

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИ-
ТЕТ

Т. Е. Харламова

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУК-
ЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Часть II

Электроматериаловедение

Учебно-методический комплекс



Санкт-Петербург
Издательство СЗТУ
2009

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИ-
ТЕТ

Т.Е. Харламова

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В 2-х частях

Часть II

Электроматериаловедение

Учебно-методический комплекс

Санкт – Петербург
Издательство СЗТУ
2009

Кафедра электроснабжения

**Материаловедение. Технология
конструкционных материалов
В 2-х частях
Часть II**

Электроматериаловедение

Учебно-методический комплекс

Энергетический институт

Специальности

140211.65 – электроснабжение

140601.65 – электромеханика

140602.65 – электрические и электронные аппараты

Направление подготовки бакалавров

140200.62 – электроэнергетика

140600.62 – электротехника, электромеханика и электротехнологии

Санкт – Петербург
Издательство СЗТУ
2009

Утверждено редакционно-издательским советом университета
УДК 621.38

Материаловедение. Технология конструкционных материалов: В 2 ч. Ч. II. Электроматериаловедение: учебно-методический комплекс/ сост. Т.Е. Харламова. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009.

Учебно-методический комплекс (УМК) разработан в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования.

В УМК рассмотрены основы электроматериаловедения. УМК предназначается студентам энергетических специальностей: 140211.65 – электроснабжение; 140601.65 – электромеханика; 140602.65 – электрические и электронные аппараты и бакалаврам по направлениям подготовки: 140200.62 – электроэнергетика; 140600.62 – электротехника, электромеханика и электротехнологии.

Рассмотрено на заседании кафедры электроснабжения 29 апреля 2008 г., одобрено методической комиссией энергетического института 30 апреля 2008 г.

Рецензенты: кафедра электроснабжения СЗТУ (заведующий кафедрой Г.З. Зайцев, канд. техн. наук, проф.); С.И. Джаншиев, канд. техн. наук, доц.

Составитель Т.Е. Харламова, канд. физ.-мат. наук, доц.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2009
© Харламова Т. Е., 2009

1. Информация о дисциплине

1.1. Предисловие

Учебно-методический комплекс «Материаловедение. ТКМ. ч. II. Электро-материаловедение» предназначен для студентов специальностей:

140211.65 – электроснабжение;

140601.65 – электромеханика;

140602.65 – электрические и электронные аппараты.

Студенты всех форм обучения изучают дисциплину в одном семестре.

Дисциплина включает в себя введение и четыре основных раздела: диэлектрики, полупроводники, проводники и магнитные материалы.

В процессе изучения дисциплины студентам предстоит:

- 1) прослушать лекции,
- 2) выполнить лабораторные работы,
- 3) выполнить контрольную работу,
- 4) сдать экзамен.

Целью изучения дисциплины является изучение свойств электротехнических материалов, которые проявляются в электромагнитных полях, в зависимости от их химического состава, структуры и внешних воздействий.

Задачи изучения дисциплины:

- знакомство с основными достижениями в области электро-материаловедения;
- понимание процессов, эффектов и явлений, происходящих в электрических, магнитных, тепловых и других полях и их влияние на основные свойства материалов, используемых в электроэнергетике.

В результате изучения дисциплины студент должен овладеть основными знаниями, формируемыми на нижеперечисленных уровнях:

иметь представление:

- о практической значимости теоретических разработок в области электро-материаловедения;
- об областях применения тех или иных материалов.

знать:

- основные группы материалов;
- диапазон их электрических и магнитных характеристик;
- область использования каждой группы материалов.

уметь:

- правильно выбрать материал для электрического элемента, изделия, устройства и т. п., работы в тех или иных условиях;
- работать со справочной литературой, отражающей характеристики материалов.

владеть – научно-техническими аспектами содержания дисциплины в общей структуре электроэнергетической отрасли.

Место дисциплины в учебном процессе

Дисциплина (Материаловедение. ТКМ. ч. II. Электроматериаловедение) базируется на курсах химии, физики, математики, теоретических основ электротехники.

На знаниях, приобретенных в результате изучения данной дисциплины, базируется большинство специальных дисциплин и дисциплин по выбору.

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

1.2.1. Содержание дисциплины по ГОС

Классификация электротехнических материалов; диэлектрики, их электропроводимость, пробой газов, жидких и твердых диэлектриков; теплопроводимость, радиационная стойкость материалов; жидкие диэлектрики, полимеры, неорганические электроизоляционные материалы; проводниковые и сверхпроводниковые материалы; полупроводниковые материалы; магнитные материалы.

1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы

Виды учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	очная	очно-заочная	Заочная
Общая трудоемкость дисциплины (ОТД)	100		
Работа под руководством преподавателя (РпРП)	60	60	60
В том числе аудиторные занятия: лекции лабораторные работы (ЛР)	32	16	4
	20	8	8
Самостоятельная работа студента	40	40	40
Промежуточный контроль, тесты контрольная работа	1	1	1
	4	4	4
		1	1
Вид итогового контроля	Экзамен		

1.2.3. Перечень видов практических занятий и контроля

Лабораторные работы – выполняются по указанию преподавателя.

Контрольная работа – одна (для студентов очно-заочной и заочной форм обучения).

Вопросы для самоконтроля.

Тесты (по разделам теоретического курса).

Итоговый контроль – экзамен.

2. Рабочие учебные материалы

2.1. Рабочая программа

(Объем дисциплины 100 часов)

Введение

(4 часа)

[1], с. 3...21; [2], с. 3...6

Электроэнергетика, электротехническая промышленность, электроснабжение неразрывно связаны между собой. Сюда входит: производство электрической энергии, создание электрических машин аппаратов устройств, линии электропередачи и др.

Надежность работы электротехнического оборудования в основном зависит от правильного выбора и качества соответствующих электротехнических материалов.

В структуре затрат на производство электротехнической продукции на долю материалов приходится до 70 %, а иногда и больше.

Новая техника и технологические процессы в области материаловедения позволяют успешно решать многие задачи: повышение основных электрических параметров материалов, их физико-химические, тепловые и радиационные свойства, осуществление перехода от дефицитных к более экономически выгодным материалам и т. п., что играет немаловажную роль в научно-техническом процессе.

В данной дисциплине предусматривается изучение свойств электротехнических материалов, которые проявляются в электромагнитных полях и зависят от состава материалов, их структуры и внешних воздействий, что и составляет науку «Электроматериаловедение».

Все электрические материалы, по их поведению в электромагнитном поле, можно разделить на четыре основных группы: диэлектрические, полупроводниковые, проводниковые и магнитные.

Исходя из вышесказанного вся дисциплина содержит четыре основных раздела, посвященных каждой группе перечисленных материалов.

Раздел 1. Диэлектрические материалы. Диэлектрики (36 часов)

[1], с. 182...227; [2], с. 6...35

- 1.1. Основные особенности диэлектрических материалов. Энергетическая диаграмма.
- 1.2. Поляризация диэлектриков.
- 1.3. Электропроводимость диэлектриков.
- 1.4. Диэлектрические потери.
- 1.5. Пробой диэлектриков в электрическом поле.
- 1.6. Физико-механические, химические и радиационные свойства диэлектриков.
- 1.7. Классификация диэлектриков.

Раздел 2. Полупроводники (16 часов)

[1], с. 90...115; [2], с. 36-56

- 2.1. Общие свойства полупроводниковых материалов.
- 2.2. Собственная и примесная электропроводимость. Донорные и акцепторные примеси. Энергетические диаграммы.
- 2.3. Термочувствительность и термоэлектрические свойства полупроводников.
- 2.4. Электронно-дырочный переход в полупроводниках.
- 2.5. Фоторезистивные и фотоэлектрические явления в полупроводниках.
- 2.6. Классификация полупроводниковых материалов.

Раздел 3. Проводники (22 часа)

[1], с. 27...56; [2], с. 56...68

- 3.1. Общие свойства проводниковых материалов I рода.
- 3.2. Электропроводимость проводников.
- 3.3. Контактная разность потенциалов и термоэлектрический эффект в проводниках I рода. Явления на контактах.
- 3.4. Классификация проводниковых материалов.

Раздел 4. Магнитные (ферромагнитные) материалы (22 часа)

[1], с. 296...349; [2], с. 69...80

- 4.1. Общие свойства ферромагнитных материалов. Природа ферромагнетизма.
- 4.2. Процесс намагничивания ферромагнетиков. Основные характеристики.

4.3. Потери в ферромагнитных материалах. Энергия в зазоре постоянных магнитов.

4.4. Классификация магнитных материалов.

Заключение (2 часа)

Краткий перечень тем разделов дисциплины.

Вся дисциплина разделена на 4 раздела; каждый из них посвящен основным группам материалов: диэлектрики, полупроводники, проводники и магнитные материалы.

Роль электрических материалов в работе электроэнергетических устройств.

2.2. Тематический план дисциплины

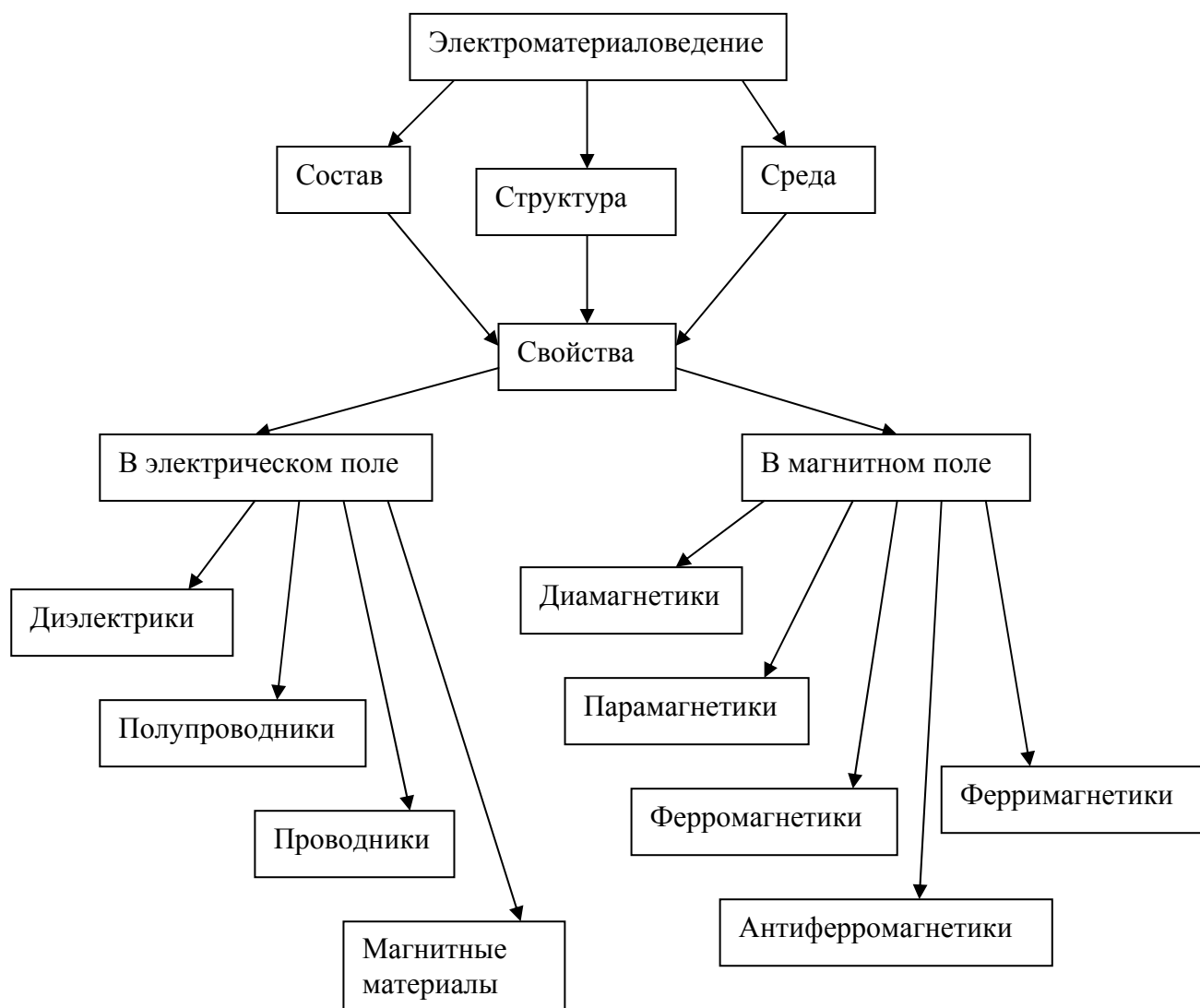
2.2.1. Тематический план дисциплины для студентов заочной формы обучения

№ п/п	Название раздела, темы	Количество часов по дневной форме обучения	Виды занятий (часы)					Текущий контроль (тесты)
			Лекционные		Лабораторные		Самостоятельная работа	
			Аудит.	ДОТ	Аудит.	ДОТ		
Всего		100	4	18	8	18	40	
1	Введение		0,5	1			4	
2	Раздел 1.		1,5	8	4	10	16	1
3	Раздел 2.		0,5	2	-	-	4	1
4	Раздел 3.		0,5	3	2	4	8	1
5	Раздел 4.		1	4	2	4	8	1

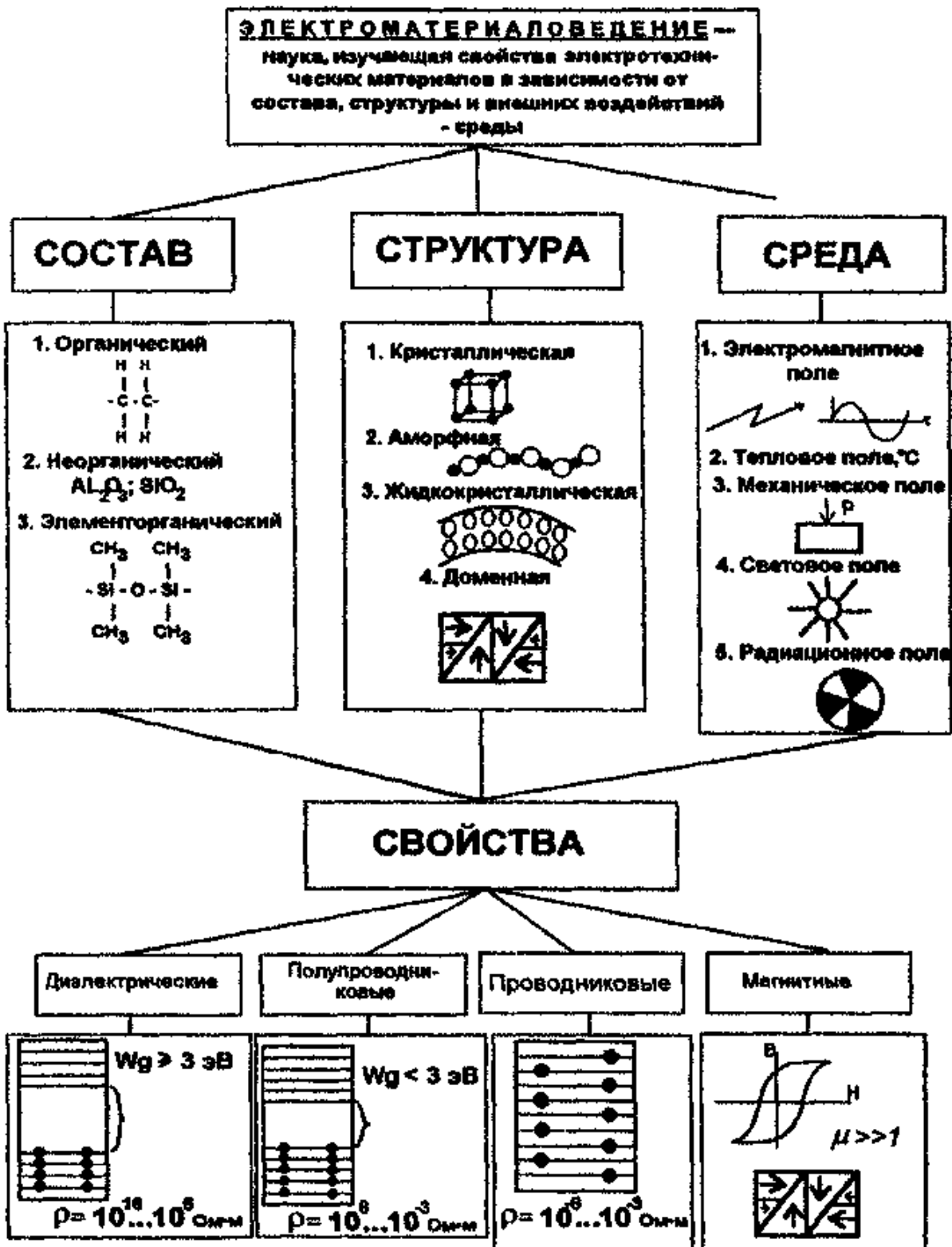
2.2.2. Тематический план дисциплины для студентов очно-заочной формы обучения

№ п/п	Название раздела, темы	Количество часов по дневной форме обучения	Виды занятий (часы)					Текущий контроль (тесты)
			Лекционные		Лабораторные		Самостоятельная работа	
			Аудит.	ДОТ	Аудит.	ДОТ		
Всего		100	16	30	8	18	40	
1	Введение		1	2			4	
2	Раздел 1.		6	16	4	10	16	1
3	Раздел 2.		2	4	-	-	4	1
4	Раздел 3.		3	4	2	4	8	1
5	Раздел 4.		4	4	2	4	8	1

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины



2.3.1. Структурно-логическая схема №1 дисциплины с элементами опорных сигналов



Структурная схема №1

2.4. Временной график изучения дисциплины

Примечание: временной график предназначен только для студентов, занимающихся с использованием ИКТ (информационно-коммуникационных технологий).

