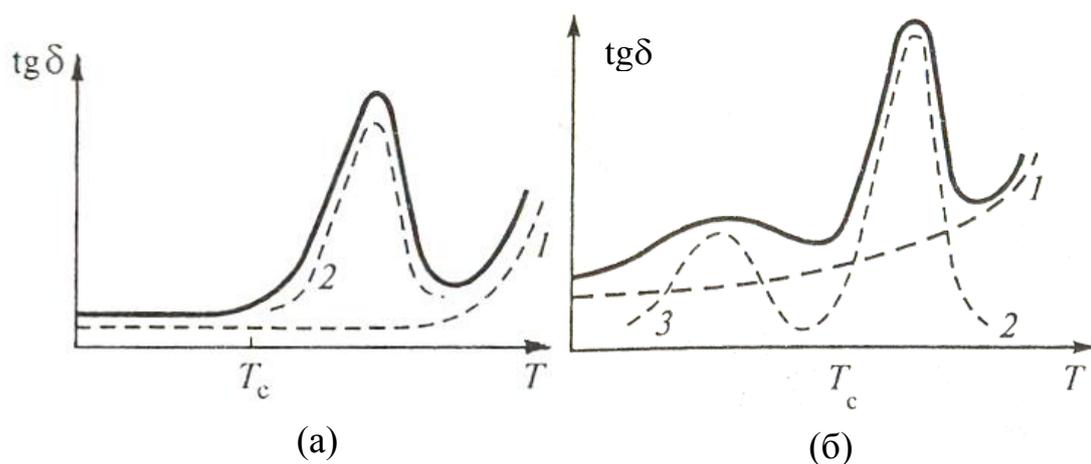


Рис. 2.7. Зависимость  $\text{tg} \delta$  неполярного (а) и полярного полимеров от температуры: 1 – потери, обусловленные током проводимости, 2 – дипольно-сегментальной поляризацией, 3 – дипольно-групповой поляризацией

### *Полярные полимеры*

Для полимерных полярных диэлектриков (полиэтилентерефталат, поливинилхлорид, фторопласт – 3, полиимиды и др.) при  $T < T_c$  характерны электронная и дипольно-групповая поляризации, а при  $T > T_c$  – электронная и дипольно-сегментальная (рис. 2.6б). Поэтому  $\epsilon$  полярных полимеров больше ( $\epsilon = 3 \div 6$  и более), чем у неполярных. При нагревании  $\epsilon$  проходит через два

максимума, один при  $T < T_c$ , обусловленный дипольно-групповой поляризацией, и другой при  $T > T_c$ , обусловленный дипольно-сегментальной поляризацией.

Полярные полимеры имеют большие значения  $\text{tg}\delta$ , чем неполярные ( $\text{tg}\delta = 10^{-3} \div 10^{-2}$  и выше). С увеличением температуры  $\text{tg}\delta$  проходит два максимума, обусловленные соответственно дипольно-групповой (при  $T < T_c$ ) и дипольно-сегментальной (при  $T > T_c$ ) поляризациями и далее возрастает вследствие увеличения тока сквозной проводимости (рис. 2.7б).

### Описание лабораторной установки

Лабораторный стенд (рис.2.8) состоит из термостата (1), осуществляющего установку, измерение, автоматическое поддержание температуры образца диэлектрика и измерителя емкости и тангенса угла диэлектрических потерь RLCE7-22 (2).

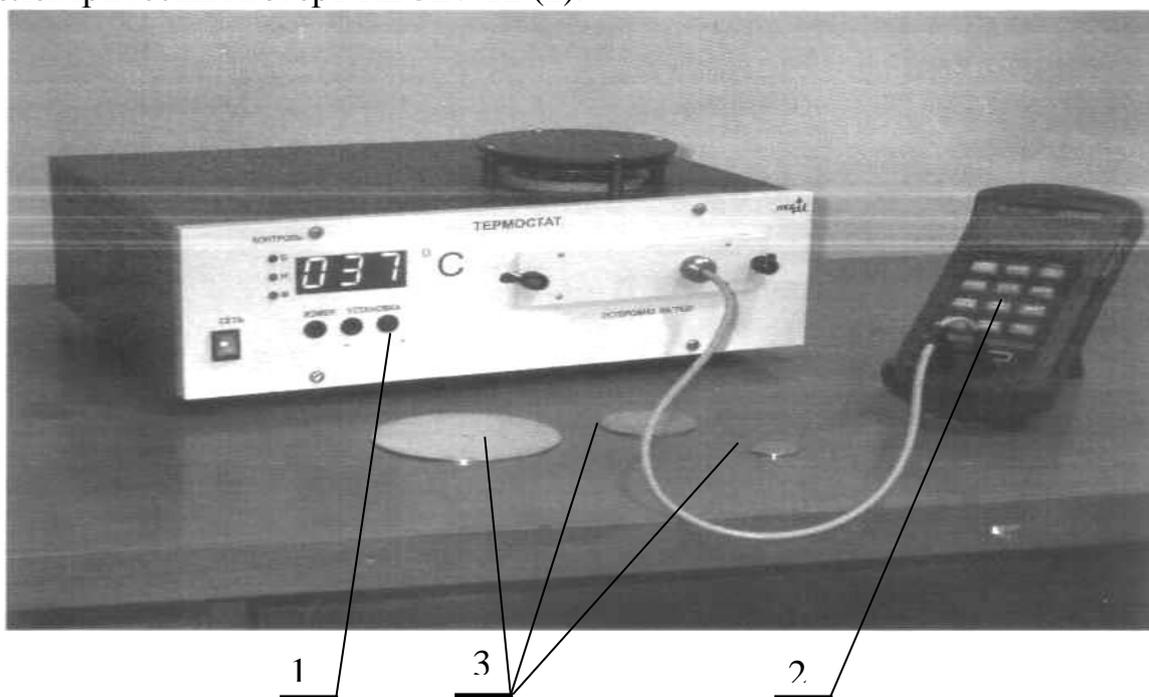


Рис.2.8. Внешний вид лабораторного стенда:

1 – термостат, 2 – измеритель емкости и тангенса угла диэлектрических потерь RLCE7-22, 3 – сменные электроды

Измерение, регулирование и поддержка заданного температурного режима осуществляется по показанию чувствительного платинового термосопротивления установленного стационарно внутри рабочей камеры термостата.

Предварительная установка значения требуемой температуры производится с помощью кнопки на передней панели термостата с индикацией на цифровом 3-х разрядном индикаторе, далее процесс разогрева (или остывания) до заданной температуры, а также ее поддержка осуществляется автоматически.

Контроль текущего температурного режима относительно заданного осуществляется тремя световыми индикаторами: "БОЛЬШЕ"; "НОРМА"; "МЕНЬШЕ". Также предусмотрена звуковая сигнализация при равенстве текущей температуры и заданной.

Объектами исследования могут быть плоские образцы твердых диэлектриков круглой формы с заранее нанесенными на поверхность электродами или эластичные (резиноподобные) диэлектрики с нажимными сменными электродами (рис. 2.8, поз.3).

*Цифровой измеритель RLCE7-22 имеет следующие органы управления и индикации передней панели:*

**Основной индикатор измерения параметров ЖК-дисплея** – предназначен для отображения результата измерения значений сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$ . Индикатор расположен в нижней части ЖК-дисплея.

**Вспомогательный индикатор измерения параметров ЖК-дисплея** – предназначен для отображения результата измерения значений тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , добротности  $Q$  и сопротивления  $R$ . Индикатор расположен в верхнем правом углу ЖК-дисплея.

**Кнопка  включения и выключения питания.** При нажатии кнопки измеритель включится, на индикаторе появится символ «АРО», свидетельствующий об активации функции автоматического выключения питания. В режиме бездействия питание будет выключено примерно через 10 мин. Для возвращения в рабочий режим нажмите кратковременно кнопку включения и выключения питания.

**Кнопка «ЧАСТ»** – осуществляет выбор частоты тест-сигнала. При каждом нажатии кнопки частота тест-сигнала изменяется в последовательности:

$$1 \text{ кГц} \rightarrow 120 \text{ Гц} \rightarrow 1 \text{ кГц}.$$

**Кнопка «ПАР/ПОСЛ (PAL/SER)»** – осуществляет выбор схемы замещения (PAL – параллельная, SER – последовательная). При каждом нажатии кнопки тип схемы замещения изменяется в последовательности:

$$\text{SER} \rightarrow \text{PAL} \rightarrow \text{SER}.$$

**Кнопка «L/C/R»** - осуществляет выбор режимов измерения основных параметров – индуктивности, емкости и сопротивления. При каждом нажатии кнопки вид измеряемого параметра изменяется в последовательности:

$$C \rightarrow R \rightarrow L \rightarrow C.$$

**Кнопка «Q /D/R»**– осуществляет выбор режимов измерения вспомогательных параметров – добротности, тангенса угла диэлектрических потерь и сопротивления. При каждом нажатии кнопки на вспомогательном индикаторе будут отображаться параметры доступные для измерения, в зависимости от основного режима измерения.

**ВНИМАНИЕ!** При длительной работе термостата в режиме нагрева свыше 100°C запрещается прикосновение к жалюзям вытяжной вентиляции расположенным на верхней крышке во избежание ожога. Время непрерывной работы термостата не должно превышать 2 ч после чего его необходимо выключить на время не менее 30 мин.

## Порядок и методика проведения лабораторной работы

### Подготовка установки к работе

1. Установите термостат на расстояние не менее 2 м от нагревательных приборов и 100 мм от наружных стен для обеспечения эффективной вентиляции. Установите измеритель *RLC* справа от термостата на расстоянии не менее 100 мм от его боковых жалюзей вентиляции.

2. Заземлите термостат и, при необходимости, измеритель *RLC*.

3. Установите диэлектрический образец, для чего:

3.1. Оцените состояние поверхности образца на наличие влаги, загрязнения, окисления электродов и при необходимости очистите их.

3.2. Извлеките кассету из рабочей камеры термостата и расположите образец диэлектрика так, чтобы зажимные винты обеспечивали прижим и электрический контакт с электродом.

3.3. При использовании нажимного сменного электрода "В", установите его на образец полированной поверхностью. Роль электрода "Н" в этом случае играет само основание кассеты.

3.4. Вставьте кассету в рабочую камеру термостата и закрепите ее зажимами и соедините выходной шнур кассеты термостата с измерительными зажимами измерителя.

4. Включите термостат в сеть 220 В, 50 Гц, включите выключатель питания "СЕТЬ", выдержите термостат включенным в течение 10 мин.

5. Включите питание измерителя *RLC*. Убедитесь в том, что индикатор состояния батарей не горит.

6. Прогрейте измеритель *RLC* в течение пяти минут. По истечении указанного времени измеритель готов к работе.

### Последовательность проведения эксперимента

1. Произведите измерения емкости *C*и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрика при комнатной температуре (начальное значение температуры внутри рабочей камеры термостата) для этого:

1.1. Для включения режима регулирования нажмите кнопку «ИЗМЕР» на передней панели термостата и измерьте значение температуры по цифровому индикатору.

1.2. На измерителе *RLC* кнопкой «L/C/R» задайте измерение емкости(на ЖК-дисплее в левой стороне отобразится буква *C*).

1.3. На измерителе *RLC* кнопкой «Q/D/R» задайте измерение тангенса угла диэлектрических потерь (на вспомогательном индикаторе ЖК-дисплея в средней части отобразится буква *D*).

1.4. На измерителе *RLC* кнопками «ЧАСТ» и «ПАР/ПОСЛ (PAL/SER)» установите необходимую частоту измерительного напряжения и схему замещения в зависимости от величины измеряемой емкости в соответствии с табл. 2.1.

Таблица 2.1

Выбор схемы замещения и частоты тест-сигнала

Емкость	Схема замещения	Частота
Менее 400 пФ	параллельная	1 кГц
От 400 пФ до 1 мкФ	последовательная	120 Гц или 1 кГц
Более 1 мкФ	параллельная	120 Гц

1.5. Произведите отсчет значений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь по соответствующим индикаторам измерителя.

2. С помощью кнопок «УСТАНОВКА» задайте требуемую температуру нагрева термостата на цифровом индикаторе.

3. Контролируйте, нагрев термостата до заданной температуры по состоянию светодиодных индикаторов: «МЕНЬШЕ», «НОРМА», «БОЛЬШЕ».

При зажигании светодиода «НОРМА» (дублируется звуковым сигналом) необходимо сделать, выдержку 2 - 3 мин для обеспечения установившегося температурного режима внутри рабочей камеры термостата. После наступления установившегося температурного режима проведите измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

### Обработка и анализ полученных результатов

1. Результаты измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков при различных температурах занесите в табл. 2.2

2. **ВНИМАНИЕ!** После окончания измерений установите минимальную температуру кнопкой «УСТАНОВКА» - термостата, не допускайте длительной работы термостата при температурах свыше 100 °С.

3. По измеренным значениям емкости и тангенса угла диэлектрических потерь с учетом геометрических размеров испытуемого образца и электрода вычислите значения диэлектрической проницаемости (формула 2.4) и коэффициента диэлектрических потерь  $k_{\Pi}$ :

$$k_{\Pi} = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.9)$$

4. По измеренным и вычисленным параметрам (табл.2.2) постройте графические зависимости  $\operatorname{tg} \delta = f(T)$ ,  $\varepsilon = f(T)$  и  $k_{\Pi} = f(T)$  для исследованных диэлектриков.

Таблица 2.2

Влияние температуры на диэлектрические характеристики материалов  
(частота тест-сигнала – 120 Гц или 1 кГц, схема замещения –  
последовательная или параллельная)

Диэлетрик	$d_{\text{эл}}, \text{ м}$	$t, ^\circ\text{С}$	$C, \text{ Ф}$	$\operatorname{tg} \delta$	$\varepsilon = \frac{C_x \cdot d}{S} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0}$	$k_{\Pi} = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$
Материал ( $h = \dots\dots\text{м}$ )		20				
		35				
		50				
		65				
		80				

## Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы

*Цель работы.*

1. *Основные теоретические положения.* Раздел должен содержать краткий конспект настоящего практикума, в том числе рисунки;
2. *Описание эксперимента;*
3. *Результаты эксперимента.* Раздел должен содержать таблицу 1.2 «Влияние температуры на диэлектрические характеристики материалов» и графики зависимостей  $\operatorname{tg}\delta = f(T)$ ,  $\varepsilon = f(T)$  и  $k_{\Pi} = f(T)$  для исследованных диэлектриков.
4. *Выводы по работе.*
5. *Ответы на контрольные вопросы.*

## Контрольные вопросы

1. Чем различаются полярные и неполярные диэлектрики?
2. В чем отличие сильно связанных, слабо связанных и свободных зарядов диэлектрика?
3. Что такое поляризация, поляризованность и поляризуемость?
4. Что такое относительная диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon$ )? Что показывает численное  $\varepsilon$ ?
5. Чем различаются упругие и релаксационные виды поляризации?
6. В чем отличие ионной и ионно-релаксационной поляризации?
7. В чем отличие дипольно - релаксационной, дипольно - сегментальной и дипольно - групповой поляризации?
8. Что такое диэлектрические потери?
9. Что такое векторная диаграмма токов в диэлектрике? Как определяются по векторной диаграмме угол диэлектрических потерь  $\delta$  и  $\operatorname{tg}\delta$ ?
10. Чем отличаются зависимости  $\varepsilon(T)$  для полярных и неполярных полимерных диэлектриков?
12. Чем отличаются зависимости  $\operatorname{tg}\delta(T)$  для полярных и неполярных полимерных диэлектриков?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ.

#### Цель работы

Изучить явления поляризации в диэлектриках, воздействия частоты приложенного электрического поля на величины диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь.

#### Основные теоретические положения

Основные теоретические положения приведены в работе №2.

В настоящей работе рассматривается метод измерения  $\operatorname{tg}\delta$  и  $C_x$  на высоковольтном мосте переменного тока, предназначенного для работы на частоте 50 Гц. Низковольтная часть моста состоит из магазинов сопротивлений и емкостей, подбором которых достигается уравнивание плечей моста. Испытуемый образец помещается в высоковольтную камеру, которая снабжена блокировкой, исключающей подачу высокого напряжения при открытой дверце.

Относительная диэлектрическая проницаемость определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{C_x \cdot d}{S} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0}$$

где  $S$  – площадь электрода,  $\text{м}^2$ ,  $d$  – толщина диэлектрика между электродами,  $\text{м}$ ;  $C_x$  – емкость конденсатора,  $\text{Ф}$ ;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\text{Ф/м}$ .

Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери зависят от частоты приложенного напряжения. У нейтральных диэлектриков изменение частоты вызывает, как правило, лишь незначительное изменение величины  $\varepsilon$ . Влияние же изменения частоты приложенного напряжения на диэлектрическую проницаемость полярных диэлектриков может быть весьма существенно. На рис 3.1(а) приведен график изменения относительной диэлектрической проницаемости от частоты для полярной жидкости. В начальный период величина соответствует диэлектрической проницаемости при постоянном напряжении. Начинаясь затем снижение величины объясняется тем, что диполи не успевают следовать за изменением частоты

приложенного напряжения и угол их поворота уменьшается. С дальнейшим увеличением частоты ориентация диполей совершенно прекращается, в результате чего дипольная поляризация практически исчезает, и диэлектрическая проницаемость определяется лишь одной электронной поляризацией.

Зависимость дипольного диэлектрика от частоты при неизменной температуре приведена на рис. 3. 1 (б). Наличие частотного максимума является следствием того, что диполи могут иметь максимальный угол поворота при ориентации под действием поля только при вполне определенной частоте, т.е. когда время, за которое изменяется направление электрического поля, становится соизмеримо со временем релаксации диполя.

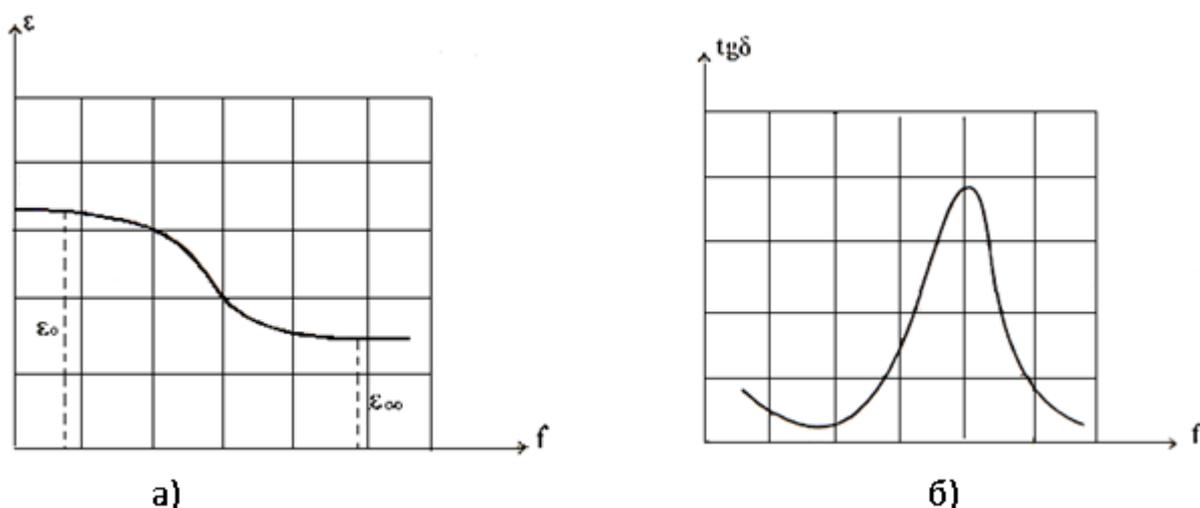


Рис. 3.1 Зависимость диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) от частоты приложенного напряжения

### Описание лабораторной установки

В данной работе используется мост переменного тока Р-577, предназначенный для измерения индуктивности и емкости в области частот от 40 до 20000 Гц (рис. 3.2). В мост встроены генератор и указатель равновесия, предназначенные для работы на частоте 1000 Гц. Для измерений в области более высоких частот к мосту подключается внешний генератор (Г) и внешний указатель равновесия (N).

Регулирование (уравновешивание) схем выполняется при помощи переменных сопротивлений  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  в плечах моста. Измерение сопротивлений осуществляется ступенчато при помощи переключателей и плавно – с использованием реохордов и переменных сопротивлений. Сигнальным устройством, свидетельствующем о включении моста в сеть

(220 В, 50 Гц), является светящееся табло (независимо от того, какая эквивалентная схема замещения диэлектрика на нем изображена). Измеряемая емкость обозначена  $C_x$ , образцовая емкость –  $C_2$ .

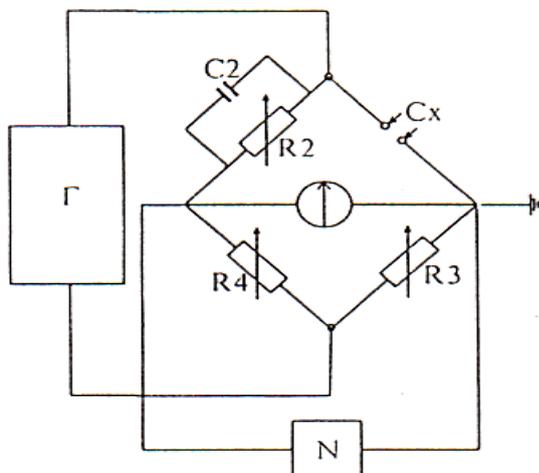


Рис. 3. 2. Электрическая схема моста переменного тока Р 577:

Г – генератор, N – осциллограф,  $C_x$  – емкость конденсатора с исследуемым диэлектриком,  $C_2$  – эталонная емкость;  $R_1$   $R_2$   $R_3$  – переменное сопротивление.

#### Проведение эксперимента

1. Определение относительной диэлектрической проницаемости вещества  $\varepsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  твердых диэлектриков при частоте 1000 Гц.

Эксперимент проводится в следующей последовательности.

1) подключить измеряемый объект к соответствующим зажимам, расположенным на передней панели прибора;

2) рукоятку «чувствительность» установить в крайнее левое положение;

3) переключатели пределов и основного отсчетного плеча установить в средние положения;

4) подготовить мост к сети с напряжением 220 В, 50 Гц;

5) установить левый переключатель в требуемое положение;

6) первым крайним переключателем выбрать требуемую схему измерения (схема указывается световым табло, расположенным над переключателем);

7) установить рукоятку «чувствительность» в такое положение, чтобы стрелка указателя равновесия отклонилась в пределах шкалы. Переключая

центральный переключатель (переключатель пределов), добиться минимального отклонения стрелки указателя равновесия;

8) при измерении емкости и индуктивности, постепенно увеличивая чувствительность, добиться минимального отклонения стрелки указателя равновесия поочередным вращением нижних рукояток (правой и левой);

9) при работе на пределах  $10^{-4}$  мкФ,  $10^{-4}$  мкФ отсчет необходимо умножить на 0,1; при работе на пределах 10 мкФ,  $10^{-2}$  мкФ отсчет необходимо умножить на 10.

На остальных пределах отсчет прямой.

10) измерить толщину диэлектрика и диаметр меньшего электрода.

11) вычислить значение  $\varepsilon$ .

2. Исследование зависимости  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$  от частоты.

Повторить определение  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$  твердых диэлектриков при частотах: 5, 9, 13, 17, 20 кГц. Использовать материалы: резину, паронит, неорганическое стекло и др. Рассчитать удельные потери мощности при

переменном напряжении:  $\rho_{\sim} = \frac{E^2 \operatorname{tg}\delta \varepsilon f}{1,8 \cdot 10^{10}}$ , Вт/м<sup>3</sup>

### Обработка результатов эксперимента

Результаты эксперимента записать в таблицу 3.1 и представить в виде графиков  $\operatorname{tg}\delta = f(f)$ ,  $\varepsilon = f(f)$

Таблица 3.1

Наименование материала	$f$ , Гц	$C$ , Ф	$\operatorname{tg}\delta$	$\varepsilon$	$\rho_{\sim}$ , Вт/м <sup>3</sup>	Примечание
						Диаметр измерительного электрода = 120мм

### Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы

*Цель работы.*

1. *Основные теоретические положения.* Раздел должен содержать краткий конспект настоящего практикума, в том числе рисунки;

2. *Результаты эксперимента.* Раздел должен содержать таблицу 3.1 и

графики зависимостей  $\operatorname{tg}\delta = f(f)$ ,  $\varepsilon = f(f)$  для исследованных диэлектриков.

3. *Выводы по работе.*

4. *Ответы на контрольные вопросы.*

#### Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация диэлектриков и какой величиной она оценивается?
2. Как определяется диэлектрическая проницаемость твердых и жидких диэлектриков?
3. Что такое угол диэлектрических потерь?
4. Объяснить характер частотной зависимости разных диэлектриков.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГАЗООБРАЗНЫХ И ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

#### Цель работы

1. Изучить теоретические основы электрической прочности газообразных и твердых диэлектриков.
2. Освоить методику определения электрической прочности твердых диэлектриков на лабораторном стенде МВ – 002
3. Определяется средней электрической прочности газообразных и твердых диэлектриков при переменном напряжении промышленной частоты.

#### Основные теоретические положения

##### Общие определения

При увеличении напряжения, приложенного к диэлектрику, при некотором его значении происходит резкое увеличение тока сквозной проводимости и резкое уменьшение электрического сопротивления материала. Возникает *ток короткого замыкания*. Ток короткого замыкания приводит к механическому или тепловому разрушению твердого диэлектрика – образуется сквозной пробитый, проплавленный или прожженный канал с низким электрическим сопротивлением. Диэлектрик утрачивает электроизоляционные свойства.

*Явление, при котором диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства под действие приложенного электрического поля, называется пробоем.*

Пробой диэлектрика характеризуют следующими параметрами.

*Напряжение пробоя ( $U_{пр}$ ) – напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика.*

*Электрическая прочность ( $E_{пр}$ ) - напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрик:*

$$E_{пр} = U_{пр}/h, \text{ В/м}, \quad (4.1)$$

где  $h$  - толщина диэлектрика.

*Коэффициент запаса электрической прочности:*

$$\kappa = U_{\text{пр}}/U_{\text{раб}}, \quad (4.2)$$

где  $U_{\text{раб}}$  – рабочее напряжение.

Для надежной работы электрической изоляции должно выполняться условие:  $\kappa > 1$ .

*Пробой твердого диэлектрика по его поверхности называется перекрытием.* В этом случае происходит пробой газа или жидкости, окружающей твердый диэлектрик.

## **Виды пробоя твердых диэлектриков**

### *Электрический (электронный) пробой*

Пробой протекает в результате ударной ионизации молекул или ионов диэлектрика электронами, движущимися с высокой скоростью под действием электрического поля. В результате ударной ионизации в диэлектрике между электродами создается сплошной плазменный канал (стример) с высокой электропроводностью, состоящий из электронов и положительных ионов. Электрический пробой возникает при следующем условии:

$$W_э = e\lambda E \geq W_{\text{и}}, \quad (4.3)$$

где  $W_э$  – энергия электрона;  $e$  – заряд электрона;  $\lambda$  – средняя длина свободного пробега электрона – расстояние, которое проходит электрон от одного соударения с нейтральными ионом или молекулой диэлектрика до другого соударения;  $W_{\text{и}}$  – энергия ионизации молекул или ионов диэлектрика.

Для твердых диэлектриков при электрическом пробое  $E_{\text{пр}} \approx 10^3$  МВ/м и более, время выдержки диэлектрика под напряжением  $\tau_{\text{выд}} < 10^{-2}$  с.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений.

### *Электротепловой (тепловой) пробой*

Пробой имеет место, если количество тепла, выделяющегося в диэлектрике в результате диэлектрических потерь ( $q_{\text{выд}}$ ), превышает количество тепла отводимого от элемента диэлектрика в окружающую среду ( $q_{\text{отв}}$ ):

$$q_{\text{выд}} > q_{\text{отв}}. \quad (4.4)$$

В результате диэлектрик нагревается до температур, при которых происходит его проплавление, обугливание или растрескивание.

При постоянном напряжении:

$$q_{\text{выд}} = E^2/\rho_v, \text{ Вт/м}^3, \quad (4.5)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $E = U/h$ ,  $U$  – напряжение,  $h$  – толщина диэлектрика,  $\rho_v$  – удельное объемное сопротивление диэлектрика.

При переменном напряжении:

$$q_{\text{выд}} = \varepsilon \text{tg} \delta f E^2 / 1,8 \cdot 10^{10}, \text{ Вт/м}^3, \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика,  $\delta$  – угол диэлектрических потерь,  $f$  – частота приложенного напряжения.

Для твердых диэлектриков при тепловом пробое  $E_{\text{пр}} \approx 10 \div 10^2$  МВ/м.

#### *Электрохимический пробой (электрическое старение)*

Пробой включает два этапа: предпробойный период и собственно пробой. В первый период происходит медленное изменение химического состава и структуры диэлектрика под действием электрического поля, сопровождающееся уменьшением его электрического сопротивления. При уменьшении сопротивления до критического уровня происходит тепловой или электрический пробой диэлектрика. Для твердых диэлектриков при электрохимическом пробое  $E_{\text{пр}} \approx 10$  МВ/м и менее, время выдержки под напряжением  $\tau_{\text{выд}} > 10^6$  с.

*Время жизни диэлектрика* – период времени от начала эксплуатации диэлектрика до его пробоя в результате электрохимического старения. Время жизни диэлектрика уменьшается при увеличении напряженности электрического поля и температуры.

#### *Ионизационный пробой*

Этот вид пробоя является разновидностью электрического пробоя. Возникает в результате ионизации и пробоя газовых пор в твердом диэлектрике (*частичных разрядов*). В результате частичных разрядов в пористом твердом диэлектрике из воздуха, содержащегося в порах, образуются сильные окислители – озон и оксиды азота, которые химически

разрушают диэлектрик. Электроны и ионы, бомбардируя стенки пор, разрушают диэлектрик механически. Нагрев диэлектрика под действием частичных разрядов вызывает его термическое разрушение.

## **Влияние различных факторов на электрическую прочность твердых диэлектриков**

### *Влияние природы диэлектриков*

На величину  $E_{\text{пр}}$  твердых диэлектриков влияют их химический состав и строение. При электротепловом пробое  $E_{\text{пр}}$  диэлектрика тем ниже, чем больше значения его  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  и меньше удельное сопротивление  $\rho_v$  (см. формулы 4.10 и 4.11).

Полимерные диэлектрики в порядке уменьшения  $E_{\text{пр}}$  могут быть разделены на три группы:

1. *неполярные полимеризационные полимеры* – полиэтилен, полипропилен, полистирол, политетрафторэтилен и др. ( $\epsilon = 2 - 2,6$ ;  $\text{tg}\delta = 10^{-4}$ ;  $\rho_v = 10^{14} - 10^{18}$  ом·м;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 60 МВ/м при  $h \approx 1$  мм;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 250 МВ/м при  $h \approx 0,02 - 0,1$  мм);

2. *полярные полимеризационные полимеры* – поливинилхлорид, полиимиды, политрифторхлорэтилен и др. ( $\epsilon = 3 - 6$ ;  $\text{tg}\delta \approx 10^{-2}$ ;  $\rho_v = 10^{11} - 10^{14}$  ом·м;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 40 МВ/м при  $h \approx 1$  мм;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 180 МВ/м при  $h \approx 0,02 - 0,1$  мм);

3. *поликонденсационные полимеры* – фенолформальдегидные смолы, эпоксидные смолы и др. ( $\epsilon = 3,5 - 8$ ;  $\text{tg}\delta \approx 10^{-3} - 10^{-1}$ ;  $\rho_v = 10^9 - 10^{14}$  ом·м;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 20 МВ/мм при  $h \approx 1$  мм;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 80 МВ/м при  $h \approx 0,02 - 0,1$  мм).

Диэлектрики ионного строения в порядке уменьшения  $E_{\text{пр}}$  могут быть разделены на две группы:

1. *кристаллические с плотной упаковкой ионов* – кварцевое стекло, боратное стекло, ситаллы и др. ( $\epsilon = 2,8 - 3,7$ ;  $\text{tg}\delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$ ;  $\rho_v \approx 10^{15}$  ом·м;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 80 МВ/м при  $h \approx 1$  мм и переменном напряжении;  $E_{\text{пр}} \approx$  до 500 МВ/м при постоянном напряжении);

2. *кристаллические с неплотной упаковкой ионов* (электротехнический фарфор, материалы на основе слюды - микалексы, миканиты и др.) и *аморфные* (неорганическое щелочное стекло и др.); материалы имеют следующие характеристики:  $\epsilon = 5 - 16$ ;  $\text{tg}\delta \approx 10^{-4} - 10^{-2}$ ;  $\rho_v \approx 10^{10} - 10^{12}$  ом·м;  $E_{\text{пр}} \approx 10 - 30$  МВ/м при  $h \approx 1$  мм и переменном напряжении.

### Влияние температуры

При электрическом пробое  $E_{пр}$  твердых диэлектриков практически не зависит от температуры. Однако в диэлектриках, которые имеют дефекты, образующие ловушки для электронов, при некоторой температуре возможна термическая ионизация ловушек, увеличение концентрации электронов и уменьшение  $E_{пр}$ .

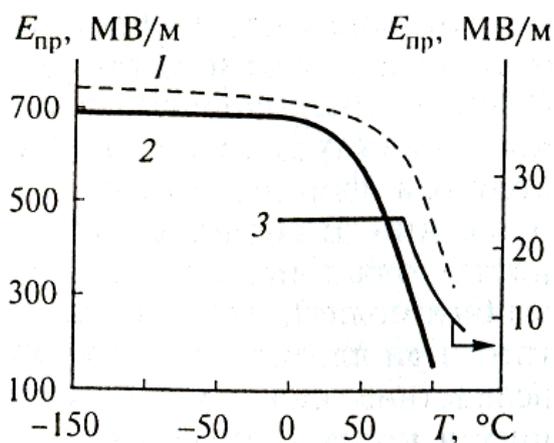


Рис. 4.1. Зависимость электрической прочности  $E_{пр}$  диэлектриков от температуры  $T$ :

1 — полистирол, 2 — полиэтилен, 3 — фарфор; толщина образцов 1 и 2 — 0,01 – 0,07 мм, напряжение постоянное; толщина образца 3 — 1,5 мм,  $f = 50$  Гц

При тепловом пробое  $E_{пр}$  ниже, чем при электрическом пробое. С увеличением температуры  $E_{пр}$  изменяется с характерным изломом (рис. 4.1). При низких температурах  $E_{пр}$  не зависит от температуры, здесь имеет место область электрического пробоя. Выше некоторой критической температуры происходит резкое снижение  $E_{пр}$  и отсюда уже начинается развитие теплового пробоя. У кристаллизующихся полимеров излом зависимости  $E_{пр} = f(T)$  наблюдается при достижении температуры плавления, у аморфных полимеров — при температуре стеклования, а затем при температуре текучести. Это связано с тем, что выше температур фазовых и физических переходов в полимерах увеличивается тепловыделение, обусловленное релаксационными диэлектрическими потерями — возрастает интенсивность дипольно-сегментальной и дипольно-групповой поляризации.

Для диэлектриков ионного строения (керамика, стекло) излом на кривой  $E_{\text{пр}} = f(T)$  обусловлен увеличением интенсивности ионно-релаксационной поляризации при тепловом расширении вещества.

### Влияние толщины диэлектрика

С увеличением толщины диэлектрика  $h$  его электрическая прочность уменьшается (рис. 4.2).

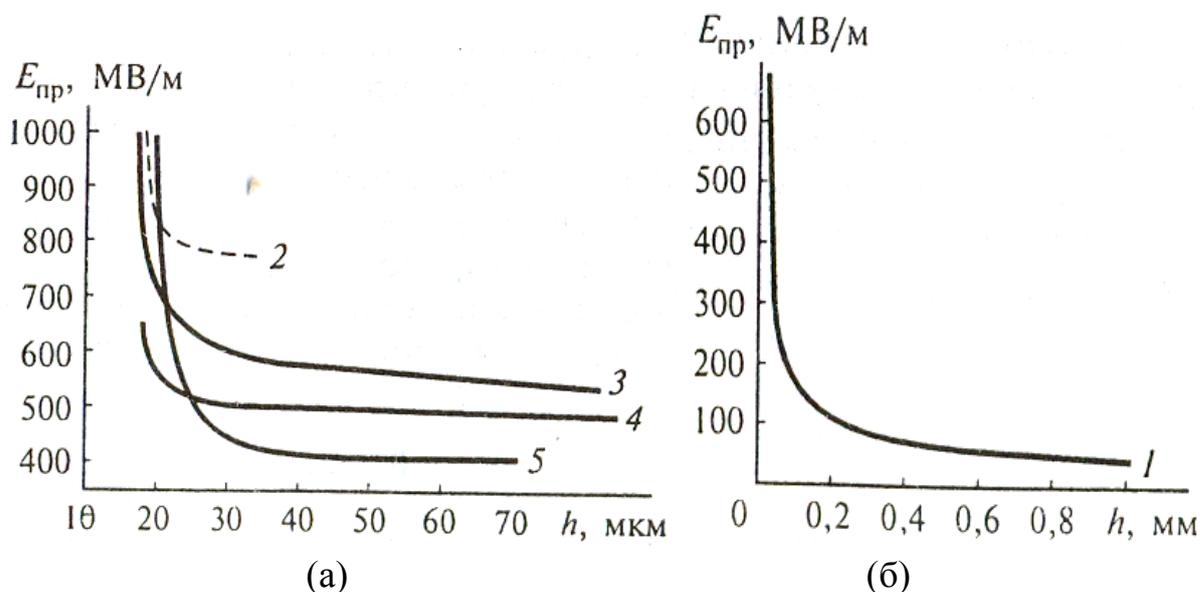


Рис. 4.2. Зависимость электрической прочности  $E_{\text{пр}}$  твердых диэлектриков от толщины  $h$ : 1,4 – полистирол; 2 – полиметилметакрилат; 3 – полипропилен; 5 – полиэтилен; пробой осуществлен: 1 – на частоте 50 Гц; 2 – 5 – на фронте одиночных стандартных импульсов напряжения

В случае *электрической формы пробоя* (рис. 4.2а) при толщине образцов  $h \leq 10-20$  мкм, у неорганических и органических диэлектриков наблюдается *электрическое упрочнение* – резкое возрастание  $E_{\text{пр}}$  при уменьшении  $h$ . Причиной электрического упрочнения является уменьшение средней длины пробега электрона  $\lambda$  при уменьшении толщины диэлектрика. При этом, в соответствии с выражением (4.1), для приобретения электроном энергии равной энергии ионизации диэлектрика требуется большая напряженность электрического поля. При  $h > 10-20$  мкм в однородном поле, в отсутствие разрядов на поверхности и в порах, в отсутствие объемных зарядов  $E_{\text{пр}}$  не изменяется с увеличением толщины образца.