№ п/п	Наименование раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (из расчета 4 часа в день)
1	Введение	1 дн.
2	Раздел 1. Диэлектрики	10 дн.
3	Раздел 2. Полупроводники	5 дн.
4	Раздел 3. Проводники	4 дн.
5	Раздел 4. Магнитные материалы	5 дн.
	Итого	25 дн.

2.5. Практический блок

2.5.1. Лабораторный практикум (все формы обучения)

Номер и название раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Количество часов
Раздел 1. Диэлектрические материалы Раздел 4. Магнитные материалы	Исследование взаимодействия веществ, имеющих доменную структуру, с внешними полями	2
Разделы 1, 3, 4. Диэлектрические, проводниковые и магнитные материалы	Исследование диа-, пара-, ферри- и ферромагнитных свойств материалов	2
Раздел 1 и 2. Диэлектрические и полупроводниковые материалы	Исследование некоторых параметров диэлектрических и полупроводниковых материалов	2
Раздел 1. Диэлектрические материалы	Исследование электрической прочности диэлектриков	2

2.6. Рейтинговая система оценки знаний

Условием завершения изучения дисциплины являются: теоретическая проработка всех разделов; ответы на вопросы для самоконтроля после каждой из тем раздела; выполнение лабораторных работ и отчетов по ним; самостоятельное тестирование по всем разделам дисциплины (проверить правильность ответов можно по таблицам, данным в приложениях).

Успешное завершение изучения дисциплины определяется: зачетными преподавателем контрольной работой и отчетами по лабораторным работам; правильными ответами на тестовые задания по всем разделам дисциплины -

(не менее 60 % правильных ответов по каждому из четырех разделов); сдачей экзамена преподавателю.

За зачетную контрольную работу начисляется 10 баллов; за выполнение лабораторных работ и отчетов по ним – 20 баллов; за каждый правильный ответ тестового задания – 1 балл.

Итоговая успешность определяется преподавателем при сдаче экзамена.

Для себя Вы можете предварительно проранжировать свою подготовку по следующей таблице.

Ранжирование результатов

Оценка	Удовлетворительная подготовка	Хорошая подготовка	Отличная подготовка
Количество набранных баллов	60-69	70-79	80-85

Если Вы сумеете ответить правильно на все вопросы для самоконтроля, успешно выполнить контрольную работу, проделать все лабораторные работы и написать по ним отчеты, а также выбрать правильные ответы каждого тестового задания (не менее 60 %), то сдача экзамена, по всей вероятности, будет успешной.

3. Информационные ресурсы дисциплины

3.1. Библиографический список

Основной:

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В.Пасынков, В.С.Сорокин. – СПб.: «Лань», 2003.
2. Харламова, Т.Е. Материаловедение. ТКМ. учебное пособие: В 2 ч. Ч. 2. Электроматериаловедение / Т.Е. Харламова. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007.
3. Сорокин В.С. Материалы и элементы электронной техники: В 2 т. / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – М.: «Академия», 2006.

Дополнительный:

4. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П.Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. - Л.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.3 / под ред. Ю.В. Корицкого [и др.]. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Электротехнический справочник: В 2 т. Т.1/ под ред. В.Г. Герасимова [и др.]. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.

Средства обеспечения освоения дисциплины (ресурсы Интернет):

7. Презентация по дисциплине (DVD–формат).
8. Учебное пособие «Материаловедение. ТКМ: В 2 ч. Ч. 2. Электроматериаловедение» (DVD–формат).

3.2. Опорный конспект по дисциплине

Введение

Электроматериаловедение является второй частью дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов ТКМ. Ч. II. Электроматериаловедение».

Надежность работы электротехнического оборудования электроэнергетических систем в большой степени зависит от правильного выбора и качества материалов, из которых оно создано.

Современная техника и технологические процессы в области электроматериаловедения позволяют успешно решать многие задачи: повышение электрических параметров материалов; их физико-механические, тепловые и радиационные свойства; переход от дефицитных к более экономически выгодным материалам и многое другое, что играет немаловажную роль в научно-техническом прогрессе.

Данная дисциплина предусматривает изучение свойств электротехнических материалов, которые проявляются в электрических и магнитных полях, в зависимости от состава материалов, их структуры и среды (то есть внешних воздействий).

Все электротехнические материалы по их поведению в электромагнитных полях разделены на четыре группы (класса): диэлектрики, полупроводники, проводники и магнитные (ферромагнитные) материалы. Исходя из вышесказанного дисциплина содержит 4 раздела, посвященные каждой группе материалов.

Чтобы наглядно представить всю основную структуру дисциплины, охватить изучаемые в ней темы и взаимосвязи, приведена структурная схема №1, с. 9, в которой используются «опорные сигналы», химические формулы, символика и числовые примеры некоторых основных параметров.

В дальнейшем, при рассмотрении всех групп материалов, каждый из четырех разделов* будет поясняться структурной схемой, в которой раскрываются основные рассматриваемые вопросы.

Раздел 1. Диэлектрики (диэлектрические материалы)

В данном разделе изучается шесть тем, посвященных основным процессам, происходящим в данной группе материалов в электромагнитном поле (структурная схема №2, с. 13):

- основные особенности диэлектриков, их энергетическая диаграмма;
- поляризация диэлектриков, их диэлектрическая проницаемость;
- электропроводимость диэлектриков, их удельное электрическое объемное и поверхностное сопротивления;
- диэлектрические потери, угол диэлектрических потерь;
- пробой диэлектриков в электрическом поле, виды пробоя;

* Разделы и темы опорного конспекта имеют собственную нумерацию.

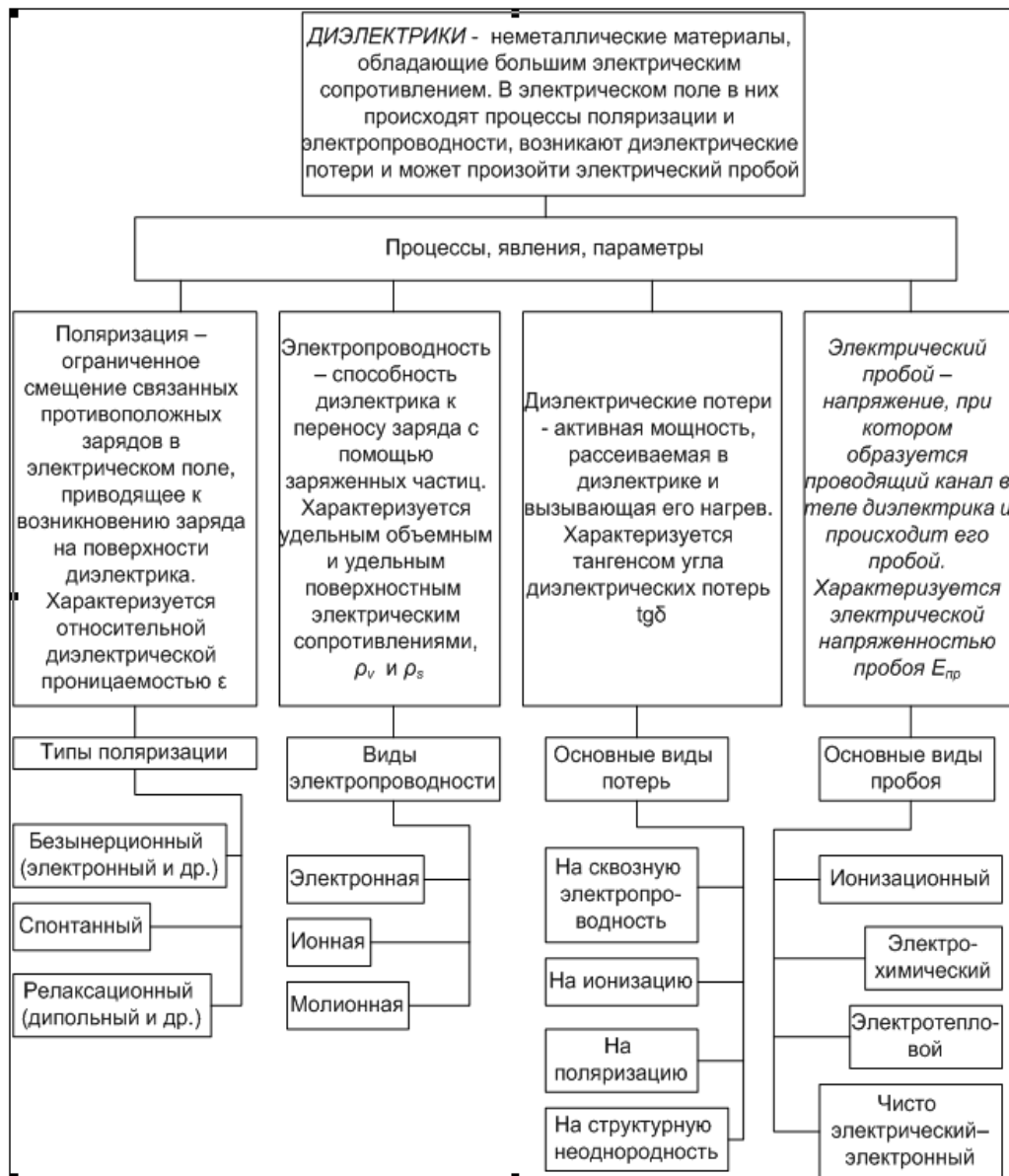
- классификация диэлектриков по составу, агрегатному состоянию и основным характеристикам.

В конце каждой темы приводятся вопросы для самопроверки, на которые следует ответить после проработки раздела.

Лабораторные работы, относящиеся к этому разделу, № 3 и № 4; задачи контрольной работы № 1 и № 2.

Раздел учебного пособия [2], с. 3-35.

В конце комплекса приводится тест № 1 по данному разделу, номера правильных ответов на который даны в приложении № 1.



Структурная схема № 2

1.1. Основные особенности диэлектриков, их энергетическая диаграмма

Диэлектрики – материалы, имеющие широкую запрещенную энергетическую зону и соответственно большое удельное электрическое сопротивление – ρ (рис. 1).



Рис. 1

Используются в качестве изоляции токоведущих частей друг от друга; в качестве накопителей электрического заряда (электрические конденсаторы) и для других целей.

1.2. Поляризация диэлектриков, их диэлектрическая проницаемость

Поляризация – это ограниченное смещение связанных противоположных электрических зарядов в диэлектрике, происходящее под воздействием электрического поля. В результате этого процесса на противоположных поверхностях диэлектрического материала появляется заряд Q .

Поляризация характеризуется величиной поляризованности P_D и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ .

1.2.1. Основные формулы и соотношения

$$P_D = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum m_e}{V} | V \rightarrow 0,$$

где m_e – электрические моменты связанных противоположных зарядов;
 V – объем диэлектрика.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ связана с поляризованностью соотношением:

$$\epsilon = 1 + \frac{P_D}{E};$$

где E – напряженность электрического поля.

ϵ – показывает во сколько раз емкость конденсатора с данным диэлектриком больше емкости такого же конденсатора, если между его обкладками будет находиться вакуум C_0 .

$$\epsilon = \frac{C_D}{C_0},$$

Емкость диэлектрика, к которому приложено электрическое поле, равна

$$C_D = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \cdot \Phi,$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума – $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

S – площадь меньшего электрода, приложенного к диэлектрику, м²;

d – толщина диэлектрика, м.

Связь между величиной заряда на поверхности диэлектрика, его параметрами и приложенным полем U

$$Q = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \cdot U, \text{ Кл.}$$

Абсолютная диэлектрическая проницаемость равна относительной, умноженной на диэлектрическую постоянную вакуума,

$$\epsilon_{\text{абс}} = \epsilon \cdot \epsilon_0.$$

1.2.2. Виды поляризации

Все виды поляризации можно разделить на три основных типа:

- а) электронный (безынерционный);
- б) дипольно-релаксационный (инерционный);
- в) спонтанный (самопроизвольный).

Электронный тип наблюдается у нейтральных, однородных диэлектриков, характеризуется малой диэлектрической ($\epsilon < 3$) проницаемостью.

Дипольно-релаксационный тип характерен для полярных или структурно-неоднородных диэлектриков; характеризуется довольно большой диэлектрической проницаемостью - > 3 .

Спонтанный тип характерен для диэлектриков, имеющих доменную структуру. Их диэлектрическая проницаемость очень большая и может достигать нескольких тысяч.

1.2.3. Электретный эффект

Диэлектрик, в котором может длительно сохраняться заряд на поверхности после снятия электрического и (если было приложено) теплового поля, называется электретом, а такой эффект – электретным эффектом.

Вопросы для самоконтроля

1. На какие группы делятся все материалы по отношению к электрическому полю?
2. Приведите основные особенности поведения каждой группы материалов в электрическом поле.
3. Какими основными параметрами характеризуются диэлектрики?
4. Что собой представляет явление поляризации в электрическом поле?
5. Какими параметрами характеризуется поляризация?
6. Какие Вы знаете виды поляризации и в каких диэлектриках они проявляются?
7. Приведите особенности каждого из трех типов поляризации.
8. В каких элементах, устройствах проявляется и используется явление поляризации?
9. В чем заключается электретный эффект в диэлектриках?

1.3. Электропроводимость диэлектриков

Электропроводимость материала – это способность его к переносу заряда с помощью заряженных частиц. Характеризуется:

а) объемной удельной электропроводимостью γ_v – которая зависит от объемного удельного электрического сопротивления ρ_v : $\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}, \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$;

б) поверхностной удельной электропроводимостью γ_s – которая зависит от поверхностного удельного электрического сопротивления ρ_s : $\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}, \frac{1}{\text{Ом}}$.

Различают несколько видов электропроводимости, в зависимости от вида носителей заряда ее осуществляющих:

- а) электронная – носители электроны;
- б) ионная (или электролитическая) – носители ионы;
- в) молионная (или электрофоретическая) – носители группы молекул;
- в) смешанная – носители разные (электроны, ионы, молионы и др.).

1.3.1. Для любого материала, к которому приложено электрическое поле, удельная электропроводимость зависит от наличия заряженных частиц (элек-

тронов, ионов и т.п.), от их количества N и от их способности к перемещению, т.е. подвижности U .

$$\gamma = q \cdot N \cdot u,$$

где q – заряд частицы, Кл;

N – количество заряженных частиц, $1/\text{м}^3$;

$u = \frac{v}{E}, \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ – подвижность частиц, т.е. скорость заряженных частиц v ,

приходящаяся на единицу напряженности электрического поля E :

$$v - \text{м/с}; E - \text{В/м}, u \Rightarrow \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{В}} \Rightarrow \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

1.3.2. С увеличением температуры диэлектрика его электропроводимость возрастает по экспоненциальному закону, так как возрастает вероятность увеличения числа носителей заряда за счет перехода их в зону проводимости.

$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{kT}} \text{ или } \gamma_t = A \cdot \exp\left(-\frac{W_t}{kT}\right),$$

где A – постоянная, характеризующая электропроводность в экстремальных условиях (например, при $T = 0$, К);

W_t – термическая энергия активации, т.е. энергия, при которой увеличивается число носителей заряда;

k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град);

T – абсолютная температура, К;

e – основание натурального логарифма.

1.3.3. В слабом электрическом поле электропроводимость диэлектрика подчиняется закону Ома (до $E = 10^6 \dots 10^7$ В/м). В сильных электрических полях действует закон Пуля:

$$\gamma_E = \gamma_0 \cdot e^{\alpha E},$$

где γ_0 – электропроводимость в слабом электрическом поле (когда соблюдается закон Ома);

α – коэффициент материала (обычно $1 < \alpha < 2$);

E – напряженность электрического поля.

1.3.4. Поверхностная электропроводимость γ_s сильно зависит от влажности материала и загрязнений на его поверхности. Гидрофобные диэлектрики (несмачивающиеся) слабо увеличивают γ_s от влажности среды, а гидрофильные (смачивающиеся) – довольно сильно (кривая 1 на рис. 2).

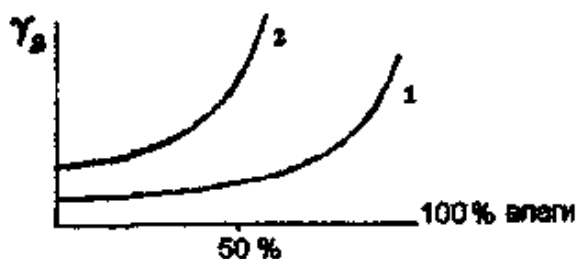


Рис. 2

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое электропроводимость материала?
2. Какие необходимы условия, чтобы в диэлектрике возник электрический ток?
3. Приведите основные формулы для удельного объёмного и поверхностного сопротивлений.
4. От каких факторов зависит электропроводимость диэлектриков?
3. Какие виды носителей заряда и какие виды электропроводимости диэлектриков Вы знаете?
6. Каким образом зависит электропроводимость от температуры диэлектрика?
7. Как ведет себя электропроводимость в слабых и в сильных электрических полях?
8. Как ведет себя поверхностная электропроводимость гидрофобных и гидрофильных диэлектриков от процентного содержания в них влаги?