При *электротепловой форме пробоя* (рис. 4.2б) нелинейный характер зависимости  $E_{\text{пр}}$  ( $h$ ) выражен значительно сильнее, чем в случае

электрической формы пробоя, так как с увеличением толщины образца уменьшается коэффициент теплопередачи от системы диэлектрик – электроды в окружающую среду (4.8). Из (4.10) и (4.11) следует, что  $E_{\text{пр}}$  диэлектрика обратно пропорциональна квадратному корню из его толщины  $h$ .

#### *Влияние пористости диэлектрика*

Наличие в диэлектрике пор, микротрещин, инородных включений и т.п., имеющих величину относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , отличную от  $\epsilon$  самого диэлектрика, приводит к увеличению в нем неоднородности электрического поля. В результате на локальных участках диэлектрика возрастает напряженность электрического поля, и пробой наступает при более низком напряжении. Электрическая прочность сильнопористых диэлектриков мало отличается от  $E_{\text{пр}}$  воздуха. Поэтому для увеличения  $E_{\text{пр}}$  пористых диэлектриков их пропитывают жидкими или воскообразными диэлектриками, электроизоляционными лаками или компаундами.

#### *Влияние площади электродов*

Электрическая прочность очень тонких образцов диэлектриков снижается с увеличением площади электродов. Это объясняется тем, что с увеличением площади электродов возрастает вероятность попадания под них слабых (дефектных) мест диэлектрика.

#### *Влияние числа слоев изоляции*

Электрическая прочность многослойной изоляции имеет экстремальную зависимость от числа тонких слоев (рис. 4.3). Тонкая (несколько микрометров) однослойная изоляция из неоднородного материала (например, бумаги, картона, высыхающих лаков) имеет невысокую  $E_{\text{пр}}$ , если величина частиц неоднородностей (например, пор) соизмерима с толщиной изоляции. При использовании двух-трех слоев изоляции  $E_{\text{пр}}$  возрастает, так как уменьшается вероятность попадания слабых (дефектных) мест под электроды. При дальнейшем увеличении числа слоев изоляции  $E_{\text{пр}}$  снижается ввиду ухудшения отвода тепла.

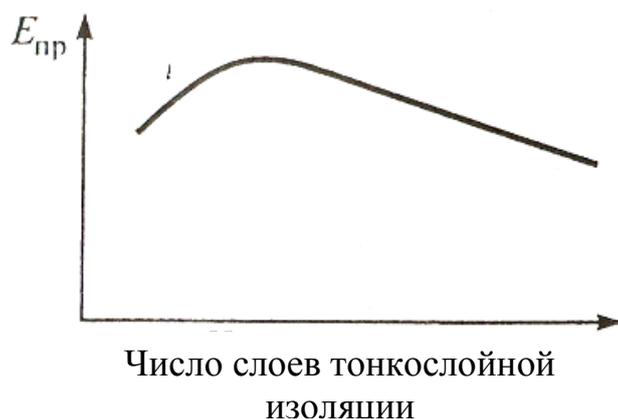


Рис. 4.3. Зависимость  $E_{пр}$  тонкослойной изоляции от числа слоев

### *Влияние частоты напряжения*

При электрической форме пробоя  $E_{пр}$  твердых диэлектриков то частоты приложенного напряжения не зависит. Однако при пробое на импульсах напряжения продолжительностью  $10^{-7}$  с и менее  $E_{пр}$  возрастает. Это связано с уменьшением вероятности образования электронных лавин при малом времени приложения напряжения.

В случае электротепловой формы пробоя с увеличением частоты  $E_{пр}$  снижается, так как возрастает количество выделяемого тепла в результате возрастающих диэлектрических потерь в соответствии с выражением (4.6).

### **Описание лабораторной установки МВ-002**

1. Внешний вид лабораторного стенда приведен на рис. 4.4–4.6. Стенд состоит из двух устройств, измерительного и высоковольтного, соединенных между собой блокировочным 14 и измерительным 13 кабелями.

2. Устройство высоковольтное служит для получения высокого напряжения, измерения толщины тонких испытуемых пленок с помощью измерительной головки, а также как защитная камера для проведения экспериментов.

3. На передней панели устройства измерительного (рис. 4.4) расположены цифровой индикатор выходного напряжения 15, кнопка "ПУСК" 17, кнопка "СБРОС" 19 и светодиод индицирующий событие пробоя 16.

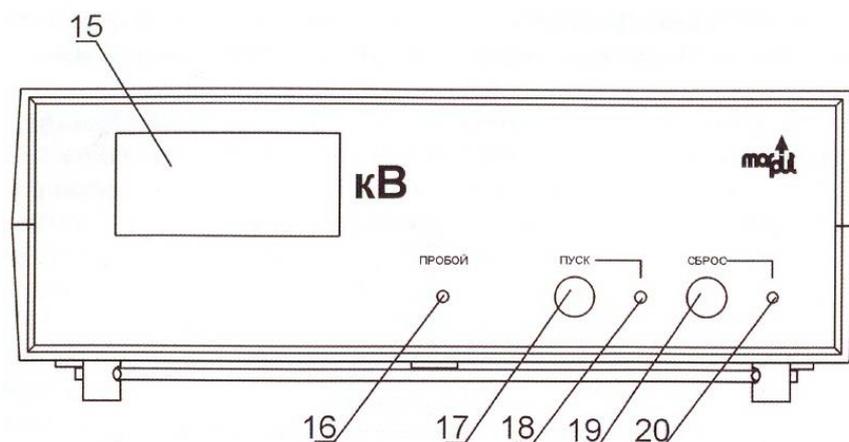


Рис. 4.4. Устройство измерительное. Вид спереди.

3. Сверху на высоковольтном устройстве (рис. 4.5) расположена измерительная головка 1 для измерения толщины образца. Внутри устройства в расположены измерительная камера, в которую введен подвижный стержень измерительной головки 3. На стержне расположены испытательные электроды четырех типоразмеров 4 и 5, которые меняются посредством вращения. Внутри измерительной камеры расположено устройство крепления испытуемого образца.

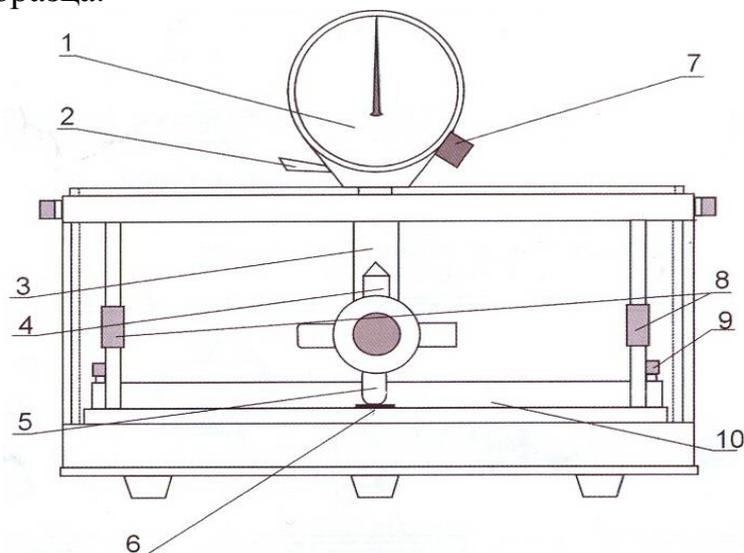


Рис. 4.5. Устройство высоковольтное. Вид спереди.

## Порядок и методика проведения лабораторной работы

### Подготовка установки к работе

1. На подвижном стержне измерительной головки в устройстве

высоковольтном отпустите крепежный винт и путем вращения установите вертикально вниз один из четырех испытательных электродов 4, 5 (рис. 4.5), закрутите крепежный винт.

2. Произведите грубую установку "О" головки измерительного блок путем вращения регулировочных винтов 8 (рис. 4.5), расположенных на опорных стойках измерительной камеры.

3. Опустите защитный щиток измерительного блока и произведите точную установку "О" измерительной головки путем вращения ручки коррекции 7 (рис. 4.5).

4. Включите питание.

5. Проверьте работу блокировки питания высоковольтного блока защитным щитком измерительного блока, для чего поднимите вверх защитный щиток. При этом индикаторы выходного напряжения высоковольтного блока должны погаснуть.

6. Подготовьте образцы диэлектрических материалов к испытаниям. Для испытания используются образцы прямоугольной или круглой формы. Отсутствие поверхностного пробоя и искажения результатов испытаний гарантируется во всем диапазоне испытательного напряжения при расстоянии между соседними точками пробоя или точкой пробоя и краем образца не менее 45 мм.

### **Последовательность проведения эксперимента на стенде МВ-002**

1. Выключите питание стенда
2. Плавно поднимите защитный щиток устройства высоковольтного.
3. Вращением винтов 9 (рис. 4.5) поднимите прижимную планку устройства крепления образца 10 (рис. 4.5).
4. Легким нажимом на боковой рычаг 2 (рис. 4.5) поднимите подвижный стержень вверх и введите между электродом и столом измерительной камеры испытуемый образец, после чего плавно отпустите боковой рычаг головки.
5. Вращением шипов опустите прижимную планку устройства крепления образца.
6. Плавно опустите защитный щиток устройства высоковольтного.
7. Зафиксируйте значение толщины образца по показаниям индикатор измерительной головки.
8. Включите питание стенда с помощью сетевого выключателя устройства измерительного.
9. Нажмите и отпустите кнопку "ПУСК" устройства измерительного.

При этом на цифровом индикаторе будут отображаться значения, линейно нарастающего испытательного напряжения и будет гореть соответствующий светодиод.

10. При возникновении пробоя (начинает мигать светодиод "ПРОБОЙ" и срабатывает звуковая сигнализация) зафиксируйте показания цифрового индикатора (гарантированное время фиксации значения напряжения пробоя 5 с).

**Примечание:** для предотвращения преждевременного выхода стенда из строя, при достижении значения испытательного напряжения 25 кВ и отсутствии пробоя образца, необходимо нажать на кнопку «СБРОС».

11. Нажмите и отпустите кнопку "СБРОС" высоковольтного блока. При этом показания цифрового индикатора обнуляются, и загорится светодиод "СБРОС".

12. Выключите питание стенда и извлеките испытуемый образец из высоковольтного устройства.

13. Установите в высоковольтное устройство новый образец диэлектрика и определите его пробивное напряжение, последовательно выполняя пункты 1–12.

### Описание лабораторной установки

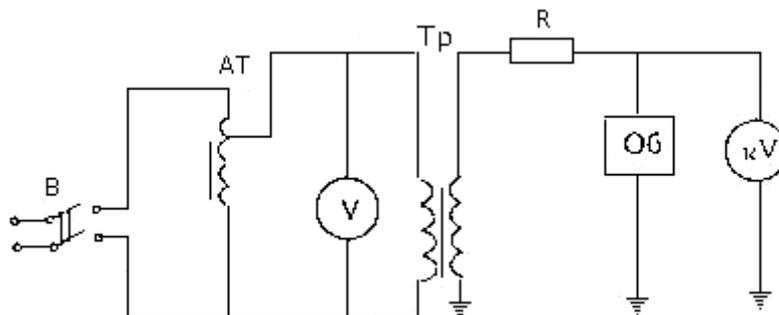


Рис. 4.1. Схема лабораторной установки

Схема состоит из следующих элементов и приборов:

АТ – лабораторный автотрансформатор, служащий для регулирования напряжения; V – вольтметр на низкой стороне повышающего трансформатора; Tr – высоковольтный трансформатор; R – резистор служит для защиты трансформатора от больших токов и большой крутизны среза напряжения при перекрытии объекта испытания; Об – объект испытания; кV – электрический киловольтметр С-100. Высоковольтная камера снабжена

блокировкой, исключающей подачу высокого напряжения при открытой двери камеры.

### Время приложения напряжения

Существенное значение при определении электрической прочности диэлектриков имеет *время приложения напряжения*.

График зависимости пробивного напряжения от времени действия напряжения показан на рис. 4.6.

С точки зрения длительности приложения напряжения различают кратковременное, минутное и длительное испытания.

Под кратковременным подразумевают обычно такое испытание, при котором напряжение на испытуемом образце повышают с равномерной скоростью 1-2% в секунду от ожидаемого пробивного значения до момента пробоя.

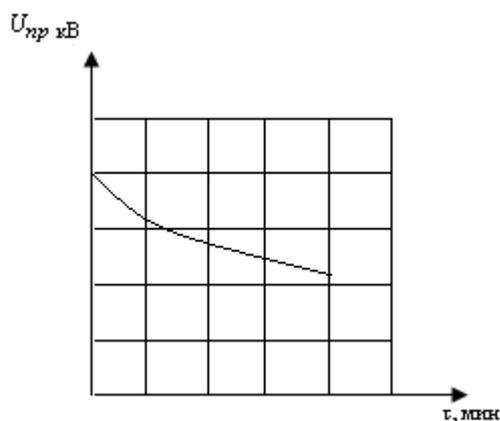


Рис. 4.6. График зависимости пробивного напряжения от времени действия напряжения

При минутном испытании к образцу быстро прикладывается заведомо более низкое (50%), чем пробивное, напряжение. Это напряжение выдерживают одну минуту. Затем, повышая напряжение на 10% от  $U_{пр}$  каждый раз повторяют выдержку, доводя такими ступенями величину напряжения до пробоя диэлектрика.

При длительном испытании на образец подается вначале напряжение, равное половине пробивного, затем через каждые 30 минут напряжение увеличивается ступенями в 5 % от  $U_{пр}$  до пробоя диэлектрика.

Кроме описанных методов, при испытаниях изоляции снимается «кривая жизни». На диэлектрик накладывается ступенями в 5% от кратковременного значения пробивного напряжения испытательное напряжение и в каждом случае фиксируется время, в течение которого образец выдерживает приложенное напряжение. Затем по значениям пробивного напряжения и времени приложения напряжения строят график.

## Последовательность проведения эксперимента на высоковольтной установке

Опыт проводится в следующем порядке:

- а) убедиться, что установка отключена;
- б) испытательные электроды подключить между выводом высоковольтного трансформатора и землей, поместить образец диэлектрика между электродами;
- в) выйти из ограждения и замкнуть блокировку безопасности;
- г) проверить, находится ли рукоятка АТ в нулевом положении, и если не находится, то установить ее в этом положении;
- д) включить выключатель В, т.е. подать напряжение на автотрансформатор и первичную обмотку высоковольтного трансформатора;
- е) с помощью АТ увеличить напряжение на испытуемом образце до наступления пробоя. Скорость повышения напряжения 1 кВ в секунду;
- ж) при пробое записать показания вольтметра и установить рукоятку АТ в нулевое положение.

### 1. Определение зависимости пробивного напряжения от толщины диэлектрика (конденсаторной бумага, воздух)

Толщину бумаги перед испытанием нужно измерить микрометром.

Изменение толщины диэлектрика в процессе испытания производится путем изменения числа слоев (листов) бумаги.

Опыт провести при постепенном увеличении числа слоев. Для каждой толщины пробивные напряжения и напряженности определять, как среднее из трех пробоев. Напряжение поднимать от нуля с равномерной скоростью до момента пробоя.

### Обработка и анализ полученных результатов

1. Определите пробивные напряжения для нескольких видов диэлектриков различной толщины. Результаты исследований занесите в таблицу 4.1. и 4.2.

Таблица 4.1

Влияние природы и толщины диэлектрика на пробивное напряжение и электрическую прочность

Диэлектрический материал	Толщина слоя, $\delta$ , мм	Количество слоев, $n$	Суммарная толщина диэлектрика,	Пробивное напряжение, $U_{пр}$ , кВ	Электрическая прочность, $E_{пр}=U_{пр}/h$ ,

			$h = \delta \cdot n, \text{ мм}$		кВ/мм
Материал 1					
Материал 2					
Материал 3					

Таблица 4.2

Число слоев конденсаторной бумаги	суммарная толщина мм	$U_{\text{пр}}$ кВ	$E_{\text{пр}}$ кВ/мм	Примечание
1. 10	0,95			Толщина одного слоя $l=0,095 \text{ мм}$
2. 20	1,9			
3. 30	2,85			
4. 40	3,80			
5. 50	4,75			
Воздух				
1.	2			
2.	4			
3.	6			
4.	8			
5.	10			

2. По окончании работы стенд должен быть отключен от питающей сети, текущий испытательный электрод 4, 5 должен касаться электрода 6 (рис. 4.5) (между ними не должно быть образца), а защитный щиток опущен вниз.

3. По данным таблицы постройте графики зависимостей  $U_{\text{пр}} = f(h)$  и  $E_{\text{пр}} = f(h)$  для исследованных диэлектриков.

### Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы.

*Цель работы.*

1. *Основные теоретические положения.*

2. *Результаты эксперимента.* Раздел должен содержать таблицу экспериментальных данных «Влияние природы и толщины диэлектрика на пробивное напряжение и электрическую прочность» и графики зависимостей  $U_{\text{пр}} = f(h)$  и  $E_{\text{пр}} = f(h)$  для исследованных диэлектриков.

4. *Выводы по работе.*

5. *Ответы на контрольные вопросы.*

Таблица 4.3

Металл	Работа выхода, эВ
Медь	4,4 – 5,24
Никель	5,03
Вольфрам	4,52
Алюминий	2,5 – 2,8

### Контрольные вопросы

1. Что называется пробоем диэлектрика?
2. Что называется пробивным напряжением  $U_{пр}$ ?
3. Что такое коэффициент запаса электрической прочности?
4. Как вычисляется электрическая прочность диэлектриков  $E_{пр}$ ?
5. Каков механизм электрического пробоя диэлектриков?
6. Какова причина теплового пробоя диэлектриков?
7. В чем заключается электрохимический пробой диэлектриков?
8. В чем заключается ионизационный пробой твердых диэлектриков?
9. Как зависит  $E_{пр}$  от природы диэлектрика?
10. Как зависит  $E_{пр}$  диэлектрика от температуры?
11. Как зависит  $E_{пр}$  диэлектрика от частоты напряжения?
12. Как зависит  $E_{пр}$  диэлектрика от его пористости?
13. Как зависит  $E_{пр}$  от толщины диэлектрика?
14. Как зависит  $E_{пр}$  диэлектрика от площади электрода?
15. Как зависит  $E_{пр}$  тонколистовой изоляции от числа слоев?
16. Влияние структуры материала на величину  $E_{пр}$ .
17. Принципы действия использованного в работе оборудования.
18. Как изменится электрическая прочность диэлектрика при увеличении площади прилегающих к нему электродов?
19. Как изменится  $E_{пр}$  при использовании различных материалов электродов (меди, стали, вольфрама, алюминий)?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Практическое определение температуры вспышки паров трансформаторного масла и вязкости жидких электроизоляционных материалов.

#### Основные теоретические положения

Из жидких электроизоляционных материалов наибольшее применение в электротехнике имеет трансформаторное масло, которым заливают силовые трансформаторы.

Его назначение двоякое: во-первых, оно, заполняя поры в волокнистой изоляции и промежутки между проводами обмоток и между обмотками и баком трансформатора, значительно повышает электрическую прочность изоляции; во-вторых, что также весьма важно, масло улучшает отвод тепла, выделяющегося за счет потерь мощности в обмотках и сердечнике трансформатора.

Другая важная область применения трансформаторного масла – масляные выключатели высокого напряжения. В этих аппаратах разрыв электрической дуги между расходящимися контактами выключателя происходит в масле или в находящихся под повышенным давлением газах, выделяемых маслом под действием высокой температуры дуги; это способствует охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению.

Трансформаторное масло применяется также для заливки маслонаполненных вводов, некоторых типов реакторов и реостатов и других электрических аппаратов.

Одним из наиболее существенных недостатков трансформаторного масла является его горючесть. *Пожарная опасность масла оценивается по температуре вспышки паров трансформаторного масла, которая должна быть не ниже  $+ 135^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что трансформаторное масло возгорается при температуре, превышающей температуру вспышки его паров не менее чем на  $30^{\circ}\text{C}$ .*

Таким образом, по температуре вспышки паров масла можно судить и о температуре возгорания масла. Поэтому, помимо того, что вспышка паров трансформаторного масла само по себе явление крайне нежелательное, так

как может повлечь за собой взрыв маслонаполненного аппарата, оно является также предшественником еще более крупной аварии – возгорания масла.

Определение температуры вспышки паров трансформаторного масла проводится в соответствии с ГОСТ 6356–52, основные положения которого следующие:

Испытуемое масло перед опытом высушивается и заливается в тигель.

В начале опыта нагревание масла ведут со скоростью 5–8°C в минуту. Когда же масло нагревается до температуры на 30°C ниже предполагаемой температуры вспышки паров, скорость нагревания снижают до 2°C в минуту.

При температуре масла на 10°C ниже ожидаемой температуры вспышки начинают проводить попытки на вспышку через каждые 2°C.

За температуру вспышки принимают ту температуру жидкости, при которой над поверхностью масла при поджигании появилось синее пламя.

После появления первой вспышки при повышенной на 2°C температуре производят вторую попытку на вспышку. Если при этом вспышки не произойдет, то опыт следует начинать снова, если же при повторном опыте вторичного воспламенения также не произойдет, а первичное повторится, то определение считается законченным и за температуру вспышки принимается показание термометра при первой вспышке.

При барометрическом давлении, отличном от 760 мм рт.ст. более чем на 15 мм, следует вводить поправку, вычисленную по формуле:

$$\Delta T = 0,91 \cdot (0,1 - P)(273 + T)$$

где P – фактическое барометрическое давление в Мпа·с., T – измеренная температура вспышки или воспламенения.

Поправку прибавляют к определенной из опыта температуре вспышки паров масла в случае, если фактическое барометрическое давление, ниже 760 мм рт.ст., и вычитывают, если давление выше 760 мм рт.ст.

### **Описание лабораторной установки и проведение эксперимента**

Определить температуру вспышки паров трансформаторного масла

Температура вспышки паров трансформаторного масла определяется с помощью аппарата ПТВ–1. Этот прибор состоит из электрического нагревателя, помещенного внутри корпуса. По дну и боковой поверхности стакана нагревателя уложена спираль. В стакан нагревателя установлен тигель, в который заливается масло. Внутри корпус заполнен теплоизоляционным материалом.

Сверху тигель закрывается крышкой в виде конусообразной камеры с отверстием для наблюдения за вспышкой паров масла. В камере на расстоянии порядка 2–3 мм от уровня, залитого в тигель масла расположена нихромовая спираль.

Переключателем «пределы нагрева» можно регулировать скорость нагрева масла. При нажатии на кнопку «вспышка» нихромовая спираль раскаляется (кнопку необходимо удерживать в течении 7-10 сек) и при определенной температуре пары трансформаторного масла вспыхивают. Температура фиксируется по термометру, расположенному на передней панели прибора.

### Нагревостойкость изоляционных материалов (техническое старение)

Под нагревостойкостью понимают способность материалов без повреждений и ухудшений электрических и механических свойств выдерживать действие повышенных, по сравнению с рабочей, температурой в течение времени, сравнимого со сроком эксплуатации. По нагревостойкости, при которой конструкция может длительно работать без ухудшения свойств, материалы разделяются на семь классов.

№ п/п	Обозначение класса нагревостойкости	Температура нагревостойкости	Группы электроизоляционных материалов, соответствующие данному классу нагревостойкости
1	У	°С (К) 90 (363)	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, органические пластмассы, поливинилхлорид, каучук
2	А	105 (378)	Волокнистые материалы, пропитанные масляно–смоляными и другими лаками. Эмалированные провода на поливинилацеталевых лаках.
3	Е	120 (393)	Синтетические волокна, слоистые пластики на терморезистивных связующих
4	В	130 (403)	На основе слюды, асбеста, стекловолкна в сочетании с органическим связующим
5	Ф	155 (428)	Те же материалы в сочетании с синтетическим связующим

6	Н	180 (453)	Кремний органический, эластомеры
7	С	>180	Фторофлогопит, керамика, стекло, неорганические материалы

## Определение вязкости жидких материалов

### Основные теоретические положения

Для жидких диэлектриков очень важной характеристикой является их вязкость. Вязкость трансформаторного масла определяет процесс теплоотдачи в трансформаторах. С ней связаны такие основные характеристики диэлектрика, как электропроводность и диэлектрические потери.

Вязкость(внутреннее трение) – одно из явлений переноса, свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В результате работа, затрачиваемая на это перемещение, рассеивается в виде тепла.

Существует абсолютная (или динамическая) вязкость  $\eta$  Паскаль – секунда (Па·с) и кинематическая вязкость  $\nu$ , (м<sup>2</sup>/с). В системе СИ размерность вязкости – Н·с/м<sup>2</sup>, 1Па·с=1Н·с/м<sup>2</sup>.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

где  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>.

При практических измерениях вязкости часто используются не абсолютные величины вязкости, а значения так называемой условной вязкости. Условная и абсолютная вязкости жидких веществ определяются специальными приборами – вискозиметрами. По своему устройству вискозиметры делятся на капиллярные, универсальные ротационные, ультразвуковые, вибрационные и электромагнитные. В данной работе для этой цели применяется вискозиметр ВЗ-4.

Сущность определения вязкости жидкости вискозиметром ВЗ-4 сводится к тому, что из сосуда через калиброванное отверстие в его дне выпускается определенный объем дистиллированной воды при температуре 20°С, а затем тот же объем испытуемой жидкости при соответствующей температуре и точно определяется время истечения воды  $\tau_{н20}$  и затем жидкости  $\tau_{ж}$ .

Время истечения определенного объема воды при температуре 20°С называют постоянной прибора или водяным числом вискозиметра.

Отношение времени истечения испытуемой жидкости  $\tau_{ж}$  ко времени истечения такого же объема воды при 20°С ( $\tau_{H_2O}$ ) и представляет собой величину вязкости ВУ, выраженную в условных градусах

$$ВУ = \tau_{ж} / \tau_{H_2O}$$

Кинематическую вязкость можно выразить в единицах ВУ через эмпирическую формулу:

$$ВУ = 0,135 \cdot v$$

Динамическая вязкость исследуемой жидкости вычисляется по формуле

$$\eta = v \cdot \rho$$

где  $v$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

### Проведение эксперимента

ВЗ-4 имеет сопло ( $\varnothing$  4мм, l 4 мм). Под ВЗ-4 ставят сосуд емкостью не менее 100 мл. Отверстие сопла закрывают, заполняют резервуар и оставляют в покое на 5-10 мин для выхода пузырьков воздуха. В ванну вискозиметра наливают воду и доводят ее до необходимой температуры. Данные измерения вносят в табл.1. Дополнительные данные берутся из таб. 2. Зависимость  $\eta = f(t^{\circ}C)$  показана на рис. 5.1

Таблица 5.1

Наименование материала	$t^{\circ}C$	$\tau_{ж}, c$	$\tau_{H_2O}, c$	ВУ	$v, m^2/c$	$\eta$ Па·с	$\rho_1$ Ом·м	$\eta$ $\rho_1$

Таблица 5.2

Характеристики трансформаторного масла МИ-2	
ВУ при 50 °С	9
Температура вспышки	135
$E_{пр}, kB/mm$	18-20
$tg \delta$ при 50 Гц, 100°С	0,003
$\rho$ при 20°С, Ом м	$10^{12}-10^{13}$
$\rho$ – плотность кг/м <sup>3</sup>	900

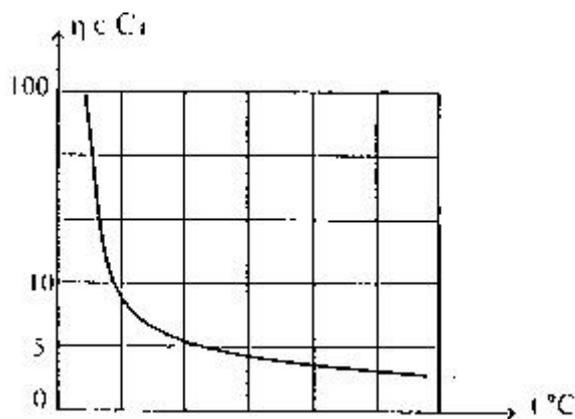


Рис. 5.1. Зависимость  $\eta = f(t^{\circ}\text{C})$

Примечание: Для соответствующих температур взять с кривой зависимости  $\rho_i = f(t^{\circ}\text{C})$  для данной жидкости из работы № 1.

### Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы:

*Цель работы.*

1. *Основные теоретические положения;*
2. *Расчеты вязкости и результаты эксперимента.* Раздел должен содержать таблицу 5.1.
3. *Выводы по работе;*
4. *Ответы на контрольные вопросы.*

### Контрольные вопросы

1. Что называется температурой вспышки паров трансформаторного масла?
2. Как регламентируется скорость повышения температуры при проведении опыта по определению температуры вспышки паров трансформаторного масла, его увлажненность и почему?
3. Классы нагревостойкости?
4. Как определяется вязкость жидких диэлектриков?
5. Что такое динамическая, кинематическая и условная вязкость?
6. Как связана вязкость с электропроводностью диэлектриков?
7. Какие методы определения вязкости вы знаете?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Цель работы

1. Изучить процессы, протекающие в проводниках в электрическом поле.
2. Исследовать влияние состава и температуры на сопротивление металлов и сплавов на их основе.

### Основные теоретические положения

Проводники электрического тока могут быть твердыми телами, жидкостями, а при выполнении ряда условий и газами.

К твердым проводникам относятся металлы (металлические материалы)- немолекулярные гомо- и гетероядерные химические соединения и материалы на их основе с преобладанием в них металлической компоненты связи над ковалентностью (и ионностью) в виде кристаллических тел, характеризующиеся комплексом специфических свойств (высокая электро- и теплопроводность, положительный температурный коэффициент электрического сопротивления, непрозрачность и металлический блеск, способность к пластической деформации).

По величине удельного сопротивления  $\rho$  металлические проводники делятся на следующие группы:

- сверхпроводники;
- криопроводники;
- металлы и сплавы с высокой удельной проводимостью  $\gamma$ ;
- металлы и сплавы со средним значением  $\rho$ ;
- металлы и сплавы с высоким значением  $\rho$ .

Металлические проводники – основной тип проводниковых материалов, применяемых в микроэлектронике. Согласно классической электронной теории в металлах образуется так называемый «*электронный газ*», представленный свободными электронами. Именно электрон в металле переносит электрический заряд. Под действием электрического поля электроны приобретают направленное (хаотическое) движение, что получило выражение в законе Ома, законе Джоуля – Ленца.

Плотность тока  $j$  в проводнике при средней скорости теплового движения электрона  $V_T$ , средней длине свободного пробега  $l_{cp}$

пропорциональна напряженности поля  $E$  (с учетом, что при движении электроны соударяются с узлами кристаллической решетки):

$$j = \frac{e^2 \cdot n \cdot l_{cp}}{m_0 \cdot V_T} E = \gamma E \quad , \quad (6.1)$$

$$\gamma = \frac{e^2 \cdot n \cdot l_{cp}}{m_0 \cdot V_T} \quad , \quad (6.2)$$

где,  $m_0$  – масса электрона.

Под действием электрического поля происходит рассеяние электронов под большими углами в процессе их упругих столкновений с узлами решетки. В результате этого возникает избыток быстрых электронов, движущихся против поля, и дефицит быстрых электронов с противоположным направлением скорости. Ускоряясь, полем на длине свободного пробега, свободные электроны в металле (и быстрые и медленные) приобретают добавочную скорость направленного движения.

Проводимость определяется в основном *средней длиной свободного пробега электронов*, которая, в свою очередь, зависит от структуры проводника, т.е. химической природы атомов, электронно-ядерной структурной организации и типа кристаллической решетки.

### **Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников**

В идеальном кристалле длина свободного пробега электронов равна бесконечности, а сопротивление электрическому току равно нулю. Свойство электрона свободно перемещаться в идеальной кристаллической решетке не имеет аналога в классической механике. Рассеяние, приводящее к появлению сопротивления, возникает в тех случаях, когда в решетке имеются дефекты строения.

В чистых металлах совершенной структуры единственной причиной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, является тепловое колебание атомных остовов (ионов) в узлах кристаллической решетки. Совершенно очевидно, что с *ростом температуры увеличиваются амплитуды тепловых колебаний атомных остовов*. А это, в свою очередь, *усиливает рассеяние электронов и вызывает возрастание удельного сопротивления*. Взаимодействие электрона с колеблющимся атомным остовом лишь незначительно изменяет импульс электрона. В теории

колебаний атомных остовов решетки следует учитывать не только амплитуду колебаний, но и частоту. Так максимальная частота тепловых колебаний определяется температурой Дебая  $D$ .

Эта температура зависит от длины и энергии связи между атомными остовами в узлах кристаллической решетки и является важным параметром твердого тела.

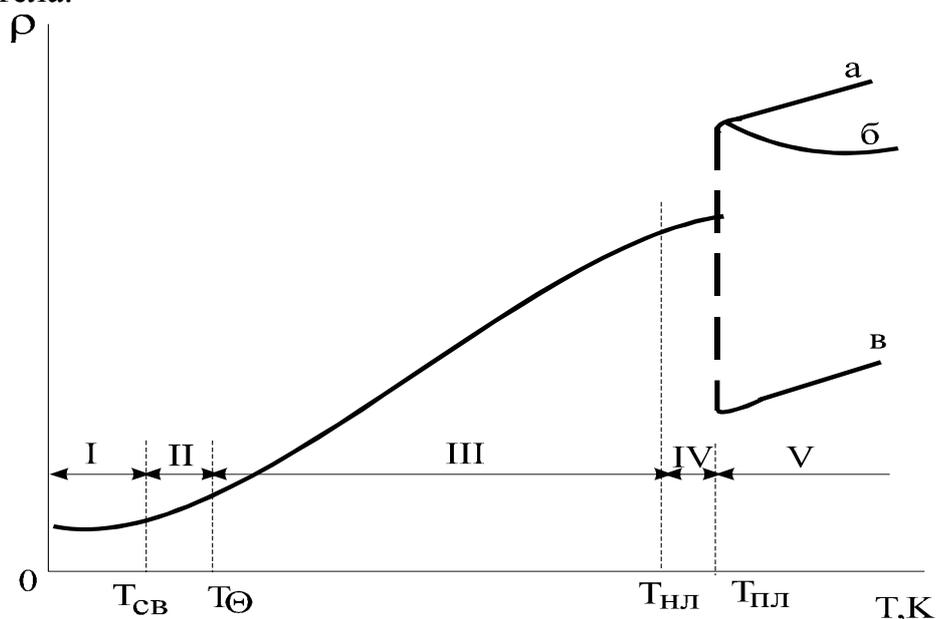


Рис. 6.1. Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры: а, б, в – варианты изменения удельного сопротивления у различных расплавленных металлов

В узкой области  $I$ , составляющей несколько кельвинов, у ряда металлов может наступить состояние сверхпроводимости (подробнее ранее) и на рисунке виден скачок удельного сопротивления при температуре  $T_{CB}$ . При стремлении температуры к  $0K$  удельное сопротивление также стремится к  $0$  (пунктирная кривая), а длина свободного пробега устремляется в бесконечность. Даже при обычных температурах длина свободного пробега электронов в металлах в сотни раз превышает расстояние между атомными остовами или ионами (таблица 6.1).

Таблица 6.1.

Средняя длина свободного пробега электронов при  $0^{\circ}C$  для ряда металлов  
( $l_{cp} \cdot 10^{-10}$ , м)

Li	110	Cu	420
Na	350	Ag	570
K	370	Au	410
Ni	133	Fe	220

В пределах переходной области *II* происходит быстрый рост удельного сопротивления  $\rho(T)$ .

При  $T > D$  удельное сопротивление металлов изменяется *линейно* с температурой (рис. 6.1, участок *III*) и простирается до температур, близких к точке плавления. Исключение из этого правила составляют ферромагнитные металлы, в которых имеет место дополнительное рассеяние электронов на нарушениях *спинового* порядка. Вблизи точки плавления, т.е. в области *IV*, в обычных металлах может наблюдаться некоторое отступление от линейной зависимости.

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один кельвин (градус) называют *температурным коэффициентом удельного сопротивления*:

$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (6.3)$$

Положительный знак  $\alpha_{\rho}$  соответствует случаю, когда удельное сопротивление в окрестности данной точки возрастает при повышении температуры.

### **Влияние примесей и других структурных дефектов на удельное сопротивление металлов**

Как отмечалось, причинами рассеяния электронов в металле являются не только тепловые колебания узлов решетки, но и статические дефекты структуры. Рассеяние на статических дефектах структуры не зависит от температуры. Поэтому по мере приближения температуры к абсолютному нулю сопротивление реальных металлов стремится к некоторому постоянному значению, называемому остаточным сопротивлением. Отсюда вытекает правило Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления:

$$\rho = \rho_m + \rho_{ост}, \quad (6.4)$$

т.е. полное удельное сопротивление металла есть сумма удельного сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки, и остаточного удельного сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на статических дефектах структуры.

Исключение из этого правила составляют сверхпроводящие металлы, в которых сопротивление исчезает ниже некоторой критической температуры.

Наиболее существенный вклад в остаточное сопротивление вносит рассеяние на примесях, которые всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнения, либо в виде легирующего (т.е. преднамеренно

вводимого) элемента. **Любая примесная добавка приводит к повышению  $\rho$ , причем сопротивление возрастает пропорционально концентрации примесных атомов.**

Иллюстрацией правила Маттиссена является рисунок 6.2, из которого видно, что температурные зависимости удельного сопротивления чистой меди и ее сплавов с малым количеством (приблизительно до 4 ат. %) индия, сурьмы, олова, мышьяка взаимно параллельны.

Различные примеси по-разному влияют на остаточное сопротивление металлических проводников. Рассеяние электронов на примесях зависит от различия в валентностях примесных элементов и металла (основа, растворитель). Чем больше разница в валентностях, тем выше рассеивание электронов на примесях. Отсюда следует, что влияние примесей не металлических элементов на снижение проводимости сказывается сильнее, чем влияние примесей металлических элементов.