1.4. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называется активная мощность P_a , рассеиваемая в диэлектрике при приложении к нему электрического напряжения и вызывающая его нагрев.

$P_a = UI$ — в постоянном электрическом поле;

$P_a = UI \cdot \cos\varphi$ — в переменном электрическом поле,

где P_a - активная мощность — диэлектрические потери, Вт;

U - приложенное напряжение, В;

I - протекающий ток, А;

φ - угол сдвига фаз между током и напряжением.

1.4.1. Виды диэлектрических потерь

Различают следующие виды потерь:

- а) потери на замедленные виды поляризации;
- б) потери на сквозную электропроводность (токи утечки);
- в) потери на ионизацию (в газообразных или твердых пористых диэлектриках);

г) потери на структурную неоднородность (в неоднородных диэлектриках).

1.4.2. Схемы замещения диэлектриков и векторные диаграммы к ним

Вспомним, что идеальный диэлектрик, который совсем не проводит ток, может быть представлен в постоянном поле как разрыв в электрической цепи, а в переменном — как чистая емкость.

В таком идеальном диэлектрике диэлектрические потери отсутствуют. Однако реальный диэлектрик всегда имеет токи утечки, которые можно представить активным сопротивлением R . Схема замещения такого диэлектрика представлена на рис. 3. Рядом векторная диаграмма U и I ; вектор тока на активном сопротивлении совпадает с вектором напряжения, а полный ток I является суммой векторов I_c и I_a .

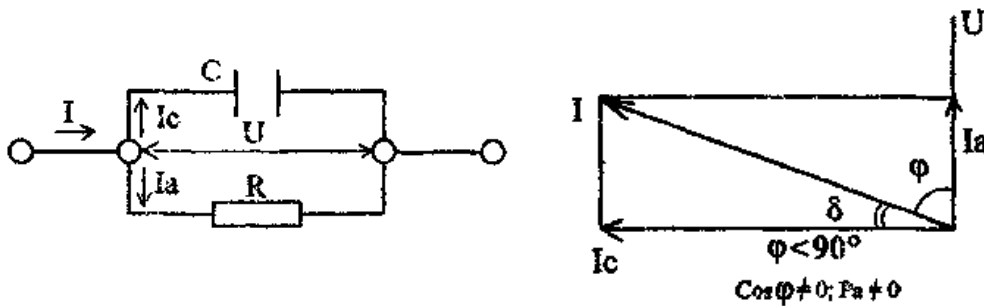


Рис. 3

Угол δ дополняет угол сдвига фаз между током и напряжением (φ) до 90° и называется углом диэлектрических потерь. Для характеристики потерь пользуются tg угла потерь, чтобы избавиться от размерности угла (градусы, минуты).

Из векторной диаграммы тока и напряжения определяем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{I}{\omega \cdot C \cdot R},$$

где ω - круговая частота поля $\omega = 2\pi f$, где f - линейная частота;
 C - емкость диэлектрика

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \Phi;$$

R - его активное сопротивление.

Подставив значение тока (I_a) через $\operatorname{tg} \delta$ в формулу диэлектрических потерь, получим выражение для P_a :

$$P_a = U \cdot I_a = U^2 \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ Вт.}$$

Эта мощность (P_a) характеризует диэлектрические потери при определенных напряжении, частоте и габаритах изделия. В справочнике приводится $\operatorname{tg} \delta$, который характеризует потери в материале.

Зависимость диэлектрических потерь от различных факторов отражает зависимости величин, входящих в формулу потерь, от этих факторов. Например, C зависит от ε , а ε от температуры и частоты. То же самое можно сказать и о электропроводимости, ионизации и др.

Величина $\operatorname{tg}\delta$ приводится в справочных таблицах и характеризует потери в материале. Для полярных диэлектриков значения $\operatorname{tg}\delta$ лежат в диапазоне десятых или сотых долей единиц, для нейтральных меньше, — тысячных или десятитысячных долей единиц.

Вопросы для самоконтроля

1. *Что собой представляют диэлектрические потери?*
2. *Какие виды потерь Вы знаете?*
3. *Каким параметром представлены потери для диэлектриков в справочных таблицах?*
4. *Какой электрической схемой замещения можно изобразить реальный диэлектрик?*
5. *Что такое "угол диэлектрических потерь"?*
6. *Как выглядит векторная диаграмма тока и напряжения для реального диэлектрика?*
7. *Как выглядит зависимость $\operatorname{tg}\delta$ и P_a для полярного диэлектрика в широком диапазоне температур?*
8. *Напишите формулу для мощности (P_a) потерь в диэлектрике с учетом приложенного напряжения, размеров диэлектрика и особенности материала.*
9. *Сопоставьте значения $\operatorname{tg}\delta$ для полярных и нейтральных диэлектриков (на конкретных примерах).*

1.5. Пробой диэлектриков

Диэлектрик в электрическом поле теряет свои свойства электроизоляционного материала и в нем образуется проводящий канал, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление называется пробоем диэлектрика или нарушением его электрической прочности. Минимальное напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением — $U_{пр}$, а соответствующее ему значение напряженности поля — $E_{пр}$ - электрической прочностью диэлектрика.

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}, \text{ В/м,}$$

где d — толщина диэлектрика, м.

Электрическая прочность $E_{пр}$, является одним из важнейших параметров электроизоляционного материала.

1.5.1. Виды пробоя

Для газообразных, жидких и твердых диэлектриков различают несколько видов пробоя.

1) Ионизационный, связанный с ударной и фотоионизацией. Он характерен для газообразных и очень чистых жидких диэлектриков. Развивается мгновенно ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ с). После снятия напряжения прочность таких диэлектриков восстанавливается.

2) Чисто электрический — за счет возникающей лавины электронов. Он характерен для беспримесных твердых однородных и неоднородных материалов с малыми диэлектрическими потерями. Развивается мгновенно ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с), когда скорость электронов $v \geq 100$ км/с.

3) Электрохимический пробой. Он связан с возникновением химических процессов в диэлектрике (жидком или твердом) под действием электрического поля — химическое разложение, электролиз и т.п. Развивается медленно (минуты, часы, дни и более).

4) Электротепловой пробой. Наблюдается в твердых (или жидких) диэлектриках. Обусловлен нарушением теплового равновесия вследствие больших диэлектрических потерь и недостаточности теплоотвода.

Существуют и другие виды пробоя, которые могут иметь место при специфических условиях. Ниже приводятся некоторые из них.

5) Электромеханический пробой наблюдается в полимерных диэлектриках при повышенных температурах. Под действием сил электростатического притяжения между токоведущими частями изделия происходит механическое сдавливание диэлектрика, которое может привести к его механическому разрушению.

6) Электротермомеханический пробой может иметь место в хрупких пористых диэлектриках, например в керамике. При ионизации газа в порах керамики образуются перегретые области, их расширение больше, чем в других областях. В результате в диэлектрике возникают механические напряжения, приводящие к микротрещинам, а в итоге может произойти механическое разрушение диэлектрика.

7) Поверхностный пробой твердых диэлектриков может происходить, если в процессе эксплуатации поверхность диэлектрика подвергается воздействию загрязнений, увлажнению. При этом значительно уменьшается сопротивление поверхности и повышается ток, а соответственно и температура. Это может вызывать интенсивное разложение молекул кислорода воздуха (воды) на атомарный кислород. Под воздействием этих факторов происходит деструкция (разложение) поверхности диэлектрика, которая у ряда материалов сопровождается выделением углерода в виде проводящих мостиков — треков.

Повреждение поверхности вследствие поверхностного пробоя называется трекингом диэлектрика.

В предыдущих четырех разделах были рассмотрены основные электрические параметры диэлектриков, определяющие происходящие в них процессы при воздействии электромагнитных полей:

ε — относительная диэлектрическая проницаемость, определяющая полярность диэлектриков и характеризующая процесс поляризации материалов;

ρ_v, ρ_s — удельное объемное и удельное поверхностное сопротивление диэлектриков, определяющие токи сквозной проводимости и поверхностные токи утечки;

$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь, характеризующий активную мощность, рассеиваемую в диэлектрике и вызывающую его нагрев;

$E_{\text{пр}}$ — пробивная напряженность электрического поля, характеризующая электрическую прочность диэлектриков. Практическое использование диэлектриков вызывает необходимость изучения не только их электрических, но и других характеристик, определяющих механические, тепловые свойства, химическую и радиационную стойкость и др.

В следующем разделе очень кратко перечислим основные физико-химические и радиационные свойства диэлектрических материалов.

1.6. Физико-химические и радиационные свойства диэлектриков

1.6.1. Механические свойства материалов

Прочность — это способность материала сопротивляться действию внешних сил, не разрушаясь.

Физическим пределом текучести называют наименьшее напряжение, при котором образец материала деформируется (течет) без заметного увеличения нагрузки.

Пластичность — свойство материала деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять новую форму после прекращения действия этих сил.

Вязкость — способность материала оказывать сопротивление динамическим (быстрорастающим) нагрузкам.

Твердость — способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого материала.

Механические свойства важны для изоляторов, несущих механические нагрузки, например, для подвесных, проходных, опорных изоляторов.

1.6.2. Тепловые свойства материалов

Нагревостойкость — способность диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры без недопустимого ухудшения своих свойств. Она оценивается минимальной температурой, при которой проявляются изменения электрических (или механических) характеристик.

Теплопроводность — количество тепла, выделяющегося в окружающую среду, прошедшее через единицу площади в единицу времени при градиенте температуры в 1 градус на метр.

Холодостойкость — способность диэлектрика работать при низких температурах без недопустимого ухудшения эксплуатационных характеристик. Эту характеристику иногда называют морозоустойчивостью.

1.6.3. Влагопоглощение, влажность и химическая стойкость материалов

Влага, содержащаяся в воздухе, сильно снижает электрические характеристики многих диэлектриков, так как вода является сильно полярным диэлектриком ($\epsilon = 81$) и обладает малым удельным электрическим сопротивлением ($\rho \approx 10^4$ Ом·м).

Гигроскопичность — способность материала впитывать в себя влагу из окружающей среды.

Влагопроницаемость — способность материала пропускать сквозь себя пары воды.

Влагостойкость — способность материала сохранять свои характеристики на допустимом эксплуатационном уровне в атмосфере, влажность которой близка к состоянию насыщения.

Химическая стойкость — способность материала выдерживать длительное воздействие тех или иных химических реагентов без существенного изменения электрических, механических и др. свойств.

В зависимости от условий эксплуатации должны учитываться вышеперечисленные характеристики диэлектриков.

1.6.4. Радиационная стойкость

Некоторые диэлектрики при эксплуатации могут подвергаться воздействию радиоактивных излучений высокой энергии. К таким излучениям относят корпускулярное излучение (нейтроны, α -, β - частицы) и волновое излучение (γ -лучи, рентгеновское излучение).

Радиационная стойкость диэлектриков особенно важна в аппаратуре, работающей в условиях космического излучения, в ядерной энергетике. Интенсивность действующих излучений измеряют в рентгенах ($1\text{Р} = 0,11\text{Дж/м}^3$).

Радиационная стойкость — способность диэлектрика выдерживать воздействие ионизирующего излучения без недопустимого ухудшения его основных свойств.

Воздействие радиоактивных излучений обычно приводит к изменению структуры материала. В органических полимерах образуются (или исчезают) двойные связи, возникают новые поперечные связи, поэтому меняются и свойства материалов. Они могут становиться хрупкими (фторопласт -4) или приобретать высокую нагревостойкость (например, полистирол).

Неорганические диэлектрики — стекло, кварц, алюминоксид — более устойчивы к радиоактивному излучению, однако оно несколько снижает их электросопротивление и электрическую прочность.

Вопросы для самоконтроля

1. Что собой представляет пробой диэлектриков в электрическом поле?
2. Какие Вы знаете виды пробоя?
3. Каковы особенности пробоя, обусловленного ударной ионизацией?
4. Какова особенность электротеплового пробоя?
5. От каких основных факторов зависит электрическая прочность твердых диэлектриков?
6. Для чего надо знать не только электрические характеристики диэлектриков, но и их физико-химические характеристики?

1.7. Классификация диэлектрических материалов

Обычно диэлектрики классифицируются по:

- 1) агрегатному состоянию — газы, жидкости, твердые вещества;
- 2) химическому составу — органические, неорганические и элементоорганические;
- 3) характерным группам каждого из химического состава:
 - органические:
 - а) воскообразные,
 - б) смолы и пластмассы,
 - в) битумы и компаунды,
 - г) лаки и клеи,
 - д) лакоткани,
 - е) слоистые пластики,
 - ж) эластомеры,
 - з) фторорганические диэлектрики.
 - неорганические:
 - а) стекла, ситаллы и эмали,
 - б) керамика,
 - в) слюда и материалы на её основе,
 - г) сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики,
 - д) оксидная и фторидная изоляции,
 - е) асбест.
 - элементоорганические:
 - а) кремнийорганическая смола,
 - б) кремнийорганический каучук,
 - в) кремнийорганический компаунд и др.

Каждая из классификационных групп имеет свои специфические особенности и соответственно - свое применение в электроэнергетике: электрических машинах, устройствах, элементах и т.д.

Все основные свойства материалов любой группы приводятся в таблицах справочников по электро- или радиотехническим материалам.

Раздел 2. Полупроводники

Это материалы, имеющие запрещенную зону не более 3 эВ. На их основе изготавливаются датчики различных видов энергий, выпрямители, триоды, тиристоры и множество других приборов и элементов. Используются они в основном в твердом агрегатном состоянии, хотя имеются и жидкие полупроводники, например: Bi_2S_3 ; Cu_2S . Ширина запрещенной зоны полупроводников имеет большой диапазон — от сотых долей электронвольта до 3 эВ. Удельные электрические сопротивления занимают более десяти порядков ($10^{-4} \dots 10^{+8}$ Ом·м).

Полупроводники относятся к неметаллам, а по химическому составу могут быть неорганическими — кремний, арсенид галлия, карбид кремния и органическими — антрацен, нафталин, фталоцианин меди и др.

Электрические параметры, отражающие основные явления и свойства полупроводников, приводятся в справочных таблицах. В конце каждой из тем приводятся вопросы для самоконтроля, на которые следует ответить. В конце комплекса по этому разделу приводится тест № 2.

Раздел учебного пособия [2], с. 36...56.

2.1. Основные особенности полупроводников

У полупроводниковых материалов есть ряд особенностей, отличающих их от других групп материалов.

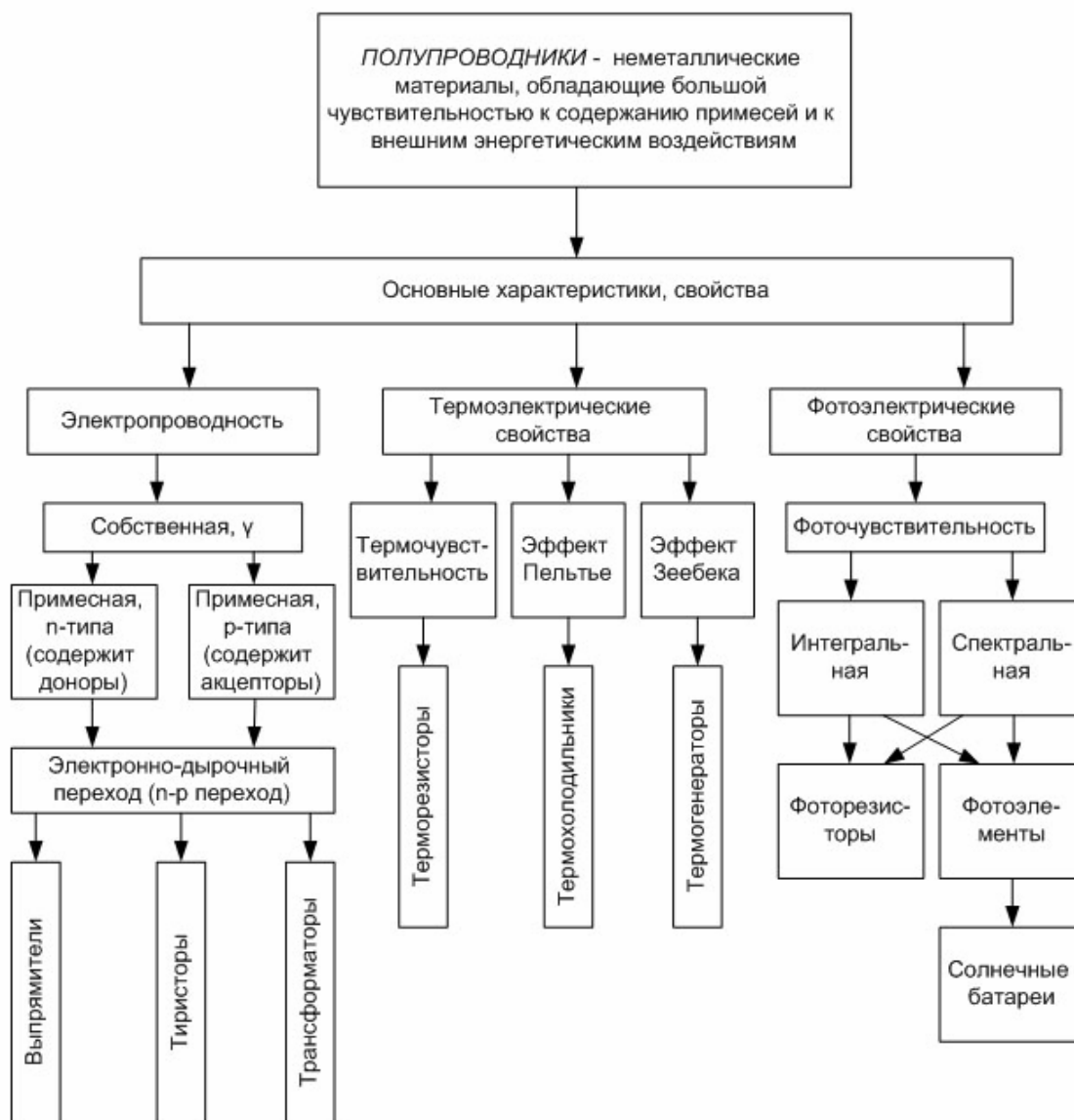
1. Они занимают промежуточное положение между диэлектриками и проводниками по удельному электрическому сопротивлению.