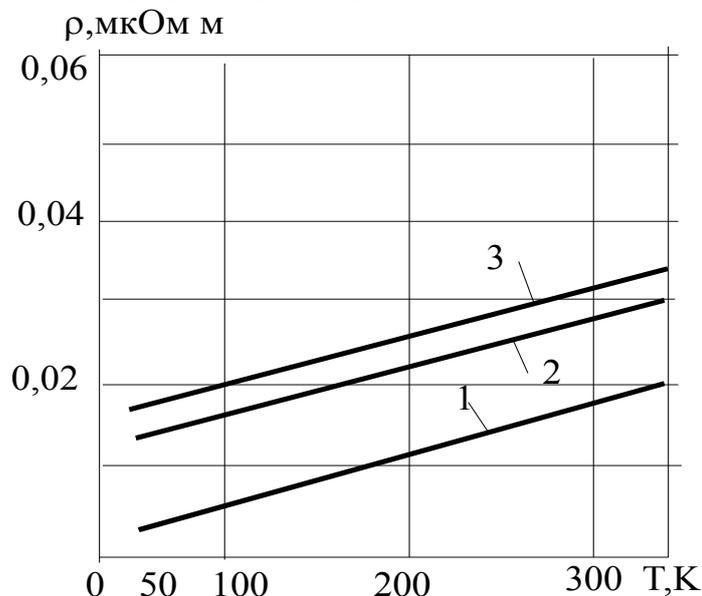


Рис. 6.2. Температурные зависимости удельного сопротивления сплавов меди типа твердых растворов, иллюстрирующие правило Маттиссена: 1 – чистая Cu; 2 – Cu – 1,03 ат. % In; 3 – Cu – 1,12 ат. % Ni

Помимо примесей некоторый вклад в остаточное сопротивление, вносят собственные дефекты структуры – вакансии (переход атома из узла кристаллической решетки на поверхность в результате испарения, либо перехода в междоузлие), атомы внедрения, дислокации, границы зерен. Концентрация точечных дефектов возрастает с температурой и может достигать высоких значений вблизи точки плавления.

Специфика твердых растворов состоит в том, что  $\rho_{ост}$  может существенно (во много раз) превышать тепловую составляющую.

Для многих двухкомпонентных сплавов изменение  $\rho_{ост}$  в зависимости от состава хорошо описывается параболической зависимостью вида

$$\rho_{ост} = Cx_Ax_B = Cx_B(1 - x_B), \quad (6.5)$$

где  $C$  – константа, зависящая от природы сплава;  $x_A$  и  $x_B$  – атомные доли компонентов в сплаве.

Так по закону Нордгейма в бинарных твердых растворах А – В остаточное сопротивление увеличивается при добавлении атомов В к металлу А. В непрерывном ряду твердых растворов удельное сопротивление тем больше, чем дальше по своему составу сплав от чистых компонентов. Остаточное сопротивление достигает своего максимального значения при равном содержании каждого компонента ( $x_A = x_B = 0,5$ ). При условии, что ни один из компонентов сплава не принадлежит к числу переходных или редкоземельных элементов.

Если в твердом растворе, компонентами являются металлы переходной группы (рис. 6.3) то наблюдается существенно большая величина остаточного сопротивления, что связано с переходом части валентных электронов на внутренние незаполненные  $d$  – оболочки атомов переходных металлов. Кроме того, в подобных сплавах максимальное  $\rho$  часто соответствует концентрациям, отличным от 50%.

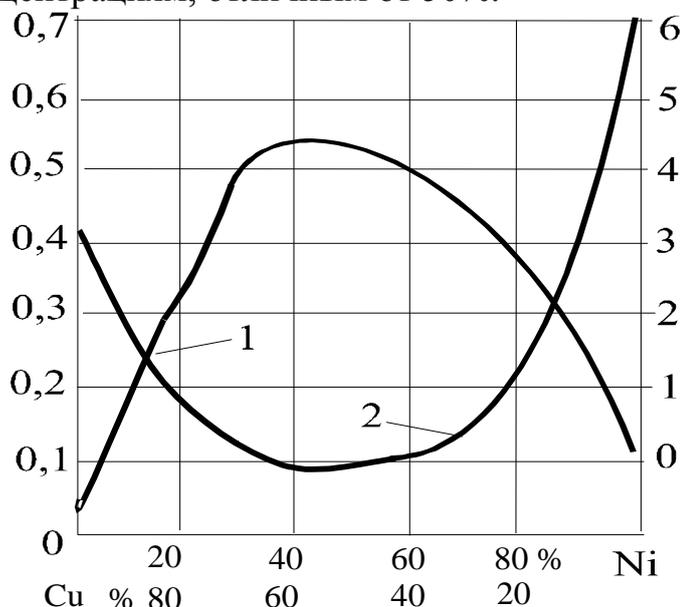


Рис. 6.3. Зависимость удельного сопротивления (1) и температурного коэффициента удельного сопротивления (2) медно-никелевых сплавов от процентного содержания компонентов

**Чем больше удельное сопротивление сплава, тем меньше его  $\alpha_\rho$**  Это вытекает из того, что в твердых растворах  $\rho_{\text{ост}}$ , как правило, существенно превышает  $\rho_T$  и не зависит от температуры. Поэтому  $\alpha_\rho^{\text{спл}}$  может быть значительно ниже  $\alpha_\rho$  чистого металла. На этом основано получение термостабильных проводящих материалов. В некоторых сплавах при определенных соотношениях компонентов наблюдается отрицательный  $\alpha_\rho$  (у константана).

Такое изменение  $\rho$  и  $\alpha_\rho$  от процентного содержания компонентов сплава, по-видимому, можно объяснить тем, что при более сложном составе и структурах по сравнению с чистыми металлами сплавы нельзя рассматривать как классические металлы, т.е. изменение проводимости их обуславливается не только изменением длины пробега свободных электронов, но в некоторых случаях и частичным возрастанием концентрации носителей заряда при повышении температуры. Сплав, у которого уменьшение длины свободного пробега с увеличением температуры компенсируется возрастанием концентрации носителей заряда, имеет нулевой температурный коэффициент удельного сопротивления.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из персонального компьютера, измерительного блока и набора образцов проводниковых материалов, установленных в термокамере внутри измерительного блока. Измерительные сигналы поступают в цифровом коде с измерительного блока в персональный компьютер, с помощью которого осуществляется управление процессом измерения температурной зависимости сопротивления проводниковых материалов и обработка результатов измерения. В измерительном блоке осуществляется преобразование сопротивлений образцов в интервал времени, информация о котором передается в ПК.

### Последовательность проведения исследования

1. Открыть ярлык «Cond\_xrusb.exe» на рабочем столе ПК
2. Задать температурные параметры исследования
3. Произвести измерение

В этом режиме происходит измерение сопротивления установленных образцов. На экране ПК в это время индицируется изменение температуры, и

строятся графики зависимостей сопротивления образцов от температуры (рис. 6.4).

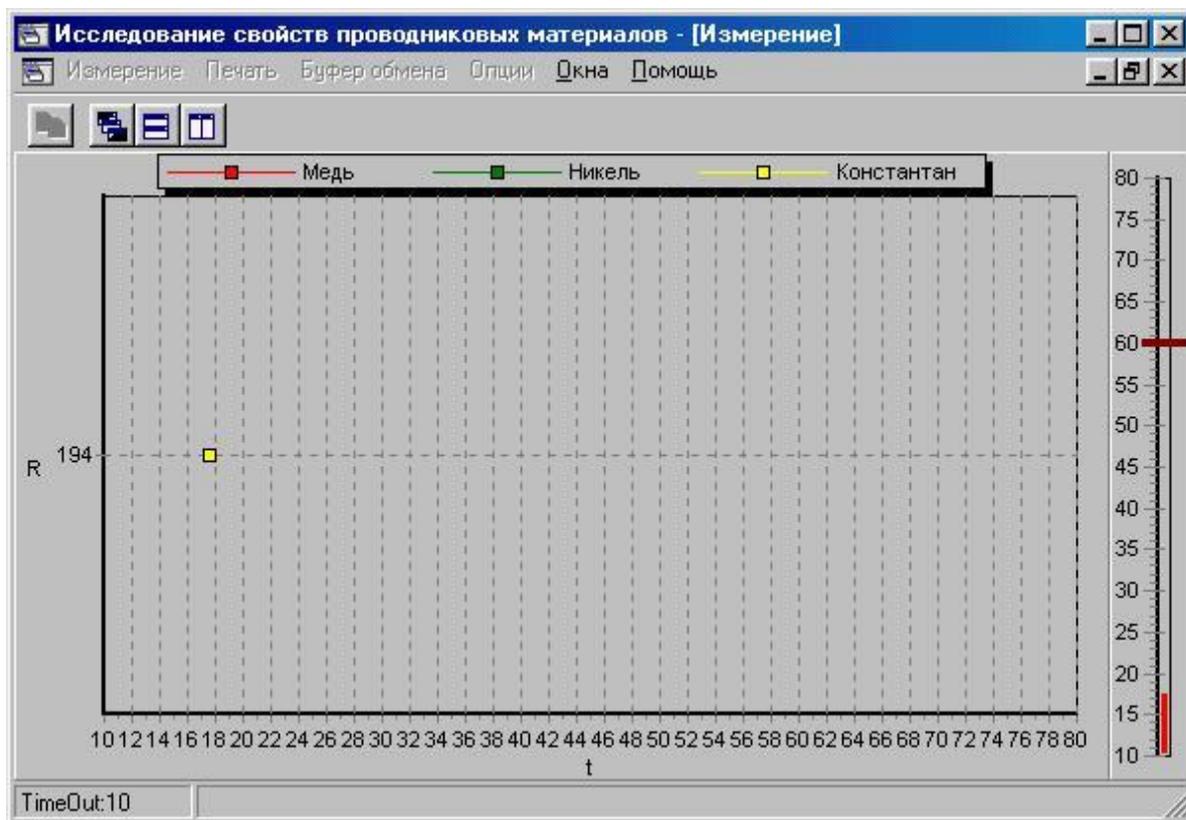


Рис. 6.4. Вид экрана в режиме *Измерение*

После проведения измерений результаты запишутся в базу данных, т.е. в таблице (первичное окно программы) появится новая запись с датой проведения измерений. Чтобы просмотреть полученные данные, следует либо нажать на кнопку «Просмотр», либо два раза щелкнуть мышкой на интересующей строке.

#### 4. Произвести обработку и анализ полученных результатов

Этот режим работы позволяет просмотреть измеренные данные в различных вариантах представления и сформировать отчет о проделанной работе. При активизации этой команды на экране появляется окно, изображенное на рисунке 6.5

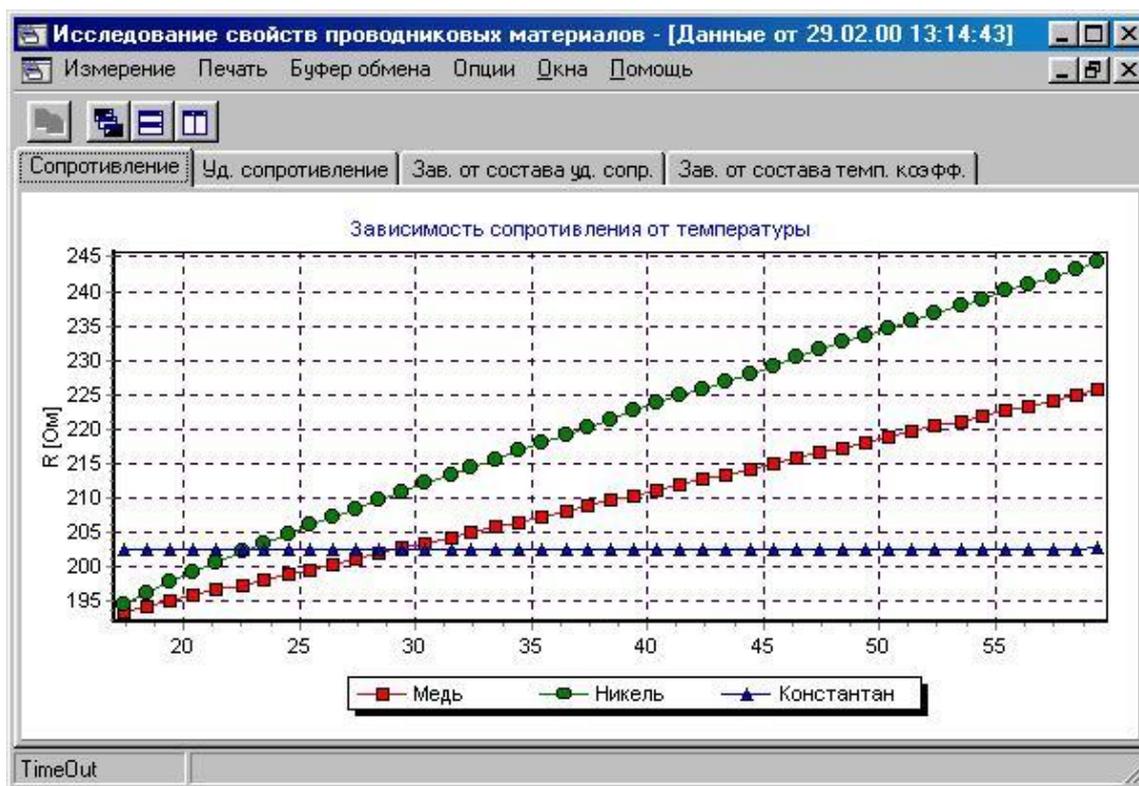


Рис. 6.5. Вид экрана в режиме просмотра

Здесь имеются закладки, переключая которые, можно представить данные в различной форме.

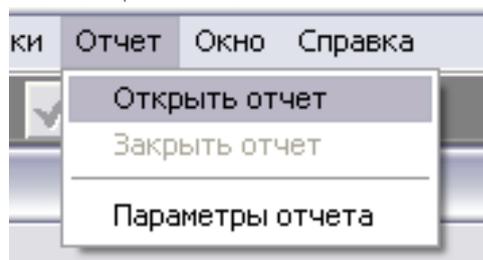
#### 5. Сформировать отчет

### Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы.

1. Цель работы
2. Основные теоретические положения;
3. Результаты эксперимента;
4. Выводы по работе;
5. Ответы на контрольные вопросы.

Открыть отчет при помощи меню:



После нажатия кнопки «Открыть», диалоговое окно закрывается и активизируется соответствующее приложение редактора с открытым файлом отчета, а в окнах просмотра лабораторной работы появляются кнопки . Эти кнопки позволяют скопировать соответствующий элемент приложения в отчет или в буфер обмена (кнопки появляются в районе копируемого элемента).

При помощи вышеуказанных операций формируется отчет по работе, содержащий таблицы с соответствующими им графиками, параметры образцов и вывод по полученным данным. Все отчеты хранятся в папке \Otc.

### Тест

1. Электропроводность и теплопроводность металлов являются:  
зависимыми величинами;  
независимыми величинами.
2. Отношение удельной теплопроводности к удельной проводимости в металлах при комнатной и более высоких температурах является:  
постоянной величиной;  
непостоянной величиной.
3. В квантовой теории проводимости металлов используется:  
статистика электронов Максвелла-Больцмана;  
статистика электронов Ферми.
4. Энергия Ферми (уровень Ферми) определяет:  
максимальную энергию, которую может иметь электрон при 0К;  
среднюю энергию, которую может иметь электрон при 0К;  
минимальную энергию, которую может иметь электрон при 0К.
5. Электрохимический потенциал металла:  
зависит от уровня Ферми;  
не зависит от уровня Ферми.
6. Избыток энергии, получаемый электронами за счет теплового движения, составляет:  
сотни электронвольт;  
единицы электронвольт;  
сотые доли электронвольта.
7. Распределение электронов по энергиям определяется:  
только вероятностью заполнения уровней;  
только плотностью квантовых состояний в зоне;  
и тем, и другим.
8. В процессе электропроводности в металлах принимают участие:

все свободные электроны;  
небольшая часть их, имеющая энергию, близкую к энергии Ферми.

9. Технические металлы являются:

поликристаллами;  
монокристаллами.

10. В идеальном кристалле металла длина свободного пробега электрона равна:

межатомному расстоянию;  
бесконечности.

11. Температурная зависимость удельного сопротивления металлов:  
линейна во всей области температур;  
имеет нелинейные участки в области низких температур.

12. При плавлении металлов их удельное сопротивление:  
не изменяется;  
изменяется незначительно;  
изменяется примерно в 1,5-2 раза.

13. Наличие дефектов:  
не влияет на удельное сопротивление металлов;  
влияет на удельное сопротивление металлов.

14. Примесная добавка:  
уменьшает удельное сопротивления;  
увеличивает удельное сопротивление.

15. Чем больше удельное сопротивление сплава:  
тем меньше его температурный коэффициент удельного сопротивления;  
тем больше его температурный коэффициент удельного сопротивления.

16. Температурный коэффициент удельного сопротивления в диапазоне от характеристической температуры до ниже температуры плавления:

постоянен;  
возрастает с ростом температуры;  
уменьшается с ростом температуры.

17. В твердом растворе:  
сохраняется одна решетка с первоначальными размерами;  
присутствуют обе решетки;  
одна решетка, но с измененными первоначальными линейными размерами.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

#### Цель работы

1. Изучить процессы, протекающие в сегнетоэлектриках под действием электрических полей;
2. Исследовать влияние температуры, напряженности поля на характеристики сегнетоэлектриков.

#### Основные теоретические положения

Приборы на основе активных диэлектриков, к числу которых относятся: *сегнето-*; пьезо- и пироэлектрики, электреты, жидкие кристаллы, электро- магнито-, акустооптические материалы и др., обеспечивают генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, запоминание или преобразование информации.

В большинстве случаев активные диэлектрики классифицируются по роду физических эффектов, которые можно использовать для управления свойствами материалов. Наиболее универсальны в этом плане сегнетоэлектрики, которые сочетают в себе свойства пьезо- и пироэлектриков, электрооптических и нелинейно-оптических материалов. Вместе с тем сегнетоэлектрики обладают рядом специфических, только им присущих свойств. Важнейшим из них является *спонтанная поляризация* и *нелинейное* изменение поляризации при воздействии электрического поля или механических напряжений.

*Сегнетоэлектриками* называются материалы, которые обладают спонтанной поляризацией (самопроизвольной) в определённом интервале температур.

*Спонтанная поляризация* – поляризация, вызванная смещением частиц – ионов в ионных кристаллических решётках или полярных радикалов молекул, в отсутствие электрического поля в определённом интервале температур *ниже точки Кюри  $T_c$* .

Классическими представителями сегнетоэлектриков являются дигидрофосфаткалия ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), нитрат натрия ( $\text{NaNO}_2$ ), соединения типа  $\text{ABO}_3$ , где А – двухзарядные катионы (Ba, Ca, Pb, Zr), В – четырехзарядный

катион (Ti), триглицинсульфат  $((\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4)$ , сегнетова соль  $(\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$  и др.

Соединения типа  $\text{ABO}_3$  имеют структуру перовскита, представленную на рис. 8.1. Она характеризуется трехмерным каркасом из октаэдров  $\text{BO}_6$ , внутри которых находятся катионы В(Ti). В пустотах между октаэдрами располагаются крупные катионы А. Причина появления сегнетоэлектрических свойств заключается в том, что центры тяжести ионов титана смещены относительно геометрических центров кислородных октаэдров, что создает электрическую декомпенсацию подрешеток положительно и отрицательно заряженных ионов.

Ионные сегнетоэлектрики имеют структуру элементарной ячейки перовскита ( $\text{CaTiO}_3$ ). К ним относятся титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ , титанат свинца  $\text{PbTiO}_3$  и др. Все химические соединения этой группы нерастворимы в воде и обладают значительной механической прочностью. Изделия из них получают по керамической технологии.

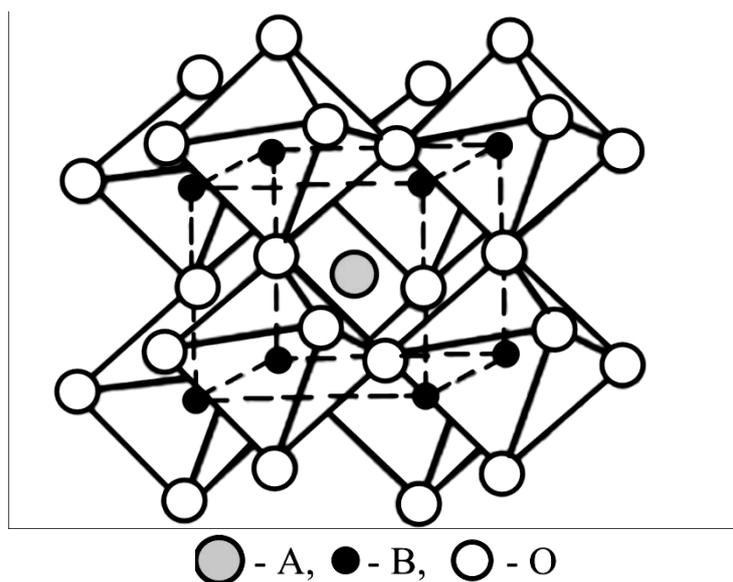


Рис. 7.1. Структура типа перовскита

Элементарная ячейка титаната бария при высоких температурах имеет форму куба, в узлах которого расположены ионы бария, в серединах граней ионы кислорода, образуя кислородный октаэдр, в центре ион титана (рис. 7.2а).

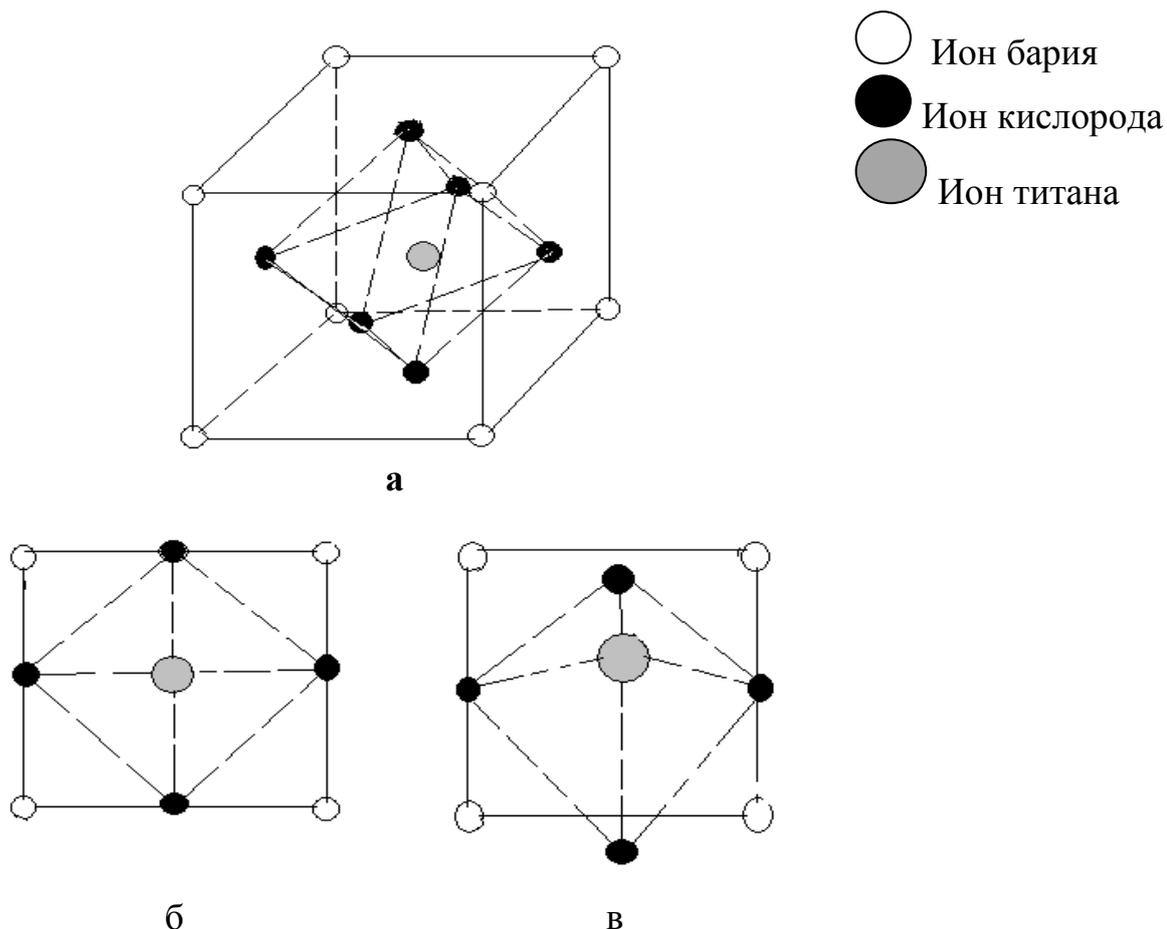


Рис. 7.2. Элементарная ячейка титаната бария (а) и её проекции (б) и (в) выше и ниже температуры Кюри

В результате теплового движения ион титана равновесно находится вблизи каждого иона кислорода, следовательно, электрический момент ячейки ввиду её симметричности равен нулю. При понижении температуры ниже точки Кюри, ион титана, благодаря энергии теплового движения, оказывается вблизи ионов кислорода. В этом же направлении смещаются ионы бария. Ион кислорода, находящийся напротив, смещается в противоположном направлении. В результате этих смещений ионов кубическая решётка незначительно деформируется в тетрагональную, и приводят к образованию значительного электрического момента (см. рис. 7.2б, в). Возникает спонтанная поляризация, в результате которой элементарные ячейки с одинаково направленными электрическими моментами образуют небольшие объёмы – домены.

*Домен* – это совокупность элементарных ячеек, имеющих общий вектор спонтанной поляризации. Вектора различных доменов имеют различную направленность, поэтому суммарно поляризация всего образца равна нулю.

Таким образом, сегнетоэлектрики обладают наряду с линейными видами поляризации (электронной и ионной) спонтанной поляризацией, которая проявляется в определенном температурном интервале ниже точки Кюри  $T_c$ .

Направление спонтанной поляризации может быть изменено с помощью внешнего электрического поля или механических воздействий.

Поляризованное состояние сегнетоэлектриков является неравновесным и метастабильным. Со временем остаточная поляризация постепенно уменьшается по экспоненциальному закону из-за разориентации направлений поляризации и изменения доменной структуры.

В переменных полях у сегнетоэлектриков наблюдается явление диэлектрического гистерезиса, т.е. отставание изменения электрической индукции (смещения)  $D$  от напряженности электрического поля  $E$ . Гистерезисный цикл является следствием доменного строения сегнетоэлектриков. Ориентация доменной структуры в направлении электрического поля требует затрат электрической энергии, что указывает на дополнительный механизм диэлектрических потерь. Величина потерь на гистерезис характеризуется площадью предельного гистерезисного цикла, показанного на рис. 7.3.

*Если кристаллический образец поместить в электрическое поле, то векторы дипольных моментов отдельных доменов начнут ориентироваться в направлении силовых линий поля. Зависимость поляризации  $P$  от напряжённости внешнего электрического поля  $E$  в сегнетоэлектриках нелинейная и при циклическом изменении напряжённости поля имеет вид характерной кривой – петли Гистерезиса.*

Основные параметры, характеризующие предельный цикл петли гистерезиса:  $\pm P_s$ ,  $\pm P_r$  – спонтанная и остаточная поляризации на обкладках конденсатора при значении напряженности электрического поля  $\pm E_s$  и при снятии внешнего поля  $E=0$  соответственно;  $\pm E_c$  – коэрцитивная сила (коэрцитивное поле), т.е. напряженность поля, при которой заряд (поляризация  $P$ ) становится равным нулю.

Приложение электрического поля к много доменному образцу сегнетоэлектрика вызывает вначале рост его поляризации по закону, близкому к линейному, так как слабые электрические поля не приводят к росту зародышей доменов с направлением поляризации  $P$ , совпадающим с направлением поля. При дальнейшем увеличении  $E$  начинаются процессы роста зародышей доменов и переориентации диполей, приводящее к интенсивному росту поляризации. При достижении некоторой величины напряженности поля ( $E_s$ ) все домены оказываются ориентированными в

направлении поля. Дальнейший рост поляризации с увеличением поля происходит линейно за счет электронной и ионной составляющих поляризации. При уменьшении напряженности поля до нуля переориентации диполей не происходит и сохраняется остаточная поляризация  $P_r$ . Обратная переориентация диполей начинается только при  $E < 0$ , что приводит к уменьшению поляризации до нуля ( $-E_c$ ). Дальнейшее увеличение поля вызывает полную переориентацию диполей. При завершении периода изменения электрического поля завершается и гистерезисный цикл рис. 7.3.

Для характеристики свойств сегнетоэлектриков в различных условиях работы используют следующие определения диэлектрической проницаемости:

– статическая диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon_{ст} = \frac{D}{\varepsilon_0 E}, \quad (7.1)$$

Где  $D$ , Кл/м<sup>2</sup>,  $E$ , В/м – координаты точек основной кривой поляризации (см. пунктирную линию на рис. 7.3);  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;

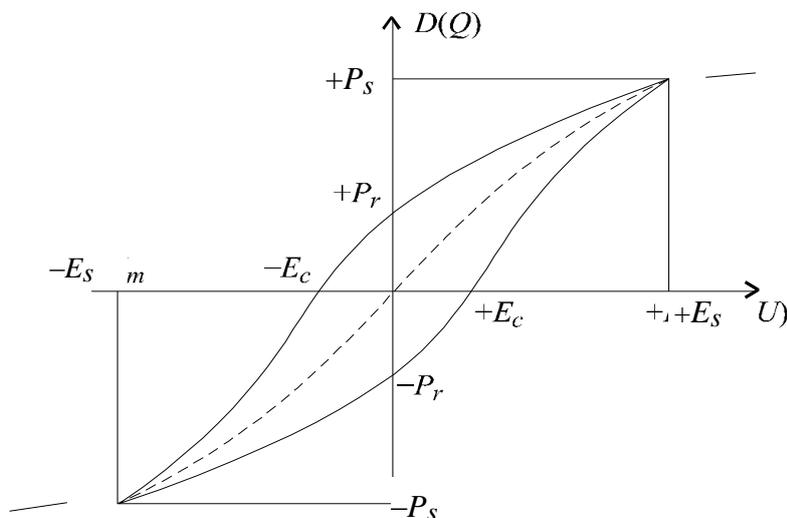
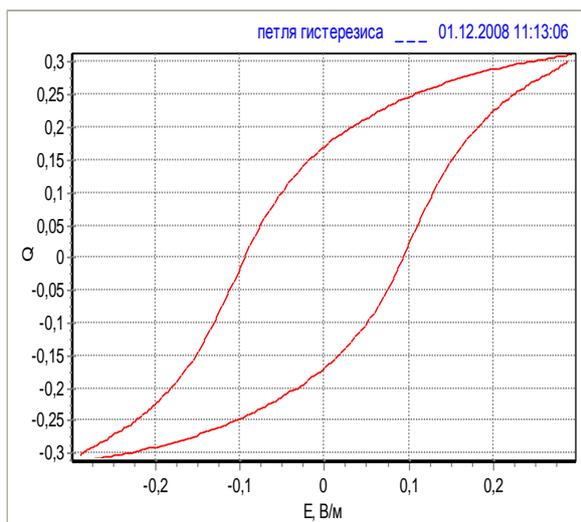
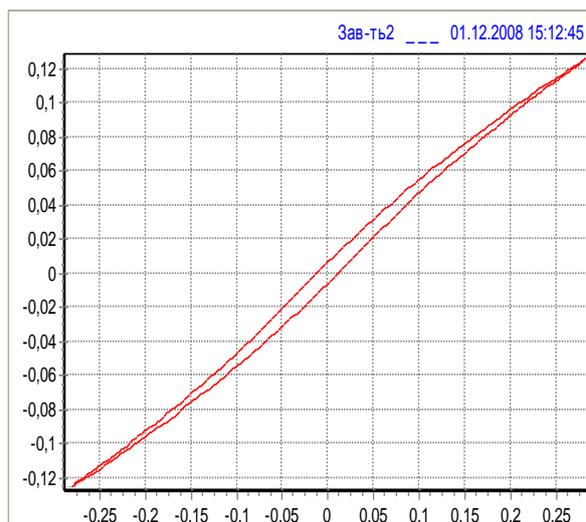


Рис. 7.3. Петля гистерезиса

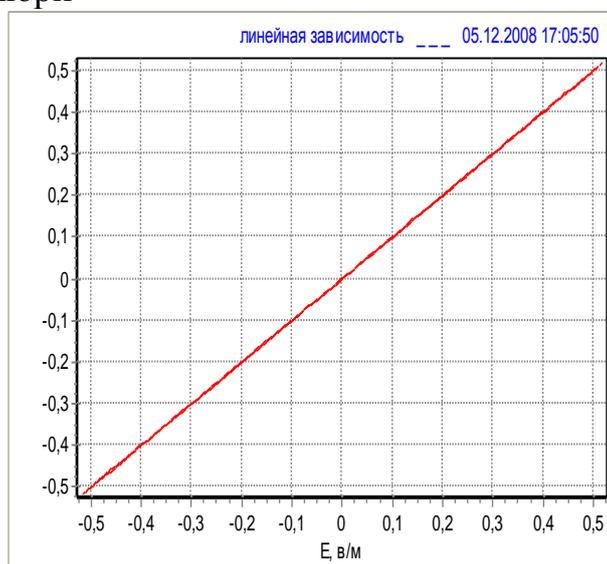
Для сегнетоэлектриков характерны большая (до несколько тысяч) диэлектрическая проницаемость и её зависимость от температуры. Диэлектрическая проницаемость достигает максимального значения при температуре Кюри (точка Кюри), при которой спонтанная поляризация исчезает, сегнетоэлектрик теряет свои свойства за счет распада доменной структуры.



Нелинейная зависимость – ниже точки Кюри



Линейная зависимость – точка Кюри



Линейная зависимость – выше точки Кюри

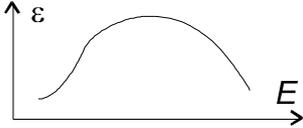
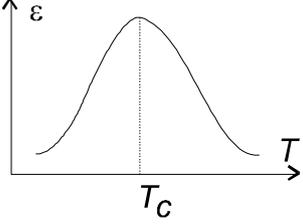
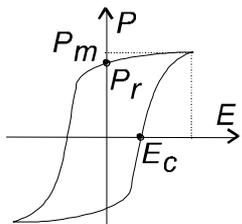
Рис. 7.4. Зависимости заряда ( $P$ ) от напряженности электрического поля  $E$ , В/м

Основные свойства и применение сегнетоэлектриков приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

#### Свойства и применение сегнетоэлектриков

Свойства	Применение
Большие значения диэлектрической проницаемости $\epsilon$ ( $10^5$ и более)	Малогабаритные конденсаторы с большой удельной емкостью, включая в интегральном исполнении.

<p>Нелинейная зависимость <math>\varepsilon</math> (<math>E</math>) в сегнетоэлектрической фазе (до <math>T_c</math>)</p> 	<p>Вариконды для стабилизации напряжения, умножения частоты, преобразования синусоидального напряжения в импульсное, для гашения тока.</p>
<p>Нелинейная зависимость <math>\varepsilon</math> (<math>T</math>)</p> 	<p>Диэлектрические термометры, термоконденсаторы с четко выраженными и размытыми фазовыми переходами для определения физиологических параметров желудочно-кишечного тракта, для стабилизации кварцевых резонаторных электронных часов.</p>
<p>Прямоугольная петля гистерезиса.</p>  <p>Коэффициент прямоугольности: <math>K_n = \frac{P_r}{P_m} \approx 1</math></p>	<p>Запоминающие устройства с потенциальным принципом записи и сохранения информации при отключении питания и многократном считывании.</p>

### Описание лабораторной установки

Автоматизированная лабораторная установка предназначена для автоматизированного исследования диэлектрических свойств сегнетоэлектриков и их температурных зависимостей. А именно измерение параметров петли гистерезиса, температурных и полевых зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Образец исследуемого материала установлен в термостате, расположенном в измерительном блоке.

Измерительный блок (рис. 7.5) включает в себя схему формирования измерительного сигнала воздействия, которая используется для подачи переменного напряжения на исследуемый образец, схему измерений (модифицированная схема Сойера-Тауера), термостат.

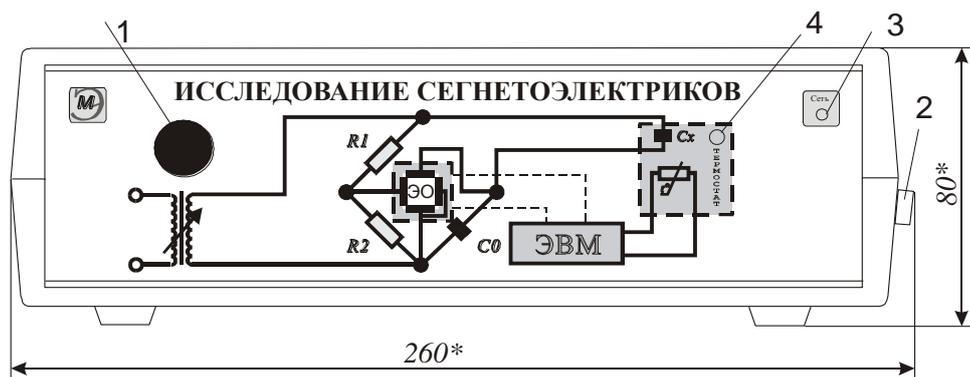


Рис. 7.5. Вид на лицевую панель измерительного блока: 1 – ручка установки амплитуды сигнала; 2 – тумблер «Сеть»; 3 – индикатор включения питания; 4 – индикатор включения нагрева термостата.

С помощью ручки 1 регулируется амплитуда напряженности электрического поля в образце. Индикатор 4 включается в режиме измерения температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Нагрев осуществляется в импульсном режиме с интервалом 1 – 2 секунды.

Программное обеспечение управляет процессом измерений и позволяет рассчитывать параметры и характеристики исследуемого материала. Оно представлено приложением – *Segnet.exe*

Программное обеспечение построено по принципу многооконного интерфейса. Центральное место занимает окно с упрощенными схемами измерений, которые реализованы в реальном измерительном блоке. Таких схем может быть три. На каждой схеме присутствует свой набор управляющих и регистрирующих инструментов.

### Схемы измерений

*Схема измерений № 1* предназначена для проведения измерений формы сигналов, пропорциональных напряженности электрического поля и заряду на конденсаторе  $C_0$ . Осциллограф здесь двухканальный, поэтому видно сразу два сигнала.

*Схема измерений № 2* предназначена для проведения измерений зависимости сигналов, пропорциональных напряженности электрического поля ( $U_x$ ) и заряду на конденсаторе  $C_0$  ( $U_y$ ), друг от друга. На горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение  $U_x$ , а на вертикальные –  $U_y$ , т.е. отображается петля гистерезиса.

Заряд сегнетоэлектрического конденсатора  $C_x$  будет

$$Q = U_Y C_0, \quad (7.2)$$

а напряженность поля в сегнетоэлектрике –

$$E = \frac{U_X}{h}, \quad (7.3)$$

где  $h$  – толщина образца.