2. Их электрические параметры очень чувствительны к содержанию примесей (например, 0,000001% для примеси у кремния), могут изменить величину электропроводности на один или два порядка.

3. Внешние воздействия, например тепло, свет, давление, трение и др., могут сильно изменять свойства материала. Поэтому полупроводники используются для изготовления датчиков всевозможных видов энергии: терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы и др.

4. Полупроводники, в зависимости от определенных вводимых примесей, могут обладать электронной (n - типа) или дырочной (p - типа) электропроводимостью. Это позволяет создавать электронно-дырочный переход (p - n переход), который обладает униполярной проводимостью и позволяет создавать выпрямители (диоды), усилители (триоды) и другие активные элементы и приборы.

Рассмотрим некоторые параметры и свойства полупроводников, которые проявляются и используются в широко применяемых элементах и приборах (структурная схема №3).



Структурная схема № 3

2.2. Электропроводимость полупроводников

Различают собственную (γ_i) электропроводность, когда полупроводник не имеет примесей, примесную (γ_n) *n*-типа, когда в него введена донорная примесь; примесную (γ_p) *p*-типа, когда в полупроводник введена акцепторная примесь.

Напомним, что электропроводность любого материала определяется формулой:

$$\gamma = q \cdot N \cdot u, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1},$$

где N - количество носителей заряда,

u - подвижность носителей заряда,

q - заряд электрона.

Ниже, на рис. 4 приведены энергетические диаграммы собственного полупроводника (а), полупроводника с донорной примесью (б) и с акцепторной примесью (в).

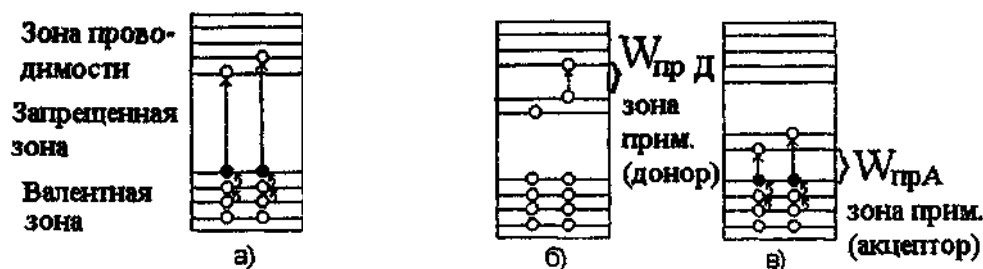


Рис. 4

2.2.1. Собственная проводимость (γ_i)

Она осуществляется двумя типами носителей—электронами (n), которые переходят из валентной заполненной зоны в зону проводимости, оставляя свободное место (дырку) в валентной зоне, и дырками (p), которые, заполняясь нижележащими электронами валентной зоны, перемещаются в ней. Таким образом, в переносе зарядов участвуют и электроны, и дырки, причем в равных количествах. Формула для собственной электропроводности γ_i полупроводников имеет вид:

$$\gamma_i = q \cdot n \cdot u_n + q \cdot p \cdot u_p.$$

Электропроводность γ_i состоит из двух составляющих: электронной и дырочной; так как количество $n = p$, а $u_n > u_p$, собственная проводимость γ_i имеет преобладание электронной составляющей и носит электронный характер. Перепишем формулу:

$$\gamma_i = q \cdot n_i \cdot (u_n + u_p),$$

где n_i — концентрация собственных носителей заряда;

u_n — подвижность электронов, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$;

u_p — подвижность дырок, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

2.2.2. Примесная проводимость n - типа (γ_n)

Она возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой больше, чем валентность полупроводника. Например, для четырехвалентного кремния - Si, донорной примесью является пятивалентный мышьяк - As. Атом мышьяка, отдавший свой электрон в зону проводимости, превращается в положительно заряженный ион, который хотя и имеет заряд, но закреплен в кристаллической решетке и в электропроводности не участвует.

Перенос зарядов происходит только за счет электронов

$$\gamma_n = q \cdot n \cdot u_n.$$

2.2.3. Примесная проводимость p - типа (γ_p)

Она возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой меньше валентности основного полупроводника. Например, если в кремний ввести трехвалентный алюминий (Al), он является акцепторной примесью для Si. Акцептор захватывает электрон из валентной зоны, превращаясь при этом в отрицательно заряженный ион, а в валентной зоне начинается эстафетное перемещение электронов, т. е. будет иметь место дырочная проводимость.

$$\gamma_p = q \cdot n_p \cdot u_p$$

Донор – дающий; акцептор – принимающий.

2.2.4. Изменение электропроводности при воздействии теплового тока

С увеличением температуры электропроводность полупроводников увеличивается экспоненциально. Такой характер поведения обусловлен носителями заряда.

Запишем формулу, отражающую зависимость концентрации носителей заряда от температуры:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{W_t}{2K \cdot T}}$$

где N_t - количество носителей заряда при данной температуре T , м^{-3} ;
 N_0 - количество носителей при нормальных условиях ($T_{\text{комн.}}$), м^{-3} ;
 W_t - термическая энергия активации носителей, Вт; для примесных полупроводников $W_t = W_{np}$; для собственных - $W_t = W_g$;
 W_g - запрещенная зона;
 K - постоянная Больцмана ($K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град);
 T - абсолютная температура, К.

Электропроводность полупроводника от температуры изменяется экспоненциально по формуле:

$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}$$

где A - постоянная, представляющая собой электропроводность полупроводника при экстремальных условиях (её для каждого материала можно рассчитать); это электропроводность, например, при $T = 0$ К.

Температурный коэффициент сопротивления полупроводников TKR - отрицательный, так как сопротивление их, как правило, с увеличением температуры уменьшается

$$TKR = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}, \text{ 1/град} < 0,$$

где R_1 - сопротивление полупроводника при начальной температуре T_1 , Ом;
 R_2 - сопротивление при более высокой температуре T_2 , Ом.

2.3. Термоэлектрические свойства

Эти свойства полупроводников рассмотрим на примере терморезисторов и термоэлементов.

Терморезисторы

Чувствительность некоторых полупроводников к тепловому полю очень велика, например, таких как оксиды CuO, NiO, MnO, их смеси. Она может составлять (3 ... 7) % на 1 градус температуры.

Эта особенность используется для изготовления терморезисторов — сопротивлений, величина которых сильно изменяется от температуры.

Используются терморезисторы как датчики температуры в различных схемах автоматики, в измерительных приборах в целях температурной компенсации, непосредственно для измерения температуры.

Термоэлементы

Это устройства, с помощью которых можно преобразовывать энергию электрического поля в тепловую энергию, и наоборот — тепловую в электрическую. Эти преобразования основаны на эффектах Зеебека и Пельтье, которые были открыты еще в начале 19 века (1821 г. и 1834 г.).

Прежде чем разобрать эти эффекты, рассмотрим некоторые причины, которые могут способствовать направленному движению микрочастиц, носителей заряда и др.

Направленное движение заряженных частиц вызывают:

- 1) градиент электрического поля;
- 2) градиент теплового поля;
- 3) градиент концентрации частиц и другие факторы. (Движение частиц направлено от большего градиента к меньшему!)

«Градиент» - разный уровень, шаг.

Заметим, что если в полупроводнике образуются электронно-дырочные пары, т.е. если валентный электрон из своей зоны переходит в зону проводимости, образуя в валентной зоне дырку, способную в ней перемещаться, а в зоне проводимости перемещается сам электрон, то на этот процесс затрачивается энергия. Если же электрон из зоны проводимости переходит на нижнюю валентную зону и заполняет находящуюся там дырку, этот процесс идет с выделением энергии и называют его рекомбинацией электронно-дырочной пары (исчезновение носителя заряда—электрона и исчезновение носителя заряда—дырки).

Полупроводниковый термоэлемент представляет собой два разнотипных полупроводника, концы которых с одной стороны соединены проводящей пластиной (например - Си), а вторые концы разомкнуты и к ним можно присоединять измерительный прибор (например, гальванометр) или источник постоянного напряжения (рис. 5).

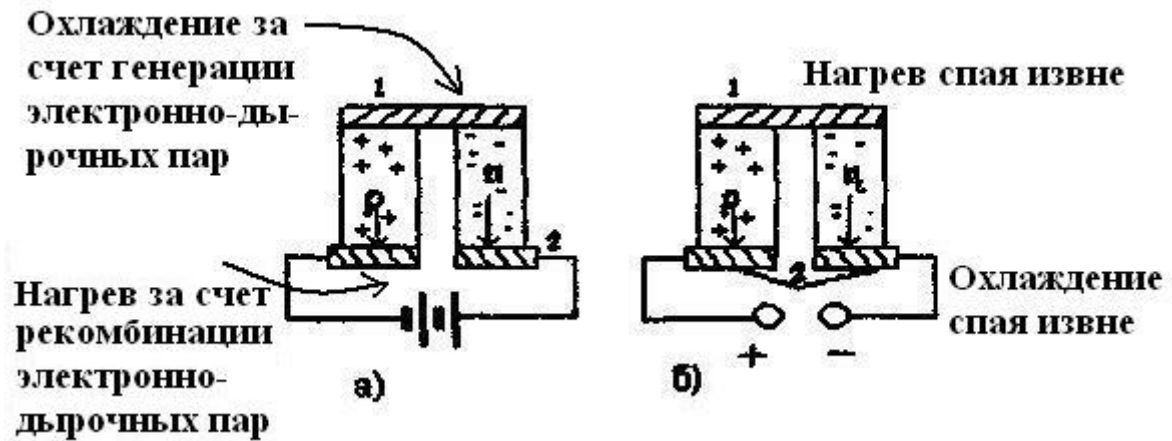


Рис. 5

Нагрев одного спая и охлаждение другого можно подсчитать по формуле Пельтье:

$$Q_{\text{п}} = \Pi \cdot I \cdot \tau,$$

где $Q_{\text{п}}$ - теплота Пельтье, которая на одном спая выделяется (нагрев), а на другом спая поглощается (охлаждение), Дж;

Π - коэффициент Пельтье для конкретных пар материалов (столбиков термоэлемента);

I - протекающий ток, А;

τ - время протекания тока, с.

В материале, по которому протекает ток, выделяется теплота Джоуля-Ленца, причем независимо от того или другого спая. Она определяется формулой:

$$Q_{\text{Д-Л}} = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

где $Q_{\text{Д-Л}}$ - теплота Джоуля-Ленца, Дж;

R - сопротивление материала, Ом.

Как видим и $Q_{\text{п}}$ и $Q_{\text{Д-Л}}$ зависят от величины протекающего тока.

Эффект Зеебека представлен на рис. 5, б. Если один из спаев термоэлемента, например верхний 1, нагреть, а спай 2 охладить, то на разорванном нижнем спая появится постоянная разность потенциалов.

Напряжение на таком термоэлементе определяется формулой Зеебека:

$$U = A \cdot (T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}),$$

где U - напряжение;

A - коэффициент термоЭДС данных пар полупроводниковых столбиков;

$T_{\text{нагр}}$ - температура нагретого спая; $T_{\text{хол}}$ - температура охлаждаемого спая.

В термоэлектрических явлениях взаимодействуют электрические и тепловые поля.

Вопросы для самоконтроля

1. Каков характер изменения электропроводности полупроводников с увеличением температуры?

2. Нарисуйте энергетическую диаграмму полупроводника с акцепторной примесью.

3. Что происходит на спае двух разнородных полупроводников термоэлемента, если на этом спае идет рекомбинация?

4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику терморезистора.

5. Как ведет себя теплота Пельтье и теплота Джоуля–Ленца на охлаждаемом спае термоэлемента от изменения тока?

2.4. Электронно-дырочный (или $p-n$) переход

В каждом примесном полупроводнике есть два вида носителей: основные и неосновные, причем основных намного больше, чем неосновных. Обычно основные носители обозначаются: n_n и p_p , а неосновные имеют противоположный индекс основному обозначению, т.е. n_p и p_n .

$$n_n \gg p_n \text{ и } p_p \gg n_p.$$

Если привести в соприкосновение (на расстояние порядка атомных) два полупроводника с разным типом проводимости, то в результате градиента концентрации на их границе начнется направленное движение основных носителей заряда (рис. 6, в). Плотность тока диффузии при этом

$$I_d = q \cdot D \cdot \bar{\nabla} N,$$

где D - коэффициент диффузии;

$\bar{\nabla} N$ - градиент концентрации носителей заряда;

q - заряд электрона.

Электроны, которых много в n -области, будут переходить в p -область. Как только приграничный слой электронов перейдет в соседнюю область, нарушится электронейтральность n - и p -областей у границы. Электронная область зарядится положительно, а дырочная — отрицательно. Между ними появится электрическое приграничное диффузионное поле E_d , направленное от (+) к (-) (рис. 6). Это поле создает потенциальный барьер для дальнейшего перехода электронов в p -область, а дырок в n -область.

Электронно-дырочные ($p-n$) переходы используются для изготовления множества активных приборов и устройств: диодов, триодов тиристоры, фотоэлементов и др.

Для изготовления $p-n$ переходов используют обычно монокристаллические материалы атомарных (элементарных) полупроводников — кремний, германий, селен, а также полупроводниковых соединений — арсенид галлия, фосфид галлия и др.

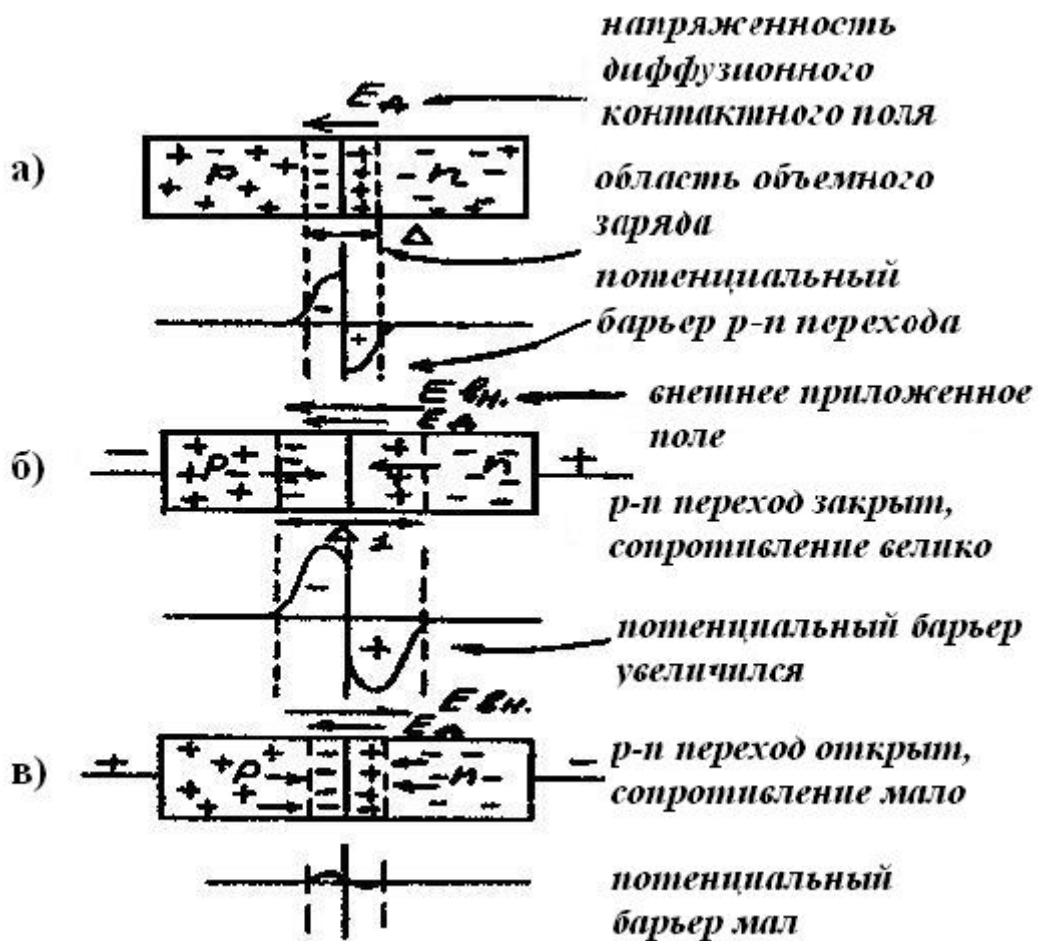


Рис. 6

Вопросы для самоконтроля

1. В каких приборах и для каких целей используется p-n переход?
2. Как направлено диффузионное поле на границе p и n областей p-n перехода?
3. Нарисуйте вольт-амперную характеристику p-n перехода?