*Схема измерений № 3.* Эта схема предназначена для проведения температурных измерений. Образец  $C_x$  помещен в нагреватель. В качестве основного измерительного прибора выступает измеритель емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Зная емкость, нетрудно рассчитать статическую диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon_{ст} = \frac{C_x h}{\varepsilon_0 S}, \quad (7.4)$$

где  $S$  – площадь образца;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

### **Последовательность и методика проведения эксперимента**

#### **1. Снятие зависимости заряда сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля**

1.1. Создать рабочую тетрадь.

1.2. Установить схему №2.

1.3. Во вкладке "Таблицы" нажать кнопку «Новое измерение». В появившемся диалоговом окне введите название измерения.

1.4. Рассчитать заряд сегнетоэлектрика ( $Q$ ) и напряженность электрического поля ( $E$ ). Для этого необходимо открыть вкладку «формулы». Выделить измерения и нажать кнопку «новая». Появится окно «построитель выражений». В строке «название» вписываем символ искомого значения. По очереди выделяем необходимые переменные и функции и нажимаем кнопку «вставить». Вписываем размерность в одноименную строку, нажимаем кнопку «ОК» и появится строка с новым выражением. Внизу данного окна к таблице с эмпирическими данными, полученными в эксперименте, добавляется столбец с расчетными значениями.

1.5. Снять зависимость заряда сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля при нескольких температурах, включая интервалы до и после точки Кюри, т.е. получить петли гистерезиса при различных температурах.

1.6. Построить 3 графические зависимости как на рис. 7.4. Для этого переходим во вкладку «графики» и нажимаем кнопку «новый», появляется окно «построение графиков». Выделяем измерение. В разделе «кривые» нажимаем добавить. Справа данного окна выбираем значение по оси ординат Q, а по оси абсцисс E.

## **2. Измерение петли гистерезиса. Получение основной кривой поляризации.**

Измерения проводятся по схеме №2. *Основная кривая поляризации* строится по значениям точек максимума и минимума частных петель гистерезиса:

2.1. Получите петлю на экране осциллографа рис. 7.6. Откройте на вкладку "Таблицы". Нажмите кнопку "Новое", чтобы начать запись измерений. В появившемся диалоговом окне введите название измерения. Затем нажмите кнопку "Записать". В таблице появятся напряжения сигналов, частота и температура.

2.2. Установите предельную петлю гистерезиса с помощью переменного резистором на лицевой панели измерительного блока (при этом кривая не должна окрашиваться в красный цвет, если это происходит, то необходимо уменьшить амплитуду сигнала).

2.3. Зафиксируйте предельную петлю гистерезиса с помощью кнопки  "Запомнить экстремумы петли".

2.4. Уменьшая амплитуду сигнала, фиксируйте координаты вершин частных петель с помощью кнопки . Зафиксируйте 10 точек (чем больше зафиксированных точек, тем более плавной получается основная кривая).

2.5. Для записи сигналов, перейдите на вкладку "Таблицы". Нажмите кнопку "Новое", чтобы начать запись измерений. В появившемся диалоговом окне введите название измерения. Затем нажмите кнопку "Записать". В таблице появятся напряжения сигналов, частота и температура.

2.6. Построить графические зависимости. По оси ординат выбираем Q, а по оси абсцисс E.



Рис. 7.6. Получение основной кривой поляризации

*Обратите внимание*, что при записи данных записываться будут сразу несколько строк значений, а при наличии основной кривой поляризации в таблицу будут записываться данные именно этой кривой, а не петли гистерезиса.

Зеленым цветом выделены измеренные значения, коричневым – параметры образцов. Эти выражения изменить нельзя.

## 2. Измерение температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь

Измерения проводятся по схеме № 3.

Целесообразно температурные зависимости измерять не на предельной петле гистерезиса, а на частной. Причем, желательно установить минимально возможную амплитуду напряженности электрического поля, но, чтобы помехи, возникающие при измерениях на малой амплитуде, не исказили сильно форму петли гистерезиса. Поэтому сначала перейдите на схему № 2 и установите необходимую амплитуду сигнала, а затем перейдите на схему № 3.

3.1. Активизируйте инструменты схемы ("Измеритель температуры", "Нагреватель" и "Измеритель  $C$  и  $\text{tg}$  для записи сигналов, перейдите на вкладку "Таблицы" и нажмите кнопку "Новое", чтобы начать запись измерений. В появившемся диалоговом окне введите название измерения. Затем нажмите кнопку "Записать".

3.2. В окне «нагреватель» нажать вкл. и наблюдать за увеличением температуры

3.3. Нажимать кнопку «записать» каждые 10 °С до 90 °С. В таблице появится строка со значениями емкости,  $\text{tg}$ , частоты и температуры.

3.4. По окончании измерений выключите "Нагреватель".

3.5. Открыть вкладку «формулы» и рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon$ ).

3.6. Построить графические зависимости (вкладка «графики») – по оси ординат выбираем  $\epsilon$ , второй раз  $\text{tg}\delta$ , а по оси абсцисс Temp.

**Отчет должен содержать:**

– петли гистерезиса при нескольких температурах, включая интервалы до и после точки Кюри;

– основную кривую поляризации;

– зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры;

– расчетные формулы;

– описание отличий сегнетоэлектриков от линейных диэлектриков с указанием области применения.

В отчете необходимо дать выводы по полученным результатам и сопоставить их с литературными данными.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие диэлектрики считаются активными?

2. Перечислите виды поляризации. Какие виды поляризации являются замедленными, а какие мгновенными?

3. Объясните явление диэлектрического гистерезиса и влияние на него температуры.

4. 5. Назовите области применения сегнетоэлектриков в соответствии с их особенностями.

6. Что называется диэлектрическими потерями? Перечислите механизмы диэлектрических потерь.

7. В чем заключается отличие структуры активных диэлектриков в интервале температур до и после температуры точки Кюри (на примере BaTiO<sub>3</sub>)?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

#### Цель работы

Исследовать электрофизические характеристики полупроводников методом эффекта Холла.

#### Основные теоретические положения

Полупроводники по удельному сопротивлению ( $10^{-6} \dots 10^9$  Ом\*см при комнатной температуре) занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Полупроводники обладают рядом характерных только для них свойств, резко отличающихся от проводников: в большом интервале температур их удельное сопротивление, уменьшается, т.е. они имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления; полупроводники чувствительны к различного рода внешним воздействиям - свету, ядерному излучению, электрическому и магнитному полям, давлению и т.д.

Как и в металлах, электрический ток в полупроводниках связан с дрейфом носителей заряда. Но если в металлах наличие свободных электронов обусловлено природой металлической связи, то появление носителей заряда в полупроводниках определяется рядом факторов, важнейшими из которых являются чистота материала и температура. В зависимости от степени чистоты полупроводники подразделяют на собственные и примесные.

Полупроводник, в котором в результате разрыва связей образуется равное количество свободных электронов и дырок, называется *собственным*

Для большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники. Полупроводник, имеющий примеси, называется *примесным*, а проводимость, созданная введенной примесью, называется *примесной проводимостью*.

В зависимости от типа проводимости различают полупроводники n- и p-типа. Если преобладающее значение в проводимости кристалла имеют электроны, то такой полупроводник называется электронным, или n-типа, а примесь, отдающая электроны, носит название *донорной*.

Если в полупроводнике основными носителями заряда являются

дырки, а неосновными - электроны, то такой полупроводник - дырочный или р-типа.

Если поместить полупроводник, через который протекает электрический или тепловой поток в магнитное поле, то в нём возникают гальваномагнитные и термомагнитные явления.

Гальваномагнитные явления возникают в полупроводниках при одновременном воздействии электрического и магнитного полей, а термомагнитные явления – при одновременном воздействии магнитного и теплового полей. К гальваномагнитным явлениям относятся эффекты Холла, Эттингсгаузена, а к термомагнитным – эффекты Риги-Ледюка, Нернста-Эттингсгаузена.

Эффект Холла помогает понять суть процессов проводимости в полупроводниках и провести грань между полупроводниками и диэлектриками. Это обусловлено тем, что *измерение ЭДС (разности потенциалов) Холла, дает возможность непосредственно определить концентрацию, подвижность и знак носителей заряда. Последнее позволяет определить принадлежность материала к тому или иному типу полупроводников (р или n–типа).*

Если полупроводник, вдоль которого течет электрический ток, поместить в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, то в полупроводнике *возникнет поперечное электрическое поле, перпендикулярное току и магнитному полю.* Это явление получило название эффекта Холла, а возникающая поперечная ЭДС – ЭДС Холла.

На рис. 8.1 изображена пластинка полупроводника n-типа. Электрическое поле  $E$  направлено параллельно оси  $Z$ , а магнитное поле  $H$  - вдоль оси  $Y$ . На движущиеся в магнитном поле электроны действует сила Лоренца, которая отклоняет их в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля тем самым *формируется поперечное электрическое поле по оси  $x$  –  $E_x$ .* В результате электроны накапливаются на грани материала.

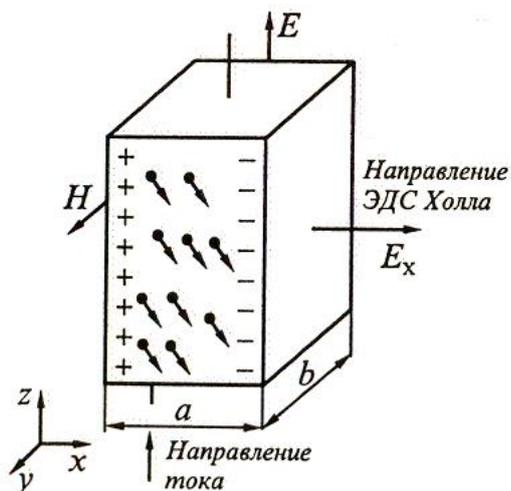


Рис. 8.1. Схема возникновения ЭДС Холла в полупроводнике

На противоположной грани создается положительный uncompensated charge, обусловленный ионами донорной примеси. Такое накопление зарядов происходит до тех пор, пока действие возникшего в результате такого процесса электрического поля не уравновесит действующую на электроны силу Лоренца.

ЭДС Холла в полупроводнике n-типа:

$$U_x = (R_x * I * B) / b \quad (8.1)$$

где  $b$  – толщина пластинки,  $R_x$  – коэффициент Холла,  $R_x = 1 / (qn)$ ,  $B$  – магнитная индукция в образце,  $I$  – ток, протекающий через образец.

Если выразить ток в амперах, напряженность магнитного поля в амперах, деленных на метр, Холловское напряжение в вольтах, толщину образца в сантиметрах, то коэффициент Холла ( $\text{см}^3/\text{К}$ ):

$$R_x = -(bU_x) / (IB) \quad (8.2)$$

Знак минус отражает тот факт, что носителями заряда в данном полупроводнике являются электроны. Для полупроводников *p-типа* получается аналогичное выражение, только концентрация  $n$  заменена на  $p$  и направление поперечного электрического поля противоположно, т.е. ЭДС Холла положительна. Это используется для определения типа электропроводности полупроводников. Следовательно, по величине  $R_x$  можно судить о типе электропроводности. Например, для электронного типа проводимости  $R_x < 0$ , для дырочного типа электропроводности  $R_x > 0$ .

Таким образом, измерив разность потенциалов Холла  $U_x$  при известном токе  $I$ , напряженности магнитного поля  $H$  и толщине образца  $b$ , можно рассчитать  $R_x$ . Если известны коэффициент Холла  $R_x$  и электропроводность, то легко вычислить концентрацию носителей заряда и значение их подвижности.

$$n(p) = \frac{1}{qR_x}, \quad (8.3)$$

где  $n$ ,  $p$  – концентрация носителей заряда, дырок. Знак постоянной Холла совпадает со знаком носителей заряда.

При выводе уравнения для ЭДС Холла сделан ряд допущений, связанных с тем, что полная скорость электронов принимается равной дрейфовой скорости, т.е. не учитывается скорость хаотического теплового движения электронов и их распределение по скоростям. Поэтому более строгое выражение для постоянной Холла, имеет вид:

$$R_x = \frac{A}{qn}, \quad (8.4)$$

где  $A$  – постоянная, зависящая от механизма рассеяния носителей заряда. При рассеянии электронов на акустических, оптических колебаниях решётки, на ионах примеси величина  $A$  соответственно принимает значения: 1,17; 1,11; 1,93.

### Зависимость концентрации носителей заряда от температуры

Как видно из рис. 8.2, график разбит на три области.

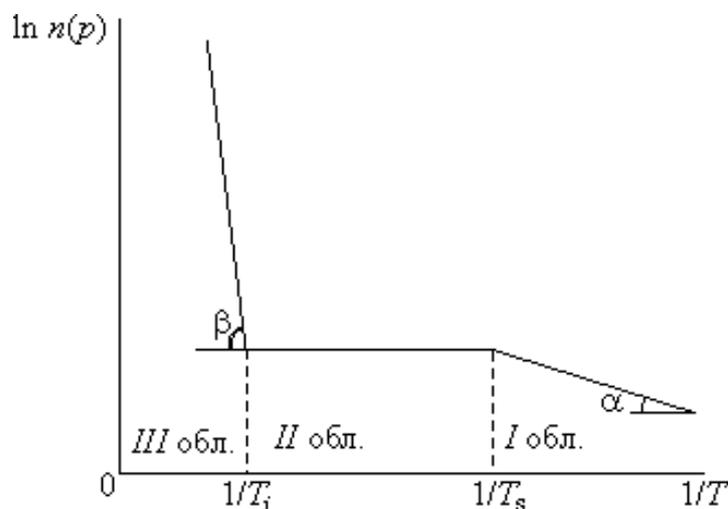


Рис. 8.2. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры в координатах

В Области I образование свободных носителей заряда происходит за счёт перехода электронов с донорного уровня в зону проводимости для полупроводника  $n$ -типа электропроводности, а для полупроводника  $p$ -типа электроны переходят из валентной зоны на акцепторный уровень.

Область II – область истощения примеси. Как видно из рисунка, концентрация свободных носителей заряда не зависит от температуры. Это соответствует тому, что все электроны с донорного уровня перешли в зону

проводимости в полупроводнике  $n$ -типа электропроводности, а для полупроводников  $p$ -типа электропроводности заполнены все энергетические состояния на акцепторном уровне электронами, перешедшими из валентной зоны. В этой области концентрация свободных носителей заряда равна концентрации примесных атомов.

Область  $III$  является областью высоких температур. Здесь энергия теплового хаотического движения электронов  $kT$  соизмерима с величиной запрещённой зоны  $E_g$ . Поэтому электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости, при этом образуются парные носители заряда: электрон и дырка.

Подвижность носителей заряда  $\mu$  это скорость дрейфа носителей заряда в электрическом поле единичной напряженности определяется по формуле:

$$\mu = R_x \cdot \sigma, \quad (8.5)$$

где  $\sigma$  – электропроводность полупроводника. Зная величины  $R_x$  и  $\sigma$  для нескольких температур, можно построить температурную зависимость подвижности носителей заряда, график которой строится в координатах  $\ln \mu = f\left(\frac{1}{T}\right)$ .

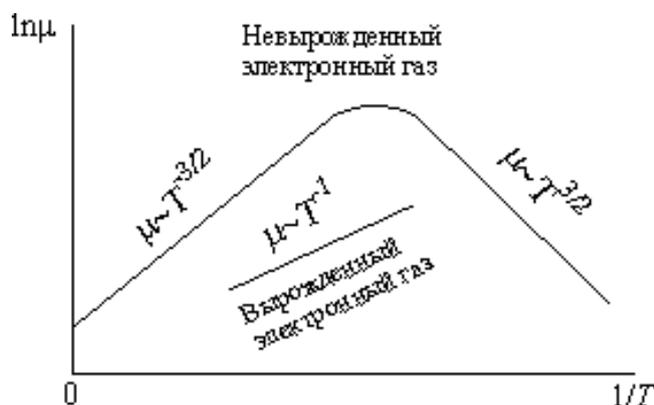


Рис. 8.3. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры

На рис. 8.3 приведен пример температурной зависимости подвижности носителей заряда в полупроводнике. Величина подвижности зависит от механизмов рассеяния носителей заряда. В области высоких температур, когда амплитуда колебаний узлов кристаллической решетки велика, происходит рассеяние носителей заряда на фононах. Подвижность носителей заряда пропорциональна  $T^{-3/2}$  и  $T^{-1}$  соответственно для полупроводников, содержащих невырожденный и вырожденный электронный газ. При низких температурах рассеяние носителей заряда происходит на ионизированных примесях. Этот механизм рассеяния носителей заряда заключается в следующем: движущиеся электроны либо притягиваются к атому примеси, либо отталкиваются от него благодаря кулоновским силам, действующим

между заряженными частицами, в зависимости от знака заряда примеси. В результате, при рассеянии на ионизированных примесях изменяется по направлению скорость движения электронов. Для полупроводников, содержащих невырожденный электронный газ, подвижность носителей заряда пропорциональна  $T^{-\frac{3}{2}}$ . Подвижность носителей заряда для случая вырожденного электронного газа не зависит от температуры.

### Описание лабораторной установки

Работа реализована на стенде, который состоит из компьютера и измерительного блока. Измерительный блок состоит из магнитной системы с образцом и электронной части. Блок реализует классическую схему измерений для исследования эффекта Холла. Программное обеспечение управляет процессом измерений и позволяет рассчитывать параметры и характеристики исследуемого материала. Оно представлено приложением – *Hall.exe*. В измерительном блоке реализованы 3 схемы измерений, где присутствует свой набор управляющих и регистрирующих инструментов.

### Управляющие и регистрирующие инструменты схем:

*Вольтметр V1*. Предназначен для измерения напряжения вдоль линии тока.

*Управляемый источник тока 1* предназначен для изменения тока через образец. Позволяет при помощи ползунка изменять значение силы тока через образец от нуля до максимального значения. Максимальное значение силы тока определяется образцом, включенным в измерительном блоке лабораторного стенда. Конкретное значение можно узнать, щелкнув на схеме измерений "Образец". Обычно это значение около 3 мА.

*Управляемый источник тока 2* предназначен для изменения тока через катушку, создающую магнитное поле в образце.

*Амперметр(A)*. Предназначен для измерения силы тока.

*Вольтметр специальный Vs2*. Предназначен для измерения средней э.д.с. Холла.

*Измеритель индукции (B)*. Предназначен для измерения средней величины индукции магнитного поля.

*Функциональный генератор* предназначен для пилообразного изменения тока через катушку, создающую магнитное поле в образце. Генератор работает в измерительной схеме, в которой в качестве регистрирующего прибора применяется электронный осциллограф. Поэтому

появляется необходимость в периодическом линейном (пилообразном) изменении тока через катушку. По такому же закону будет изменяться и магнитная индукция.

Максимальное значение магнитной индукции определяется конкретной реализацией измерительного блока лабораторного стенда. Обычно это значение около 0,5 Тл.

*Электронный осциллограф* предназначен для измерения зависимости э.д.с. Холла (ось  $Y$ ) от индукции магнитного поля (ось  $X$ ). Как и у всех регистрирующих приборов, имеется возможность выбора размерности для обеих осей (РИС. 8.4).

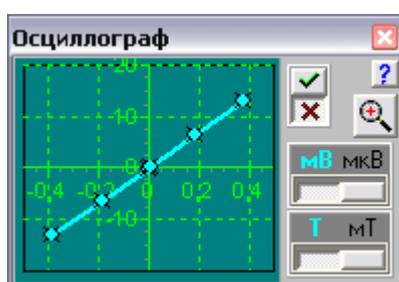


Рис. 8.4. Осциллограф в уменьшенном виде

### Порядок и методика проведения лабораторной работы

Измерение ЭДС Холла и определение температурных зависимостей концентрации, подвижности носителей заряда, удельного сопротивления и электропроводности полупроводника.

1. Для проведения измерений необходимо создать базу данных, для чего в «Рабочей тетради» нажать кнопку «Новая».

2. На схеме измерения активизировать управляющие и регистрирующие инструменты ( $V1-2$ ,  $B$ ,  $A$ ,  $T$ ), необходимые для измерения зависимостей:  $EDS_{\Sigma} = f(I, B)$ ,  $V1 = f(I)$ .

3. При помощи управляющего инструмента «Ток в образце» установить силу тока, протекающего через исследуемый образец, например, 1 мА, (по указанию преподавателя) значения которого фиксируются «Амперметром».

4. Посредством управляющего инструмента «Ток в катушке» установить амплитудное значение силы тока, протекающего через катушку электромагнита (по указанию преподавателя). Значения силы тока, протекающего через катушку, при помощи калибровочной зависимости в рамках программного обеспечения пересчитываются в значения индукции магнитного поля  $B$ , которое регистрируется инструментом «Индукция».

5. Включить нагреватель

6. Измерить ЭДС Холла  $EDS$  при помощи вольтметра  $V2$ .

7. Записать результаты измерения в таблицу «Рабочей тетради», нажав кнопку «Записать». В таблице рабочей тетради появятся данные напряжения, силы тока и ЭДС Холла, температуры.

8. Измерять значения напряжения на исследуемом образце 1 и 2 вольтметром  $V1$ , ЭДС Холла при помощи вольтметра  $V2$  в диапазоне температур  $20...80^\circ \text{C}$  и записывать результаты в табл. «Рабочей тетради» Количество измеряемых точек должно быть 6-10.

9. По схеме №2 измерить зависимость ЭДС Холла (ось  $Y$ ) от индукции магнитного поля (ось  $X$ ).

10. Рассчитать постоянную Холла  $R_x$  по формуле (8.2.)

11. Рассчитать значения удельного сопротивления и электропроводности исследуемого образца соответственно по уравнениям:

$$\rho = R \cdot a \cdot b / l, \quad (8.6)$$

$$\sigma = 1/\rho, \quad (8.7)$$

где  $a$ ,  $b$  – ширина и толщина образца,  $l$  – длина.

12. Рассчитать значения концентрации носителей заряда ( $n$ ), подвижность свободных носителей заряда ( $\mu$ ).

13. Построить график температурной зависимости постоянной Холла.

14. Построить график температурной зависимости концентрации свободных носителей заряда в координатах:  $\ln(n) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ .

15. Построить график температурной зависимости подвижности носителей заряда  $\mu$ .

16. Аналогичным образом построить график температурной зависимости электропроводности исследуемых образцов в координатах:  $\sigma = f(T)$  и  $\ln(\sigma) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ .

17. Путем графического дифференцирования зависимостей  $\ln(n) = f\left(\frac{1}{T}\right)$  и  $\ln(\sigma) = f\left(\frac{1}{T}\right)$  определить энергию ширины запрещенной зоны полупроводника, используя следующее уравнение  $E_g = 2k|\text{tg } \alpha|$ , где  $k$  – постоянная Больцмана.

18. Результаты занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

## Измерения и расчёты

Темп. °С	Измеряемые величины				Рассчитанные величины			
	Ток, мА	В, Т	U, В	EDS, В	$\mu$	$\sigma,$ (Ом*м) 1	1/T, °С <sup>-1</sup>	n
30								
40								
50								
60								
70								
80								

## Контрольные вопросы

1. Классификация полупроводников
2. В чем сущность эффекта Холла?
3. Какой смысл имеет постоянная Холла?
4. Какие электрофизические свойства полупроводников можно исследовать с помощью эффекта Холла?
5. Какие физические процессы определяют величину подвижности носителей заряда в полупроводниках?
6. Как объяснить природу возникновения дополнительной ЭДС, возникающей при исследовании эффекта Холла?
7. Как определить доминирующий механизм рассеяния носителей заряда?
8. В чем сущность эффекта Холла в полупроводниках со смешанным типом проводимости?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ПОСТРОЕНИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### Цель работы

Изучить процессы, протекающие в ферромагнитных материалах в магнитном поле, исследовать основные характеристики ферромагнитных материалов по кривым намагничивания.

#### Основные теоретические положения

Магнитными материалами называются вещества, обладающие магнитными свойствами, т.е. способностью намагничиваться в магнитном поле и тем самым приобретать магнитный момент. Эти свойства отражаются специфическими магнитными параметрами вещества.

Магнитные свойства вещества характеризуются магнитной восприимчивостью  $\chi = M/H$ , где  $M$  – магнитный момент единицы объема вещества или намагниченность в магнитном поле напряженностью  $H$ .

Магнитное поле в вакууме, создаваемое некоторой системой проводников с током или совокупностью постоянных магнитов, характеризуется векторами магнитной индукции  $\mathbf{B}$  и напряженности поля  $\mathbf{H}$ , связанными через магнитную постоянную  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [Гн/м],  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ .

Магнитное поле в материале, кроме напряженности поля  $H$ , создаваемой током в намагничивающей обмотке, зависит так же от магнитных свойств материала. Полная магнитная индукция в материале составляет  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}$ , где первый и второй члены правой части представляют собой соответственно составляющие внешнего и внутреннего поля.

Одним из основных магнитных параметров материала является магнитная проницаемость  $\mu = B/(\mu_0 H) = 1 + \chi$ .

Часто произведение  $\mu \cdot \mu_0 = B/H = \mu_0(1 + \chi)$  называют абсолютной магнитной проницаемостью среды.

#### Классификация магнитных материалов

По значению магнитной восприимчивости  $\chi$ , ее зависимости от напряженности магнитного поля, температуры и других факторов выделяют следующие пять основных видов магнитных материалов: диа-, пара- и антиферромагнетики образуют группу слабомагнитных материалов; ферро- и ферримагнетики относятся к группе сильномагнитных материалов.

В изделиях электротехники и электроники наиболее часто применяются ферромагнетики. Все ферромагнетики характеризуются: большим значением  $\chi$ , способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых полях, *гистерезисом* - зависимостью магнитных свойств от предшествующего состояния, *точкой Кюри* – предельной температурой, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства. К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт и другие материалы.

Ферромагнетизм заключается в существовании в веществе областей – доменов, в пределах которых материал намагничен до состояния насыщения. Магнитная восприимчивость ферромагнетиков достигает значений  $10^5 - 10^6$  и существенно зависит от температуры и напряженности магнитного поля.

#### Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

Различают *магнитомягкие* и *магнитотвердые магнитные материалы*. Магнитомягкие материалы характеризуются значительными магнитной проницаемостью, индукцией насыщения, малой коэрцитивной силой (не более 4 кА/м) и, следовательно, узкой петлей гистерезиса. К магнитомягким материалам относятся технически чистое железо, электротехнические стали сплавы железа с углеродом, кремнистые стали (содержат 0,5÷5% кремния), пермаллой – сплав железа с никелем с добавками других металлов, магнитомягкие ферриты – системы окислов железа, цинка, никеля, марганца и некоторых других металлов, магнитодиэлектрики – мелкодисперсные порошки высокопроницаемых материалов на основе карбонильного железа (P10, P20,...,P100 и др.), альсифера (ТЧ-90,ТЧК-55), пермаллоев (П-250, П-160, ..), ферритов (НМ-5) в неферромагнитной связке.

Магнитотвердые материалы, напротив, имеют большую коэрцитивную силу, малую магнитную проницаемость. К магнитотвердым материалам относятся стали с высоким содержанием углерода (ЕХ3, ЕВ6, ЕХ5К5), алнико – сплавы железа с алюминием, никелем, кобальтом, магнитотвердые ферриты, викаллой – сплав железа с ванадием, соединения на основе редкоземельных элементов - самария, празеодима и др.

Кроме указанных групп магнитных материалов, все большее

распространение в технике находят магнитные материалы с цилиндрическими магнитными доменами, магнитострикционные, тонкопленочные, аморфные магнитные материалы, магнитные жидкости.

### Петля гистерезиса

Магнитные свойства материалов описываются зависимостями индукции  $B$  от напряженности  $H$  и потерь на перемагничивание  $P$  от индукции и частоты. Зависимость вида  $B(H)$  называют кривой намагничивания. При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует *петлю гистерезиса* (рис. 9.1).

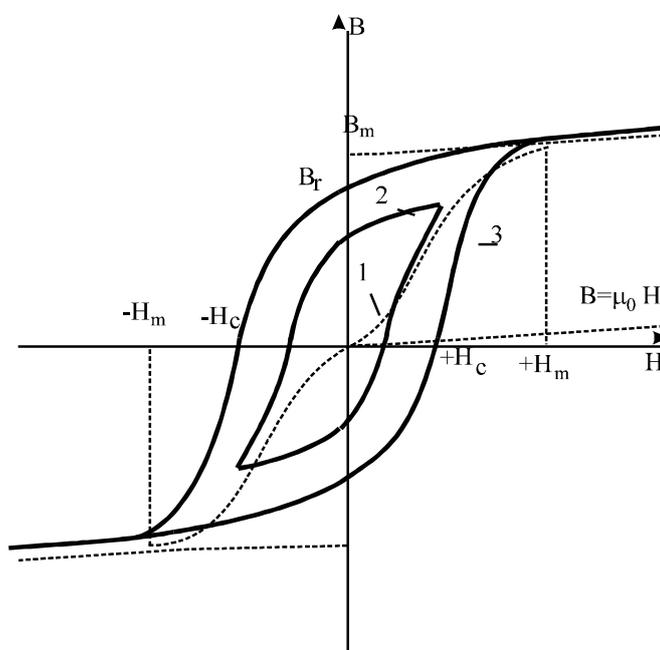


Рис. 9.1. Петля гистерезиса

Различают следующие типы зависимостей:

Частная петля гистерезиса 2 – петля, полученная при циклическом изменении напряженности, если  $H < H_m$ ;

Предельная петля гистерезиса 3 – петля, полученная при циклическом изменении напряженности  $H \geq H_m$ ,

*Основная кривая намагничивания 1.* Представляет собой геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса, получающихся при циклическом перемагничивании или при монотонном увеличении напряженности поля в предварительно размагниченном образце.

При достаточно больших значениях  $H$  кривая 1 асимптотически приближается к прямой  $B = B_m + H$ , где  $B_m$  – индукция насыщения. Начиная

со значения  $H_m$ , при дальнейшем увеличении напряженности петля гистерезиса остается неизменной (за исключением продолжающих расти узких «носиков»). Все частные петли, как симметричные, так и несимметричные, лежат внутри предельной петли.

Основные параметры петли гистерезиса:

Остаточная индукция  $B_r$  – индукция, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля;

Коэрцитивная сила  $H_c$  – размагничивающее поле, которое должно быть приложено к образцу, чтобы индукция стала равной нулю.

По основной кривой намагничивания могут быть определены также: начальная магнитная проницаемость

$$\mu_n = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} \quad (9.1)$$

и дифференциальная магнитная проницаемость:

$$\mu_d = \frac{dB}{\mu_0 dH} \quad (9.2)$$

Перемагничивание магнитных материалов в переменных полях возбуждает вихревые токи, магнитное поле которых направлено встречно внешнему полю. В результате напряженность магнитного поля в материале падает с удалением в глубь от поверхности. Вихревые токи вносят вклад в потери на перемагничивание. Для уменьшения потерь на вихревые токи на высоких частотах следует применять магнитомягкие высокочастотные материалы (магнитодиэлектрики, ферриты), у которых значение удельного сопротивления значительно больше, чем у низкочастотных материалов – электротехнических сталей, пермаллоев.

Таким образом, потери на перемагничивание состоят в основном из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи:  $P = P_r + P_v$ .

#### Описание лабораторной установки расчетные соотношения

Лабораторные работы реализованы на общем стенде, который состоит из компьютера и измерительного блока. Во время измерений стенд может работать как в режиме цифрового осциллографа, так и в режиме измерений отдельных величин по приборам измерительной схемы.

Звуковой генератор в измерительном блоке установки вырабатывает синусоидальное напряжение в диапазоне частот 40-1000 Гц. Это напряжение поступает на намагничивающую обмотку образца, который изготовлен в

форме кольца с намотанными на него двумя обмотками: намагничивающей обмоткой 1 и измерительной обмоткой 2. Напряженность магнитного поля в материале определяется током  $I$  в намагничивающей обмотке 1 по формуле:

$$H = I \cdot n, \quad n = \frac{w1}{L} \quad (9.3)$$

где  $n$  – плотность витков обмотки 1 (количество витков /м);  $w1$  – количество витков;  $L$  – длина магнитопровода. Величина тока намагничивания определяется по значению падения напряжения на измерительном резисторе  $R1$  ( $R1=1,5$  Ом), который включается последовательно с обмоткой 1, т.е.

$$I = \frac{U_H}{R1} \quad (9.4)$$

ЭДС, наводимая в измерительной обмотке 2 образца, пропорциональна производной от индукции магнитного поля  $B$ . Напряжение обмотки 2 интегрируется интегрирующим усилителем ИУ, на выходе которого напряжение измерительного сигнала пропорционально уже непосредственно  $B$ . Напряжение выхода ИУ подается на второй линейный вход звуковой карты в ПК. Таким образом, в ПК поступает информация о напряженности  $H$ , индукции  $B$  в образце и их частоте, на основании которой осуществляется построение кривых намагничивания и расчет всех магнитных параметров материалов.

$$B = \frac{R_i \cdot C_i}{W^2 \cdot S} \cdot U_B \quad (9.5)$$

где  $S$  – площадь сечения магнитопровода,  $R_i = 10$  кОм,  $C_i = 0,22$  мкФ

На схеме присутствуют следующие элементы:

- *Звуковой генератор.* Предназначен для формирования синусоидального напряжения с частотой от 40 до 1000 Гц.
- *Частотомер.* Предназначен для измерения частоты сигнала, подаваемого на образец.
- *Вольтметр V1.* Предназначен для измерения амплитудного значения напряжения, пропорционального напряженности магнитного поля в образце.
- *Вольтметр V2.* Предназначен для измерения амплитудного значения напряжения, пропорционального индукции магнитного поля в образце.

*Электронный осциллограф* (рис. 9.2). Предназначен для измерения зависимости напряжений, пропорциональных напряженности и индукции магнитного поля. В зависимости от схемы измерений, осциллограф отражает

либо зависимость сигналов от времени, либо зависимость сигналов друг от друга (петля гистерезиса).



Рис. 9.2. Осциллограф

### Последовательность и методика проведения эксперимента

#### *Алгоритм измерения петли гистерезиса и основной кривой намагничивания*

1. В меню программы перейдите «Схема измерений 2».
2. Откройте «Рабочая тетрадь» / «Новая».
3. Введите название рабочей тетради, например, номер группы.
4. Активизируйте элементы «Схемы измерений 2»: звуковой генератор, частотомер, образец, электронный осциллограф.
5. Установите частоту ~100 Гц и амплитуду ~7 п.
6. В окне «Рабочая тетрадь» установите «Новое».
7. Введите название «Петля».
8. В окне «Рабочая тетрадь» установите «Записать».
9. Переключитесь в режим «Формулы».
10. «Новая».
11. Введите формулу:

$$H = U_H \cdot W_1 / R_1 \cdot d \ln.$$

12. «Вставить».
13. «ОК» – расчетные значения  $H$  запишутся в таблицу.
14. «Новая» в рабочей тетради.
15. Введите формулу

$$B = R_i \cdot C_i \cdot U_B / W_2 \cdot ar.$$

16. «Вставить» – расчетные значения  $B$  запишутся в таблицу.

17. «ОК».
18. Переключитесь в режим «Графики».
19. «Новый».
20. Введите название «Петля».
21. «ОК» / «Добавить».
22. Обозначьте оси  $B$  и  $H$  / «Применить» / «Сохранить».
23. В окне «Рабочая тетрадь» установите «Новое».
24. Введите название «Начальная кривая».
25. Уменьшая амплитуду сигнала, зафиксируйте 10 значений максимальной магнитной индукции петли гистерезиса, включая нулевое значение.
26. В окне «Рабочая тетрадь» установите «Записать».
27. Переключитесь в режим «Формулы» / «Новая».
28. Введите формулу:
 
$$H = U_H \cdot W_1 / R_1 \cdot d \ln.$$
29. «Вставить» / «ОК» – расчетные значения  $H$  запишутся в таблицу.
30. «Новая» в рабочей тетради.
31. Введите формулу
 
$$B = R_i \cdot C_i \cdot U_B / W_2 \cdot ar.$$
32. «Вставить» – расчетные значения  $B$  запишутся в таблицу / «ОК».
33. Переключитесь в режим «Графики»/«Новый».
34. Введите название «Начальная кривая» / «ОК» / «Добавить».
35. Обозначьте оси  $B$  и  $H$  / «Применить» / «Сохранить».
36. Переключитесь в режим «Отчет».
37. Откройте отчет.
38. Скопируйте таблицы, графики, формулы.
39. Сохраните на отчет и распечатайте отчет.

### ***Содержание отчета***

Отчет должен содержать:

- основную кривую намагничивания для установленного образца магнитного материала;
- предельную петлю гистерезиса на частоте, заданной преподавателем;
- определенные параметры предельной петли гистерезиса по графику кривой;
- качественная характеристика магнитных свойств исследуемого материала.

### Контрольные вопросы

1. Опишите процессы, происходящие в ферромагнитных материалах при их перемагничивании, в соответствии с кривыми намагничивания. Охарактеризуйте типы кривых намагничивания.
2. Назовите параметры петли гистерезиса и другие параметры, характеризующие магнитные свойства материалов.
3. Поясните различия между магнитомягкими и магнитотвердыми ферромагнитными материалами. Приведите примеры данных материалов.
4. Назовите виды потерь на перемагничивание в ферромагнитных материалах.
5. Приведите примеры областей применения ферромагнитных материалов с различными свойствами.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Работа № 1. Определение общих и удельных сопротивлений твердых диэлектриков	8
Работа № 2. Исследование зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков от температуры	15
Работа № 3. Определение диэлектрической проницаемости тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков на высоких частотах.	34
Работа № 4. Исследование электрической прочности диэлектриков	39
Работа № 5. Определение общезфизических характеристик электроизоляционных материалов	54
Работа № 6. Исследование свойств проводниковых материалов	60
Работа № 7. Исследование свойств сегнетоэлектрических материалов	71
Работа № 8. Исследование свойств полупроводников методом эффекта Холла	83
Работа № 9. Исследование свойств магнитных материалов	92
Оглавление	100

*Методические указания  
к лабораторным работам*

## **Электротехнические материалы**

**Составители: Сироткин Олег Семенович  
Сухарников Александр Евгеньевич  
Бунтин Артем Евгеньевич  
Павлова Алиса Максимовна  
Лазарева Анна Валерьевна  
Сироткин Ростислав Олегович**

**(Кафедра Материаловедения и технологии материалов КГЭУ)  
Редакторы издательского отдела  
Компьютерная верстка**

**Подписано в печать.**

**Формат 60x84x16. Бумага «Business». Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.  
Усл.печ. 3,0. Уч.-изд л.3,29. Тираж Заказ №**

**Издательство КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51  
Типография КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51**