2.5. Фотоэлектрические свойства полупроводников

Физический процесс внутреннего освобождения электронов фотонами, т.е. квантами электромагнитного излучения, называется внутренним фотоэффектом, а добавочная электропроводность, обусловленная этим процессом, называется фотопроводимостью.

Чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону примесную, или из примесной в зону проводимости, нужно затратить определенную энергию.

$$\text{Энергия фотона } W_{\phi} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda},$$

где $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ - постоянная Планка, Дж·с;

ν - частота электромагнитного излучения, 1/с;

$c = 3 \cdot 10^8$ - скорость света в вакууме, м/с;

λ - длина волны электромагнитного излучения, м.

Фоторезистивный эффект

Если энергия фотона W_ϕ , попадающего на поверхность полупроводника, больше энергии примеси $W_\phi \geq W_{пр}$ — возникает примесная фотопроводимость; если больше ширины запрещенной зоны полупроводника $W_\phi > W_g$ — возникает собственная фотопроводимость; если W_ϕ полупроводник не подвергается облучению — он обладает темновой электропроводностью — γ_T (рис. 7).

Каждый фотон, воздействующий на полупроводник, при условии, например, что $W_\phi \geq W_g$, способен перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости и создать пару носителей — электрон и дырку.

На рис. 8 приведены спектральные характеристики фотосопротивлений — зависимость чувствительности полупроводника — (в %), от длины волны λ падающего на него лучистого потока. Мы видим, что максимальная чувствительность наблюдается в сравнительно узком диапазоне длин волн излучения, например для ФС1 и ФС2.



Рис. 7

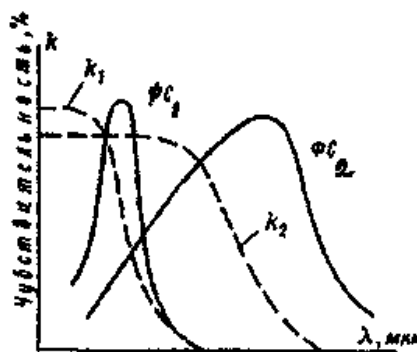


Рис. 8

Каждый материал имеет свой спектр поглощения и свой спектр излучения, а также свою собственную частоту колебания. Для каждого вещества известны эти частотные спектры, они сведены в таблицы — полосы. По спектральной характеристике можно определить исследуемый материал, а по всплескам (пикам) на основной спектральной характеристике можно определить какие примеси содержит данное вещество в своем составе (спектральный анализ).

На описанных фотосвойствах полупроводниковых материалов основана работа полупроводниковых фоторезисторов, фотоэлементов и др. приборов.

Фотоэлектрический эффект

Фотоэлектрический эффект наблюдается в фотоэлементах, которые служат для преобразования световой (лучистой) энергии в электрическую (в солнечных батареях, вентильных элементах).

В основе устройства ФЭ лежит p - n переход (рис. 9).

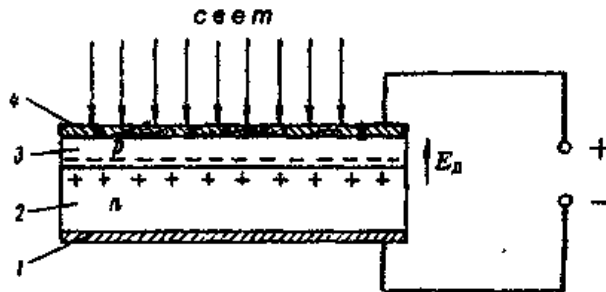


Рис. 9

Когда лучистый поток падает на прозрачную для него верхнюю часть фотоэлемента, и если энергия фотонов $W_{\phi} \geq W_g$ полупроводника, то в верхней части будут образовываться электроны и дырки. Они диффундируют вглубь полупроводника, подходят к p - n переходу, и здесь происходит их разделение. Неосновные носители заряда (для верхней области) втягиваются в нижнюю часть полупроводника, свободно проходя через потенциальный барьер, а основные носители заряда не проходят и скапливаются в верхней части. Таким образом, вверху скапливается один тип носителей, внизу — противоположный тип. Любое скопление противоположных носителей заряда создает электрическое поле. Это и будет фотоэлектродвижущая сила, которая используется как источник электрической энергии.

На этом принципе работают солнечные батареи, вентильные элементы — возобновляемые источники энергии.

Вопросы для самоконтроля

1. Что собой представляет фотоэффект?
2. При каких значениях энергии фотона возникает фотопроводимость?
3. Поясните спектральную характеристику полупроводника.
4. Как можно преобразовать световую энергию в электрическую?
5. Поясните интегральную характеристику фоторезистора.

2.6. Классификация полупроводниковых материалов

Приведем классификацию полупроводников по химическому составу и структуре материалов.

1. Элементарные атомарные кристаллические материалы: кремний (Si), германий (Ge), селен (Se), фосфор (P), теллур (Te).

2. Полупроводниковые кристаллические (алмазоподобные) соединения, типа:

$A^1 B^7$ — CuCl, AgCl и др.

$A^2 B^6$ — PbS, CdS...

$A^3 B^5$ — GaAs, InSb...

$A^4 B^4$ — SiC, GeSi...

3. Молекулярные неорганические полупроводники: Te₂, Se₂ ...

4. Оксиды, теллуриды, фосфиды, селениды, карбиды. NiO, MgO, CuO, SiC, PbS и др.

5. Стеклообразные полупроводники: халькогенидные стекла - As₂Te₂Se, As₂Se₃·Al₂Se₃.

6. Органические полупроводники:

а) ароматические углеводороды - антрацен, нафталин и др.

б) красители и пигменты - краска индиго, хлорофилл и др.

в) комплексы с переносом зарядов (донорно-акцепторные системы): бром-антрацен, иод-пирен.

Раздел 3. Проводники

Это материалы, служащие проводниками электрического тока. Их удельное электрическое сопротивление мало и составляет от 10^{-8} до 10^{-4} Ом·м. Проводники могут быть твердыми веществами: кристаллические металлы и сплавы, углерод — это проводники 1-го рода; жидкими — электролиты — это проводники 2-го рода; газообразными — газоразрядная плазма — проводники 3-го рода.

В этом разделе мы будем рассматривать только проводники 1-го рода, которые практически не имеют запрещенной зоны, так как зоны валентная и проводимости у них перекрываются (структурная схема № 4).

В конце каждой темы ответьте на вопросы для самоконтроля. После проработки раздела протестируйте себя по тесту № 3. В приложении № 3 проверьте правильность выбранных ответов.

Раздел учебного пособия [2], с. 56...68.

Металлы обладают металлическим типом химической связи, при которой валентные электроны атомов обобществлены и образуют так называемый "свободный" электронный газ. Атомы, расположенные в узлах (междуузлиях) кристаллической решетки, являются положительно заряженными ионами, так как они отдали свои электроны "в общее пользование" (рис. 10). В такой системе имеет место большое количество свободных носителей заряда — электронов.

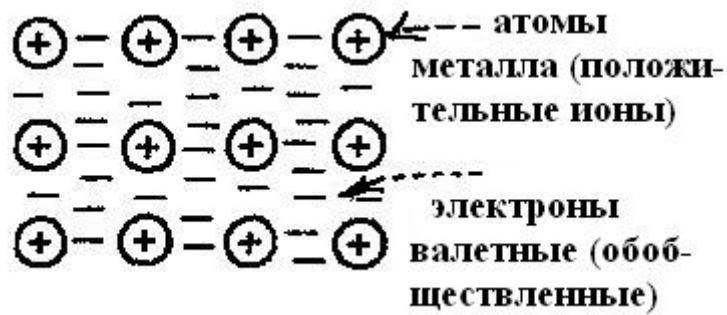
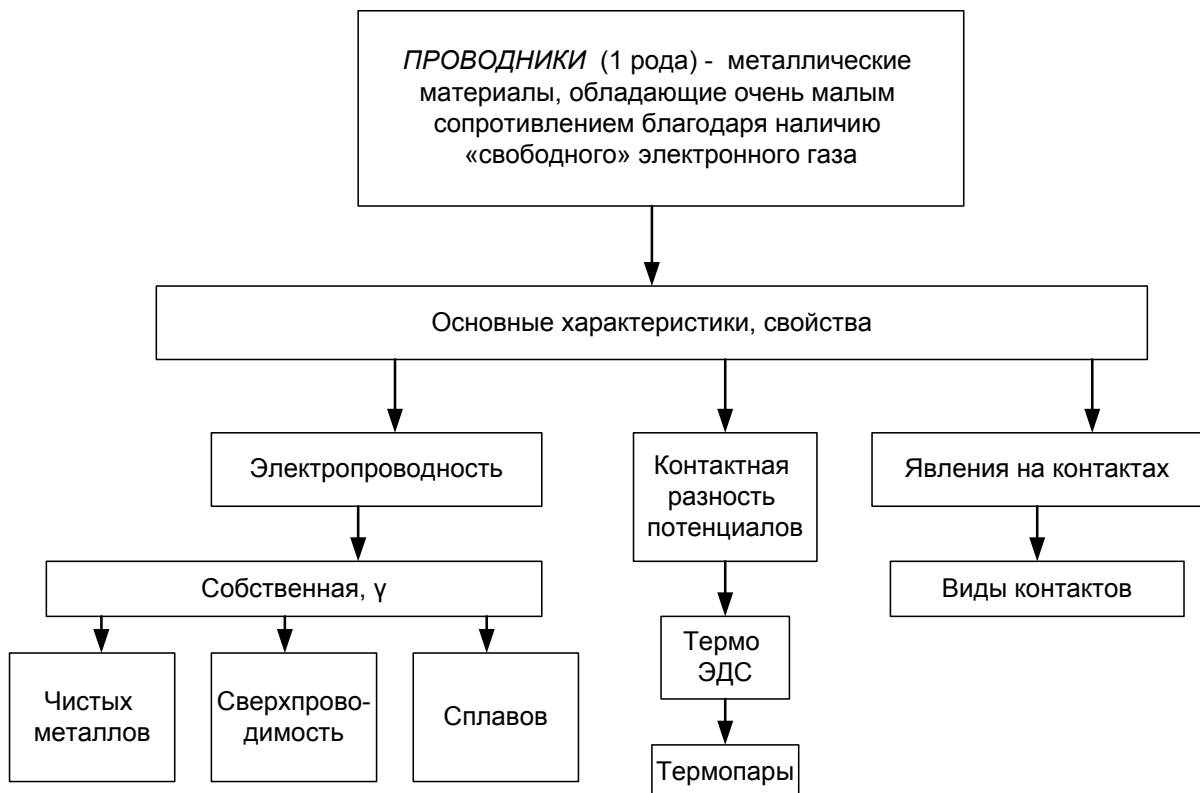


Рис. 10

Основные электрические параметры проводников, отражающие их свойства, приводятся в справочных таблицах [2]. Задача контрольного задания, относящаяся к этому разделу, — № 3.

3.1. Электропроводность проводников

В металлических проводниках имеется большое количество свободных носителей заряда — электронов, поэтому их электропроводность велика.



Структурная схема № 4

Формула электропроводности проводников:

$$\gamma = q \cdot N \cdot u,$$

где N - концентрация свободных носителей заряда, м^{-3} ;

u - подвижность носителей заряда, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$;

q - величина заряда носителя, Кл.

При большом количестве электронов (это $\sim 10^{27}$ в одном кубическом метре) их число практически не зависит от содержания примесей или от температуры, но на подвижность примеси оказывает большое влияние, создавая своим присутствием дополнительные препятствия направленному движению электронов в электрическом поле. Повышение температуры также уменьшает электропроводность.

Температурный коэффициент ТКР (ТК ρ) проводников (чистых металлов) положителен и составляет величину $\approx(3 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-3})/^\circ\text{град}$.

С увеличением температуры удельное сопротивление обычно растет. При инженерных расчетах пользуются формулой:

$$\rho_t = \rho_0 \cdot [1 + \alpha_p \cdot (t - t_0)],$$

где ρ_t – удельное сопротивление при температуре t ;

ρ_0 – удельное сопротивление при комнатной температуре (обычно $t=20^\circ\text{C}$);

α_p – средний температурный коэффициент удельного сопротивления.

Механическая обработка металлов вызывает искажение кристаллической решетки и приводит к увеличению удельного сопротивления.

3.2. Сверхпроводимость проводников

Многие металлы и сплавы ниже определенной температуры (для каждого материала температура своя) переходят в сверхпроводящее состояние, т.е. их сопротивление постоянному току становится практически равным нулю. Если металл переходит в это состояние скачком - это сверхпроводник 1-го рода, если плавно - сверхпроводник 2-го рода (как правило это сплав).

Температура перехода в сверхпроводящее состояние называется критической ($T_{кр}$), выше этой температуры сверхпроводник переходит в обычное проводящее состояние (рис. 11).

На рис. 11 показано поведение сверхпроводника первого рода - Ir.св. и сверхпроводника второго рода Pr.св. в широком диапазоне температур.

Очень кратко сверхпроводимость можно объяснить тем, что в металле при определенных условиях образуются пары электронов (куперовские пары), имеющие противоположные импульсы и спины. Такая пара взаимодействует с кристаллической решеткой: один электрон, отдавая ей свой импульс, переводит ее в возбужденное состояние; второй электрон этой пары забирает переданный решетке импульс и тем самым переводит ее в нормальное (первоначальное) состояние.

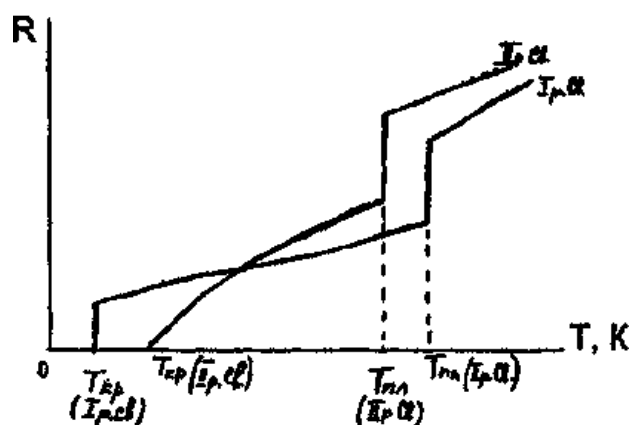


Рис. 11

Отсутствие сопротивления в сверхпроводнике объясняется тем, что движение всех электронных пар в металле можно описать как распространение одной (суммарной) электронной волны, которая не рассеивается кристаллической решеткой потому, что сама решетка участвует в образовании этой волны, т.е. собственные колебания решетки согласованы с электронной волной, имеют те же длины волн и фазы.

Надо заметить, что не все чистые металлы и сплавы переходят в сверхпроводящее состояние. Например, такие хорошие проводники, как медь и серебро, при нормальных условиях не переходят в сверхпроводящее состояние даже при температурах близких к абсолютному нулю.

В табл. 1 приведены некоторые проводниковые материалы, способные становиться сверхпроводниками при низких температурах, их критические тепловые и магнитные поля.

Таблица 1

Материал	Критическая температура $T_{кр}, K$	Критическое магнитное поле $H_{кр}, kA/m$
Цинк (Zn)	0,88	4,24
Алюминий (Al)	1,2	8
Кадмий (Cd)	0,56	2,5
Ртуть (Hg)	4,15	32,8
Свинец (Pb)	7,2	64,5
Ниобат олова (Nb_3Sn)	18,1	$19,5 \cdot 10^3$

Применение сверхпроводников в мощных магнитах, трансформаторах, генераторах, линиях передач сводит к нулю потери в проводниках и позволяет значительно повышать плотность тока и напряженность магнитного поля.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем обусловлена высокая проводимость проводников 1-го рода?
2. На какой параметр (в формуле проводимости) оказывают влияние по-

вышение температуры, введение примесей в металл и механическое искажение кристаллической решетки?

3. Что собой представляет температурный коэффициент удельного электрического сопротивления проводников?

4. По какой формуле можно рассчитать сопротивление проводника при температуре выше комнатной, 20 °С?

5. Что собой представляет явление сверхпроводимости?

6. Почему при определенных (низких) температурах в некоторых проводниках сопротивление падает до нуля?

7. Какие факторы могут вывести сверхпроводник из сверхпроводящего состояния?

3.3. Контактная разность потенциалов Термоэлектродвижущая сила

Если два различных металла или сплава приводятся в плотное соприкосновение, между ними может возникать контактная разность потенциалов (КРП). Причина ее появления состоит в неодинаковой величине работы выхода электронов из металлов, а также в различном давлении электронного газа (различной плотности свободных электронов) у разных металлов.

Если взять два разных проводника - А и В (рис. 12) с работами выхода электронов $W_{выхА}$ и $W_{выхВ}$; плотностью электронов n_A и n_B , то при соотношении, например, $W_{выхА} < W_{выхВ}$ и $n_A > n_B$, электроны из А перейдут в приграничном слое контакта в В (градиент концентрации электронов!), нарушится электронейтральность и на границе соприкосновения появится контактная разность потенциалов, направление которой показано стрелкой.

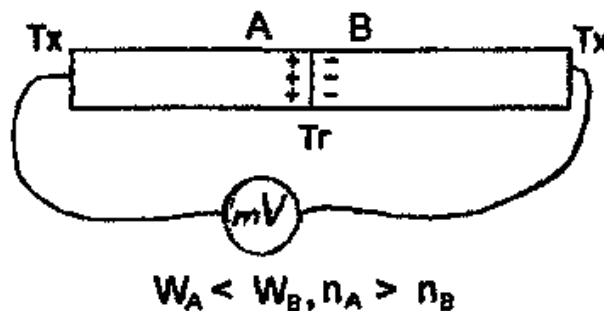


Рис. 12

Если температура спая (T_2) будет больше температуры (T_x) концов проводников, между которыми включить измерительный прибор (гальванометр или милливольтметр), то в замкнутой цепи возникнет термоэлектродвижущая сила, которую можно определить по формуле:

$$U = \frac{k}{q} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \cdot (T_2 - T_x),$$

где n_{0A} и n_{0B} - плотности электронов в А и В, м^{-3} ;
 K - постоянная Больцмана, $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град;
 q - заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ А·с.

Контактная разность потенциалов и термоЭДС должны учитываться при изготовлении точных измерительных приборов; чтобы не вносить погрешности в измерения, надо подбирать такие контактирующие металлы, между которыми возникает как можно меньшие КРП и термоЭДС. Примером пар проводников для изготовления термопар могут служить: медь-константан, хромель-копель, которые используются для измерения температур до 300...500 °С, хромель-алюмель – до 900...1000 °С и др.

3.4. Контакты

При механическом соприкосновении двух твердых тел не происходит такое их сближение, при котором они образуют единое целое для прохождения тока. Основные причины этому:

- поверхности тел имеют шероховатости, превышающие размеры атомов;
- многие металлы при воздействии окружающей среды окисляются, образуя на поверхности окисные пленки, являющиеся в большинстве случаев диэлектрическими (CuO , Ag_2O , Al_2O_3 и т.п.);
- на поверхности твердых тел адсорбируются молекулы кислорода, воды, газов, пыли, содержащиеся в окружающей среде.

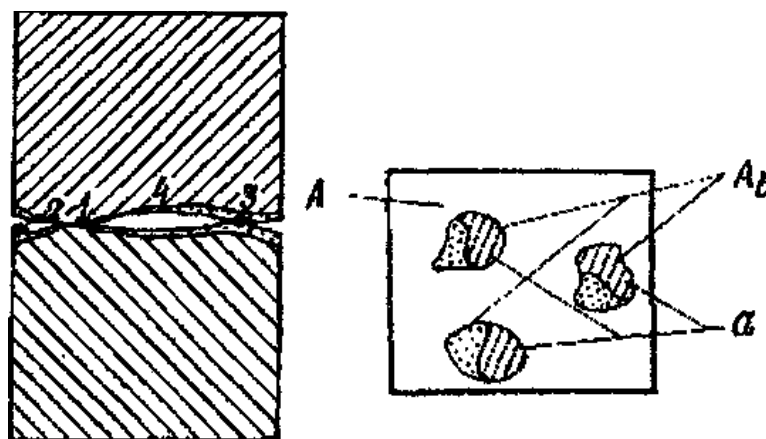


Рис. 13

Для твердых материалов касание их поверхностей происходит не по всей площадке А, а в нескольких малых площадках, часть которых представляет чистый металл 1, а часть окисленный 3 рис. 13. В ряде мест (2, 4) контакт отсутствует в результате наличия воздушных зазоров. Если вся поверхность контакта материа-

лов A , контактные площадки A_b , а площадь чисто металлических контактов a , то соотношения между ними:

$$a < A_b \ll A.$$

Рассмотрим некоторые из этих явлений:

- так как площадь электрического контакта a меньше, чем расчетная A , то в месте контакта происходит выделение значительной тепловой энергии - контакт нагревается за счет локальных перегревов;

- при замыкании и размыкании происходит механический износ поверхностей контактной пары (выкрашивание из-за трения и усталости материала);

- при размыкании контактов под действием значительных токов (в высоковольтной аппаратуре), когда возникает дуга, может происходить перенос одного металла на поверхность другого (дуговая эрозия), их сплавление.

Наличие градиента температур, может привести к диффузии носителей заряда от нагретого контакта к более холодной периферии материала, и (или) диффузии атомов металла.

Контактное сопротивление R принимается как сопротивление стягивания (следствие стягивания линий токов к проводящей площадке), и сопротивление пленок на площадках касания R_f :

$$R = R_{c1} + R_{c2} + R_f$$

где R_{c1} , R_{c2} - сопротивления стягивания первого и второго контактов;
 R_f - сопротивление пленки.

Большой процент выхода электрической аппаратуры из строя происходит за счет процессов, происходящих на контактах. Поэтому при выборе материалов для контактных пар нужно учитывать: условия их эксплуатации, окружающую среду; взаимодействие материалов друг с другом (термоЭДС, взаимная диффузия), твердость, окисляемость и т.д.

Вопросы для самоконтроля

- 1. Какие явления наблюдаются при контактировании двух разных металлов?*
- 2. Что собой представляет термоЭДС в контактной паре проводников?*
- 3. Какие явления наблюдаются в электрическом контакте проводников?*
- 4. Чем сопровождается явление стягивания токовых потоков в месте контактирования проводников?*
- 5. Из каких сопротивлений складывается полное сопротивление контактной пары?*

3.5. Классификация проводников

Обычно проводники классифицируют по их удельному сопротивлению, температуре плавления, твердости и другим факторам.

К первой классификационной группе относят материалы высокой проводимости. Обычно это чистые материалы: медь, серебро, алюминий, никель, и др.

Ко второй группе относят материалы высокого сопротивления. Это, как правило, сплавы: константан, манганин, нихром и др.

К третьей группе относят материалы, способные переходить при определенных критических температурах в сверхпроводящее состояние — сверхпроводники 1-го и 2-го рода: кадмий, цинк, тантал, свинец, сплав - Nb_3Sn и др.

В четвертую группу включим различные материалы, используемые в качестве термопар: медь-константан; медь-копель; хромель-копель; хромель-алюмель; платина-платинородий.

В пятую группу относят материалы, используемые в качестве контактных для сильноточной аппаратуры, слаботочной аппаратуры, размыкаемых высоковольтной и низковольтной аппаратуры, скользящих: серебро, медь, золото, вольфрам, графит, композиции: Cu-W, Cu-графит, Ag-W и др.

Раздел 4. Магнитные материалы

Все вещества в природе взаимодействуют с внешним магнитным полем, но каждое вещество по-разному.

Магнитные свойства веществ зависят от магнитных свойств элементарных частиц, структуры атомов и молекул, а также их групп, но основное определяющее влияние оказывают электроны, их магнитные моменты.

Все вещества по отношению к магнитному полю, поведению в нем, разделяются на следующие группы:

Диамагнетики - материалы, не имеющие постоянного магнитного дипольного момента, обладающие относительной магнитной проницаемостью ($\mu \leq 1$) чуть меньше единицы. Относительная диэлектрическая проницаемость μ диамагнетиков почти не зависит от величины магнитного поля (H) и не зависит от температуры. К ним относятся: инертные газы (Ne, Ar, Kr, Xe); водород (H_2); медь (Cu), цинк (Zn), серебро (Ag), золото (Au), сурьма (Sb), и др.

Парамагнетики - материалы, имеющие постоянные дипольные моменты, но расположены они беспорядочно, поэтому взаимодействие между ними очень слабое. Относительная магнитная проницаемость парамагнетиков чуть больше единицы ($\mu \geq 1$), слабо зависит от напряженности магнитного поля и от температуры.

К парамагнетикам относятся следующие материалы: кислород (O_2), алюминий (Al), платина (Pt), щелочные металлы, соли железа, никеля, кобальта и др.

Ферромагнетики - материалы, имеющие постоянные магнитные дипольные моменты, доменную структуру. В каждом домене они параллельны друг другу и одинаково направлены, поэтому взаимодействие между ними очень сильное. Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков велика ($\mu \gg 1$), у некоторых сплавов достигает до 1 500 000, зависит от напряженности магнитного поля и от температуры.

К ним относятся: железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co), многие сплавы, редкоземельные элементы: самарий (Sm), гадолиний (Gd) и др. Антиферромагнетики - материалы, имеющие постоянные дипольные магнитные моменты, которые расположены антипараллельно друг другу. Относительная магнитная проницаемость их чуть больше единицы ($\mu \geq 1$), очень слабо зависит от напряженности магнитного поля и от температуры. К ним относятся: окиси кобальта (CoO), марганца (MnO), фтористый никель (NiF₂) и др.

Ферримагнетики - материалы, обладающие антипараллельными постоянными дипольными магнитными моментами, которые не полностью компенсируют друг друга. Чем меньше такая компенсация, тем выше их ферромагнитные свойства. Относительная магнитная проницаемость ферримагнетиков может быть близка к единице (при почти полной компенсации моментов), а может достигать до десятков тысяч (при малой компенсации).

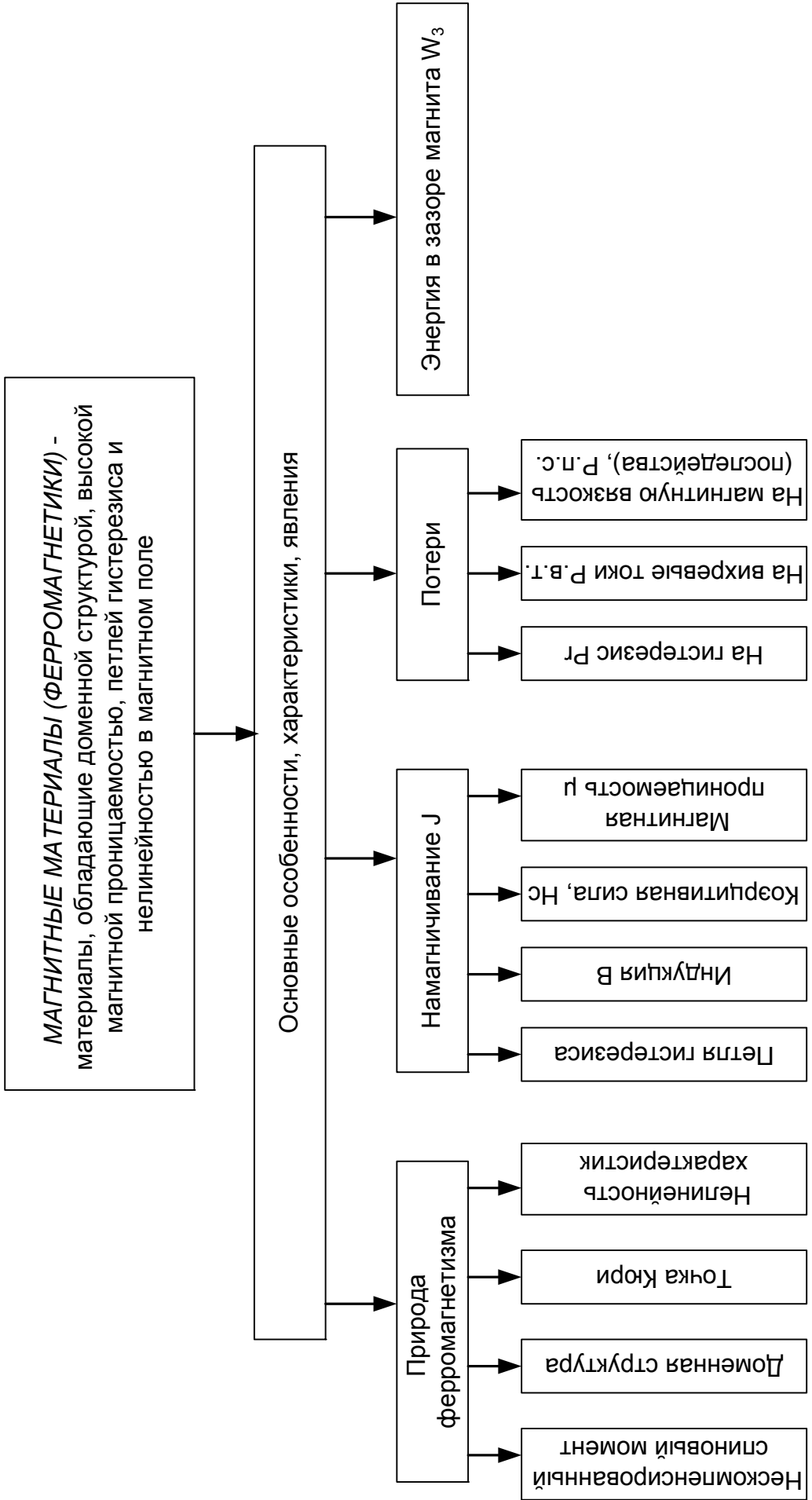
Диа-, пара- и антиферромагнетики можно объединить в группу слабомагнитных веществ, а ферро- и ферримагнетики - в группу сильномагнитных веществ.

Магнитные параметры, отражающие основные явления и свойства ферромагнитных материалов, приводятся в справочных таблицах.

В конце каждой темы раздела № 4 необходимо ответить на вопросы для самоконтроля. Лабораторные работы к разделу № 1 и № 2, задача контрольной работы № 4. В конце данного комплекса приведен тест № 4. Правильность своих ответов на тест можно проверить в приложении № 4.

Раздел учебного пособия [2], с. 69...80.

Ниже приводится структурная схема ферромагнитных материалов (структурная схема № 5).



Структурная схема № 5

4.1. Природа ферромагнетизма

Перечислим условия, которые необходимы, чтобы материал был ферромагнитным. Каждое из приведенных ниже условий необходимо, но недостаточно, а наличие всех условий и составляет природу существования и проявления ферромагнитных свойств.

1. Существование элементарных круговых токов в атомах.
2. Наличие нескомпенсированных спиновых моментов электронов.
3. Соотношение между диаметром электронной орбиты (D), имеющей нескомпенсированный спиновый момент, и постоянной кристаллической решетки вещества (a) должно быть:

$$2,8 \geq \frac{a}{D} \geq 1,6.$$

4. Наличие доменной структуры, т.е. таких кристаллических областей, в которых дипольные магнитные моменты оказываются параллельно ориентированы.
5. Температура материала (вещества) должна быть ниже точки Кюри, так как при более высокой температуре происходит исчезновение доменной структуры, материал переходит из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

Вопросы для самоконтроля

1. За счет чего в материалах существуют круговые токи?
2. Что собой представляет доменная структура материала?
3. Перечислите условия, необходимые для проявления в материале ферромагнетизма?

4.2. Основные характеристики ферромагнетиков

Степень намагничивания вещества характеризуют величиной намагниченности, или интенсивности намагничивания (J), которая определяется как предел отношения результирующего магнитного момента Σm , отнесенного к объему вещества (V), когда объем стремится к нулю:

$$J = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Sigma m}{V}$$

Если поместить вещество во внешнее магнитное поле с напряженностью H , то соотношение между J и H будет

$$J = 4\pi\chi H,$$

где χ (каппа) называется магнитной вязкостью.

Относительная магнитная проницаемость μ зависит от χ :

$$\mu = 1 + 4\pi\chi.$$

Интенсивность намагничивания можно определить, зная μ

$$\mu = 1 + \frac{J}{H}.$$

В общем, магнитное поле в ферромагнетике создается как сумма двух составляющих: внешней, создаваемой напряженностью внешнего магнитного поля H , и внутренней, создаваемой намагниченностью (J). Суммарное магнитное поле характеризуется магнитной индукцией B :

$$B = \mu_0 (H + J),$$

где μ_0 - магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума)

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Г/м.}$$

Выражая значение J через χ , а затем и μ , получим:

$$B = \mu_0 H (1 + 4\pi\chi), \text{ или } B = \mu_0 \mu H.$$

Абсолютная величина магнитной проницаемости

$$\mu_{\text{абс}} = \mu_0 \cdot \mu.$$

Процесс намагничивания характеризуется для каждого ферромагнетика своей основной кривой намагничивания $B=f(H)$.

Магнитная проницаемость μ в процессе намагничивания тоже изменяется. Это показано на рис. № 14.

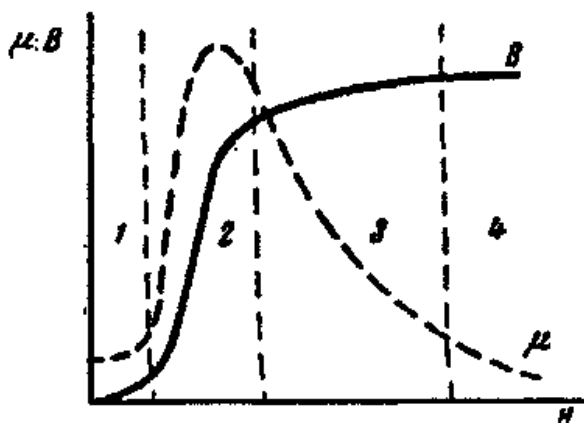


Рис. 14

Магнитная проницаемость μ при напряженности H , близкой к нулю, называется начальной (участок 1), а при переходе материала к насыщению она будет принимать максимальное значение (участок 2), с дальнейшим увеличением H магнитная проницаемость μ — уменьшается (участки 3 и 4).

При циклическом намагничивании ферромагнетика кривые намагничивания и размагничивания образуют петлю гистерезиса (рис. 15).

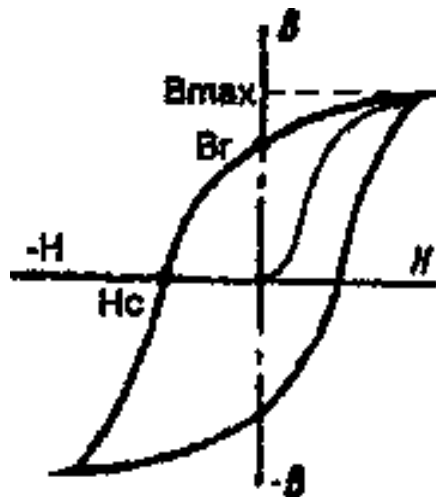


Рис. 15

Основными параметрами являются:

- 1) остаточная индукция, после снятия напряженности поля, - B_r ;
- 2) коэрцитивная сила H_c - напряженность, которую нужно приложить к образцу, чтобы снять остаточную индукцию;
- 3) максимальная индукция B_{max} , которая достигается при полном насыщении образца;
- 4) удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания, которые характеризуются площадью, охватываемой петлей гистерезиса.

Остальные магнитные параметры материала, а также потери на перемагничивание (гистерезис), на вихревые токи, энергию в зазоре (для постоянного магнита) можно рассчитать по формулам, которые были приведены выше и будут приведены в дальнейшем.

Вопросы для самоконтроля

1. Чему равен суммарный магнитный поток у намагниченного ферромагнетика?
2. Как можно определить интенсивность намагничивания ферромагнетика, зная его относительную магнитную проницаемость?
3. Какую информацию о параметрах магнитного материала можно получить, имея его предельную гистерезисную петлю?
4. Как ведет себя магнитная проницаемость материала при изменении внешнего магнитного поля?
5. Что собой представляет основная кривая намагничивания?

4.3. Потери в ферромагнитных материалах

Затраты энергии, которые идут на перемагничивание ферромагнетиков, на возникновение вихревых токов в переменном магнитном поле, на магнитную вязкость материала — создают так называемые потери, которые можно разделить на следующие виды:

а) потери на гистерезис P_g , пропорциональны площади петли гистерезиса. Их можно рассчитать по формуле Ч. Штейнмеца

$$P_z = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^n \cdot V, \text{ Вт},$$

где η - коэффициент гистерезиса для данного материала

f - частота поля, Гц;

B_{\max} - максимальная индукция, Тл;

V - объем образца, м³;

$n \approx 1,6...2$ - значение показателя степени.

б) потери на вихревые токи (ф-ла Ч. Штейнмеца)

$$P_{в.т.} = \xi \cdot f^2 \cdot B_{\max}^n \cdot V, \text{ Вт},$$

где ξ - коэффициент, зависящий от удельного электрического сопротивления материала и от формы образца.

в) потери на последствие $P_{н.с.}$, (потери на магнитную вязкость), которые не поддаются аналитическому расчету и определяются исходя из полных потерь P , P_z и $P_{в.т.}$ по формуле:

$$P_{н.с.} = P - P_z - P_{в.т.}$$

Потери на вихревые токи можно уменьшить, **увеличивая электрическое сопротивление ферромагнетика**. Для этого магнитопровод, например, для трансформаторов набирают из отдельных тонких, изолированных друг от друга пластин ферромагнетика. При этом увеличивается электрическое сопротивление сердечника трансформатора и уменьшаются токи, а следовательно потери, возникающие из-за них.

4.4. Энергия в зазоре ферромагнетика

На практике иногда применяют ферромагнетики с разомкнутой магнитной цепью, т.е. имеющие, например, воздушный зазор, обладающий большим магнитным сопротивлением. В теле, имеющем воздушный зазор, возникают свободные полюса, создающие размагничивающее поле, направленное навстречу внешнему намагничивающему полю. Происходит снижение индукции тем большее, чем шире воздушный зазор. Это проявляется в электромашинах, магнитных подъемных устройствах и др.

Энергия в зазоре (W_L), например, постоянного магнита, выражается формулой

$$W_L = \frac{B_L \cdot H_L}{2}, \text{ Дж/м}^3,$$

где B_L и H_L - собственно индукция и напряженность поля при данной длине воздушного зазора.

Изменяя подаваемую напряженность на ферромагнетик, можно получить в данном зазоре максимальную энергию.

Для нахождения W_{\max} пользуются диаграммой, на которой по кривой размагничивания для магнитного материала, расположенной во втором квадранте (уча-

сток петли гистерезиса), строят кривую энергии в зазоре, задаваясь различными значениями B (или H). Зависимость W_L от B_L и H_L показана на рис. 16.

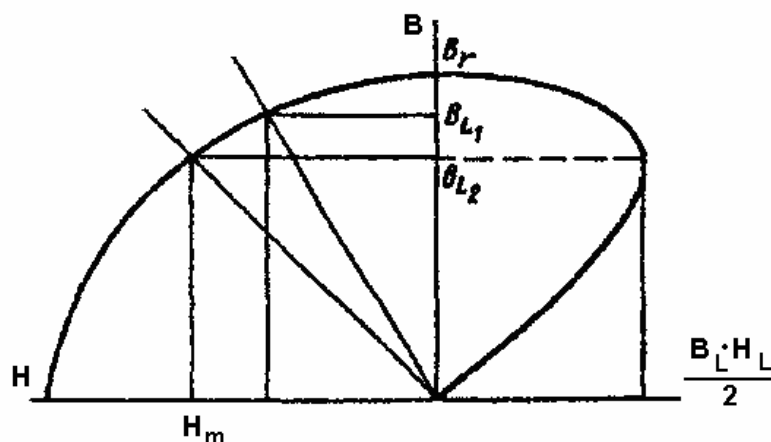


Рис. 16

Чтобы определить напряженность поля H , при которой будет максимальная энергия в зазоре магнита, нужно провести касательную к максимальной энергии (в точке A), а от нее провести горизонтальную линию до пересечения с петлей гистерезиса во втором квадранте. Затем опустить перпендикуляр до пересечения с координатой H . Точка H_{L2} будет определять искомую напряженность магнитного поля.

Вопросы для самоконтроля

1. На что тратится энергия в ферромагнитных материалах при их работе в переменном магнитном поле?
2. Какие виды потерь в ферромагнетиках Вы знаете?
3. Каким образом можно уменьшить потери на вихревые токи при данных условиях работы ферромагнетика?
4. Как определить напряженность магнитного поля по диаграмме $W=f(B \text{ и } H)$, чтобы получить максимальную энергию в зазоре магнита?

4.5. Классификация магнитных материалов

По основным магнитным параметрам ферромагнитные материалы можно классифицировать на следующие группы:

1. **Магнитно-мягкие** - материалы с малым значением коэрцитивной силы H_c (до 100 А/м), большой величиной магнитной проницаемости и малыми потерями на гистерезис. Они используются в качестве магнитопроводов постоянного тока (сердечники трансформаторов, измерительных приборов, катушек индуктивности и т.п.). Рис. 17 а, б и в включает в себя разновидности гистерезисных петель с разным характером кривых намагничивания для магнитно-

мягких ферромагнетиков; рис. 17, *г* - представляет петлю гистерезиса для магнитно-твердого материала.

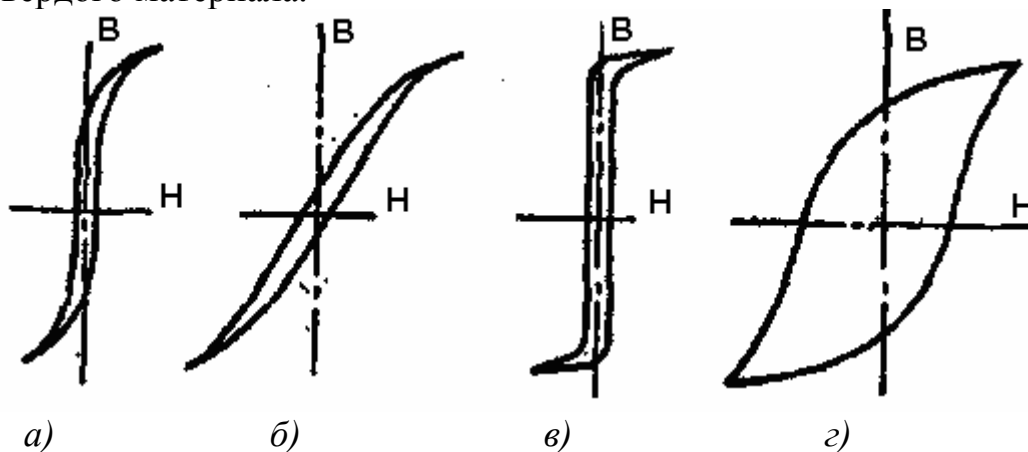


Рис. 17

К *магнитно-мягким материалам* относятся:

- технически чистое железо, карбонильное железо;
- электротехническая сталь;
- пермаллои;
- альсиферы;
- ферриты (медномарганцевые);
- термомагнитные сплавы (Ni-Cr-Fe) и др.

2. Магнитно-твердые - материалы, имеющие большую коэрцитивную силу ($H_c > 100$ А/м) (см. рис. 17.г).

Магнитно-твердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, в которых используется магнитная энергия в воздушном зазоре между полюсами магнита.

К *магнитно-твердым материалам* относятся:

- литые сплавы альни (Al-Ni-Fe);
- альнико (Al-Ni-Co-Fe);
- магнико;
- легированные стали, закаливаемые на мартенсит, и др.

3. Ферриты - материалы, представляющие собой двойные окислы железа с окислами двухвалентных металлов ($MeO \cdot Fe_2O_3$). Ферриты могут быть магнитно-мягкими и магнитно-твердыми, в зависимости от их кристаллического строения, например, типа шпинели - ($MgAl_2O_4$), гаусмагнита (Mn_3O_4), граната $Ga_3Al_2(SiO_4)_3$ и др. Электрическое удельное сопротивление их велико (от 10^{-1} до 10^{10} Ом·м), следовательно, потери на вихревые токи, особенно при высоких частотах, малы.

4. Магнитодиэлектрики - материалы, состоящие из ферромагнитного порошка с диэлектрической связкой. Порошок берется обычно на основе магнитно-мягкого материала - карбонильное железо, альсифер, а связующим диэлек-

триком служит материал с малыми диэлектрическими потерями - полистирол, бакелит и др.

3.3. Словарь терминов

Термин	Что обозначает
Анод	Электрод, на котором происходит процесс окисления
Атом	Наименьшая частица элемента в молекулах простых и сложных веществ
Атомная орбиталь	Область пространства, в которой вероятность обнаружения электрода высока (90-99%)
Валентность	Количественная характеристика способности атомов элемента соединяться с другими атомами
Валентные электроны	Электроны внешнего (последнего) энергетического уровня
Возбужденное состояние атома	Состояние, в которое переходит атом в результате приобретения дополнительной энергии
Ионизация атома	Процесс перевода нейтрального атома в заряженную частицу - ион
Катод	Электрод, на котором происходит процесс восстановления
Ионная химическая связь	Электростатическое притяжение между разноименно заряженными ионами (катионами и анионами)
Ковалентная химическая связь	Химическая связь, которая образуется за счет обобщения атомами своих валентных электронов
Металлическая связь	Химическая связь в металлах когда валентные электроны обобществляются
Проводники второго рода	Вещества, обладающие ионной или электролитической проводимостью (растворы и расплавы электролитов)
Проводники первого рода	Вещества, обладающие электронной проводимостью (металлы, полупроводники)
Спин	Собственный момент импульса электрона
Химическая связь	Совокупность сил, удерживающих атомы или ионы в пределах молекул или кристалла
Электролитическая диссоциация	Процесс распада вещества на ионы

3.4. Методические указания к выполнению лабораторных работ

3.4.1. Общие указания

Данные методические указания включают в себя описание и порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине.

Целью лабораторных работ является:

- 1) закрепление полученных теоретических знаний по изучаемому курсу;
- 2) ознакомление на практике с основными электрическими свойствами различных групп материалов: проводниковых, диэлектрических и магнитных;
- 3) овладение навыками экспериментального определения свойств электротехнических материалов.

При первом посещении лаборатории электротехнических материалов студент должен ознакомиться с инструкцией по технике безопасности, расписаться в соответствующем журнале и в дальнейшем неукоснительно соблюдать правила по технике безопасности.

При выполнении каждой лабораторной работы студент должен вести записи (протоколы испытаний), после выполнения работы показать их преподавателю, затем дома оформить в виде отчета. Отчеты должны быть составлены технически грамотно, аккуратно, с соблюдением соответствующих ГОСТ на обозначение величин и элементов схем; каждый отчет необходимо заканчивать самостоятельными выводами, подходя творчески к полученным экспериментальным данным и используя свои теоретические знания.

В процессе подготовки к лабораторным работам, а также при их выполнении и оформлении отчетов необходимо пользоваться указанными литературными источниками.

Общие метрологические требования

Студенты в отчетах по лабораторным работам должны привести перечень используемых измерительных приборов с указанием их метрологических характеристик.

Учитывая требования, предъявляемые к измерению параметров электротехнических материалов в данных учебных лабораторных работах, все измерения выполняются с погрешностью, соответствующей классу точности средств измерения, так как они являются доминирующими (ГОСТ 8.401-80). При этом класс точности характеризует лишь пределы, в которых может находиться погрешность средств измерения.

3.4.2. Описание лабораторных работ

РАБОТА 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЕЩЕСТВ, ИМЕЮЩИХ ДОМЕННУЮ СТРУКТУРУ, С ВНЕШНИМИ ПОЛЯМИ

Исследование поведения веществ во внешних полях позволяет проследить сложные процессы взаимодействия, происходящие в термодинамической системе (например, в кристалле), частиц, микро- и макрообластей с внешними полями: электрическим, магнитным, тепловым и др. Эти взаимодействия обуславливают поведение термодинамической системы, её характеристики, свойства. Особенно ярко и комплексно это проявляется в системах (кристаллах), обладающих доменной структурой, имеющей положительный обменный интеграл.

Доменная структура присуща в нормальных условиях сегнетоэлектрикам (неметаллам) и ферромагнетикам (в основном, металлам).

I. Цель работы

Выявление характерного взаимодействия веществ, имеющих доменную структуру, с электрическими (магнитными) и тепловыми полями.

II. Содержание работы

1. Изучение поведения заряда (индукции), возникающего на поверхности вещества, от величины приложенного электрического (магнитного) поля.
2. Определение потерь в веществе за один цикл изменения полярности приложенного поля.
3. Исследование поведения проницаемости (диэлектрической или магнитной) от напряженности внешнего поля.
4. Исследование влияния теплового поля на гистерезисный цикл и на проницаемость веществ, имеющих доменную структуру.

III. Основные теоретические положения

Материалы, обладающие доменной структурой, характеризуются целым рядом присущих им особенностей. Это нелинейность характеристик в электрическом или магнитном полях, анизотропность, электро- или магнитострикция, наличие гистерезиса, температура Кюри, большая величина диэлектрической или магнитной проницаемости.

Кристалл вещества, обладающего доменной структурой, состоит из большого количества областей, каждая из которых самопроизвольно поляризована (сегнетоэлектрик) или намагничена (ферромагнетик) до насыщения в одном из направлений. Эти области называются доменами, и размеры их – от тысячных

до десятых долей миллиметра. Ограничение их размеров вызвано энергией взаимодействия между соседними доменами.

В отсутствие внешнего поля суммарный момент всех доменов равен нулю. Между доменами имеются тонкие перегородки (приблизительно 100 нм), в которых ориентация спинов меняется от ориентации, свойственной одному домену, до ориентации, свойственной соседнему домену.

При помещении образца сегнетоэлектрика (или ферромагнетика) в электрическое (или магнитное) поле происходят последовательно следующие процессы:

- смещение границ между доменами и рост тех доменов, у которых угол между направлением внешнего поля и собственным моментом очень мал, это происходит до тех пор, пока все моменты доменов не сориентируются в одном из наиболее легких направлений поляризации (намагничивания);

- завершается вращение моментов доменов по направлению внешнего поля, когда направление моментов и направление внешнего поля совпадают; поляризуемость сегнетоэлектриков или намагниченность ферромагнетиков при этом достигает максимального значения;

- парапроцесс, заключающийся в том, что поле, увеличиваясь, вызывает медленный рост поляризуемости или намагничивания (вследствие теплового движения не все дипольные магнитные моменты доменов ориентированы параллельно, а увеличение поля вызывает переориентацию моментов в направлении поля).

При полном цикле перемены напряженности внешнего поля, приложенного к веществу с доменной структурой, описывается площадь петли гистерезиса. Она пропорциональна энергии, затрачиваемой на этот цикл.

При нагревании тел, обладающих доменной структурой, выше определённой температуры уменьшается их проницаемость и поляризуемость (или намагниченность). Для каждого вещества с доменной структурой существует такая температура, выше которой оно утрачивает свои особые свойства. Эта температура называется сегнетоэлектрической (или ферромагнитной) точкой Кюри.

Исследование веществ с доменной структурой удобно проводить с помощью осциллографа, на экране которого хорошо прослеживается петля гистерезиса, вершина которой описывает поведение поляризационного (или намагничивающего) процесса. При изменении температуры до точки Кюри и выше гистерезисная петля постепенно превращается в прямую линию. Это говорит о том, что в веществе при температуре выше точки Кюри происходит перекристаллизация, исчезновение доменной структуры и превращение особых свойств сегнетоэлектрика или ферромагнетика в свойства, присущие обычным диэлектрикам (или парамагнетикам).

IV. Порядок выполнения работы

На рис. 1 приводится схема для исследования с помощью осциллографа веществ, имеющих доменную структуру.

После того как будет собрана схема, надо поставить все регуляторы напряжения в положение минимума, а рукоятки горизонтального и вертикального усиления на осциллографе в среднее положение.

Включить осциллограф и установить на экране четкое изображение пятна в центре.

Включение в схему образцов и все переключения разрешается производить при выключенном питании установки, в противном случае в схеме могут возникнуть большие переходные процессы, способные вывести установку из строя!

1. *Градуировка осей осциллографа.* Включить тумблер на градуировочный конденсатор $CO1$ и подключить горизонтальный и вертикальный выводы осциллографа к соответствующим гнездам схемы (с учетом соответствия заземляющих гнезд!). Подать на схему питание и довести напряжение до 100 В. Ручкой горизонтального усиления осциллографа развернуть луч на 35 мм по обе стороны от центра ($\Sigma=70$ мм). (В дальнейшем эту ручку усиления не трогать!).

Ручкой вертикального усиления осциллографа развернуть луч на 4 мм (или 3,5 мм) при том же напряжении 100 В. В результате на экране осциллографа должна появиться наклонная линия, проходящая через центр.

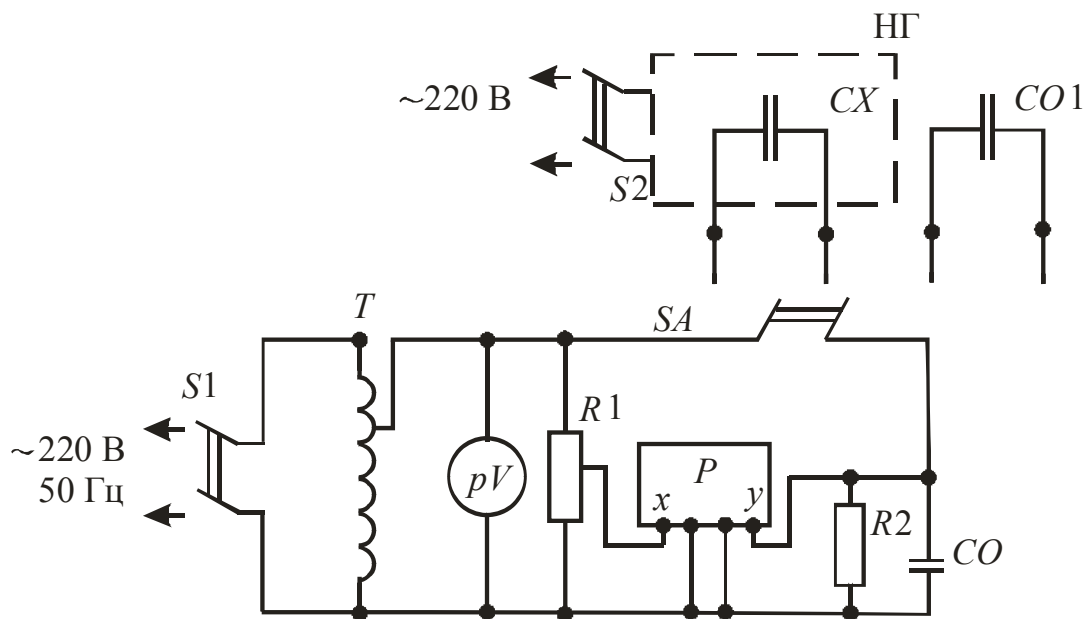


Рис. 1. Схема для исследования образцов сегнетоэлектриков с доменной структурой с помощью осциллографа: $S1$ – ключ, подающий питание к установке; T – автотрансформатор; $R1$ – реостат, выполняющий роль делителя напряжения; PV – вольтметр; SA – переключатель для подключения образцового градуировочного конденсатора $CO1$ (для градуировки вертикальной оси осциллографа) и для подключения испытуемого образца CX (имеющего доменную структуру); $CO1$ – градуировочный конденсатор ($2,2 \times 10^{-8}$ пФ); CO – образцовый конденсатор большой емкости (1 мкФ); HG – нагревающее устройство; $S2$ – ключ, включающий подогрев; P – осциллограф; $R2$ – постоянное сопротивление

После этого вывести напряжение на входе до нулевого значения и переключить тумблер на испытуемый образец CX . При подаче на него напряжения

должна появиться на экране гистерезисная петля, вписывающаяся в прямоугольник 70x60 мм. Если это не так, то следует развернуть петлю до данного размера, а потом снова вернуться к градуировке (на СО1) и уточнить величину развертки по вертикали, записав уже это значение в ответ.

2. *Снятие основной зависимости электрического заряда (индукции) от величины приложенного напряжения.* Подключив тумблером испытуемый образец СХ, поднимать на нем напряжение от нуля до максимального значения через 3-5 мм на сетке экрана осциллографа. Координаты вершин петли гистерезиса записать в таблицу по форме 1.

Ф о р м а 1

X , мм	U , В	Y , мм	Q , Кл	C , Ф	ε	E , В/м

Геометрическое место точек вершин гистерезисного цикла, получаемого при различном напряжении U , дает основную зависимость заряда на образце от приложенной напряженности поля E (или основную кривую намагничивания).

3. *Для определения потерь в веществе гистерезисную петлю образца при напряжении 100 В нарисовать на кальку.*

4. *Определение температуры Кюри.* Установить напряжение на образце 100 В. Рукоятками усиления развернуть петлю на 35 мм по обе стороны от центра экрана осциллографа по оси X и на 30 мм по Y .

Включить нагревательную установку и затем в процессе нагрева записывать в таблицу по форме 2 значения координат вершин гистерезисной петли через каждые 10-15 градусов. Температура, при которой будет максимальный заряд (индукция) на образце, а после этого заряд начнет убывать, соответствует точке Кюри. Когда петля превратится в прямую линию, в веществе произойдет перекристаллизация и полное исчезновение доменной структуры. Записать эту температуру. После определения точки Кюри снять напряжение с образца и выключить схему.

Ф о р м а 2

T , °С	X , мм	Y , мм	Q , Кл	C , Ф	ε

V. Производство вычислений (для сегнетоэлектрика)

1. Вычисление масштаба горизонтальной оси осциллографа производится по формуле

$$u_1 = \frac{U_{\max}}{x} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{x},$$

где U_{max} - амплитуда приложенного напряжения, В;
 U - показание вольтметра, В;
 x - отклонение по горизонтальной оси (35 мм), соответствующее амплитуде приложенного напряжения;
 u_1 – масштаб горизонтальной оси осциллографа, В/мм.

2. Масштаб вертикальной оси осциллографа можно найти по формуле

$$q_1 = \frac{Q_{max}}{y} = \frac{\sqrt{2}U_0 C_0}{y} 10^{-12},$$

где Q_{max} - заряд, соответствующий амплитудному значению напряжения на обкладках конденсатора C_0 , Кл;

U_0 - действующее напряжение на образцовом конденсаторе C_0 , В;

C_0 – ёмкость образцового конденсатора; $C_0 = 10^6$ пФ;

y – отклонение по вертикальной оси, $y = 3 \dots 5$ мм;

q_1 – масштаб вертикальной оси осциллографа, Кл/мм.

3. Напряжение U_0 вычисляют по формуле

$$U_0 = \frac{U}{\frac{C_0}{C_{01}} + 1},$$

где U – показание вольтметра;

C_{01} - емкость образцового градуированного конденсатора; $C_{01} = 2,2 \cdot 10^3$ пФ.

4. Определение диэлектрических потерь сегнетоэлектрика производится при комнатной температуре. Мощность, рассеиваемая сегнетоэлектриком, пропорциональна площади, ограниченной гистерезисной петлей:

$$P_a = K \cdot S,$$

где K – коэффициент пропорциональности, Вт/мм²;

S – площадь, ограниченная гистерезисной петлей, мм²

5. Коэффициент пропорциональности вычисляется по формуле

$$K = \frac{u_1 q_1}{2} f,$$

где u_1 - цена деления по горизонтальной оси, В/мм;

q_1 - цена деления по вертикальной оси, Кл/мм;

f - частота, Гц.

6. Активная мощность, рассеиваемая в диэлектрике, выражается уравнением

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{Q_{max} \cdot U_{max}}{2} \omega \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

где Q_{max} - амплитуда заряда на обкладках сегнетоэлектрика, Кл;

U_{max} - амплитуда приложенного напряжения, В;

ω – угловая скорость, c^{-1} ($\omega=2\pi f$);

$\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла потерь материала, который вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{2P_a}{Q_{\max} U_{\max} \cdot \omega}.$$

7. Построение основной кривой заряда конденсатора с сегнетоэлектриком от величины приложенного напряжения $Q_m = f(U_m)$. Для построения этой зависимости по значениям x , y и u_1 , q_1 определяют Q_m и U_m :

$$U_m = u_1 \cdot x,$$

$$Q_m = q_1 \cdot y.$$

8. Построение зависимости статической диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряжения электрического поля $\varepsilon = f(U)$. Для построения этой кривой вычисляются соответствующие приложенным напряжениям значения статической емкости по формуле

$$C = \frac{Q_m}{U_m},$$

а диэлектрическую проницаемость по формуле

$$\varepsilon = \frac{3,6\pi \cdot h \cdot C_{CT}}{S} 10^{10},$$

где h – толщина образца, м;

S – площадь электрода, m^2 .

Напряженность электрического поля в образце вычисляется по формуле

$$E_m = \frac{U_m}{h}.$$

VI. Содержание отчета

1. Принципиальная схема установки.
2. Краткое описание веществ, имеющих доменную структуру.
3. Таблица градуировки горизонтальной и вертикальной осей осциллографа.
4. Результаты наблюдений и вычислений в виде таблиц, записей, формул и кривых
 $Q_m = f(U_m)$; $\varepsilon = f(T)$; $\varepsilon = f(U_m)$.
5. Результаты определения точки Кюри и диэлектрических потерь, приведенные в виде отдельных записей и формул.
6. Краткие выводы.

РАБОТА 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРА-, ДИА-, ФЕРРИ- И ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

I. Цель работы

Ознакомить студентов с диамагнитными, парамагнитными, ферримагнитными и ферромагнитными свойствами групп материалов.

II. Содержание работы

1. Измерение индуктивности катушки, по которой протекает электрический ток.
2. Введение постепенно (через 1 см) в катушку сердечника из данного материала и измерение её индуктивности с данным образцом.
3. Расчет действующей магнитной проницаемости образцов материалов.
4. Построение зависимости действующей магнитной проницаемости образцов от длины образца, введенного в катушку.
5. Определение образцов материалов по их принадлежности к диа-, пара-, ферри- или к ферромагнитным материалам.

III. Основные теоретические положения

В электрических трансформаторах применяются сердечники из ферромагнитных материалов для концентрации магнитных силовых линий в их объеме.

В электрической аппаратуре довольно широкое применение находят катушки индуктивности с сердечниками из магнитных и немагнитных материалов. Для малогабаритных катушек индуктивности достаточно высокой добротности применяют сердечники из ферри- и ферромагнитных материалов. Кроме того, магнитные и немагнитные (диамагнитные) сердечники позволяют производить перестройку добротности катушек в небольших пределах, которая необходима при наладке аппаратуры.

Все вещества по отношению к магнитному полю, влиянию на него, разделяются на следующие группы:

диамагнетики – материалы, которые не имеют постоянных дипольных магнитных моментов и обладают относительной магнитной проницаемостью меньше единицы - $\mu < 1$. К ним относятся из металлов: медь, цинк, серебро, золото, сурьма и др.;

парамагнетики – материалы, имеющие постоянные дипольные магнитные моменты, но их расположение беспорядочно, а взаимодействие очень слабое. Их относительная магнитная проницаемость равна или чуть больше единицы - $\mu \geq 1$. К ним относятся такие металлы как: алюминий, платина, щелочные металлы, соли железа и др.;

ферромагнетики – материалы, имеющие постоянные дипольные магнитные моменты, расположенные в каждом домене параллельно друг другу и сильно взаимодействующие между собой. Их относительная магнитная проницаемость больше единицы - $\mu \gg 1$. К ним относятся: железо, никель, кобальт и различные сплавы;

ферримагнетики – материалы, обладающие антипараллельными постоянными магнитными дипольными моментами, но не полностью компенсирующими друг друга. Их относительная магнитная проницаемость больше единицы, но не так велика, как у ферромагнетиков. К ним относятся ферриты (или их называют оксиферрами). Они состоят из окислов двухвалентных металлов с Fe_2O_3 .

Индуктивность катушки определяется прибором Е7 – универсальным мостом. Когда индуктивность катушки и переменная величина индуктивности прибора совпадают (в процессе изменения емкостей C_2 и C_3), на панели прибора периодически ярко загорается зеленая лампочка и тут же гаснет. При этом надо записать показания C_2 и C_3 , умножить величину этой суммы на коэффициент K и записать в таблицу по форме 3 значение

$$L = K(C_2 + C_3),$$

где L - индуктивность, мкГн.

В начале определяется индуктивность катушки без сердечника L_0 , а затем путем постепенного (по 1 см) ввода сердечника в катушку, определяется индуктивность катушки с сердечником L_c

$$L_c = L_0 \cdot \mu_c,$$

где L_0 - индуктивность катушки;

L_c - индуктивность катушки с сердечником, мкГн;

μ_c - действующая магнитная проницаемость сердечника.

Нужно отметить, что действующая магнитная проницаемость μ_c зависит не только от относительной магнитной проницаемости материала сердечника, но и от его формы и от размеров самой катушки.

При введении в катушку индуктивности:

- а) ферромагнитного сердечника – индуктивность катушки должна увеличиться, так как его $\mu \gg 1$;
- б) сердечника из парамагнитного материала – индуктивность катушки почти не будет изменяться (с точностью до $\pm 5\%$), так как его $\mu \approx 1$;
- в) сердечника из ферримагнитного материала – индуктивность катушки может увеличиться в несколько раз, так как его $\mu > 1$;
- г) сердечника из диамагнитного материала – индуктивность катушки будет уменьшаться, так как его $\mu < 1$.

Введение в катушку индуктивности сердечника из диамагнитного материала уменьшает индуктивность за счет размагничивающего действия токов, наводимых в сердечнике магнитным полем катушки.

IV. Порядок выполнения работы

1. Определяется индуктивность катушки при частоте 1000 Гц - L_0 (без сердечника).
2. Определяется индуктивность L_c этой же катушки с различными сердечниками (феррит, сплав меди, сплав алюминия и др.). Сердечники вводятся в катушку постепенно, через каждый сантиметр ввода измеряется индуктивность и записывается её значение в таблицу по форме 3.
3. Вычисляется действующая магнитная проницаемость сердечника (по вышеприведенной формуле) и записывается в таблицу.
4. Строятся графики для всех образцов (на одном рисунке) $\mu=f(l)$, где l – длина сердечника, введенного в катушку.
5. Делаются выводы, в которых на основе сопоставления поведения действующей магнитной проницаемости (по таблице и по графикам) определяются диа-, пара-, ферро или ферромагнитные материалы.

Ф о р м а 3

Положение сердечника в катушке l , см	Материал обр. №1		Материал обр. №2		Материал обр. №3		Материал обр. №4	
	L_c , мкГн	M_c	L_c , мкГн	M_c	L_c , мкГн	M_c	L_c , мкГн	M_c

V. Содержание отчета

1. Краткое описание особенностей диамагнитных, парамагнитных, ферромагнитных и ферромагнитных материалов.
2. Таблица измерений и вычислений индуктивности и действующей магнитной проницаемости исследуемых образцов.
3. График зависимости $\mu=f(l)$ для исследуемых образцов.
4. Краткие выводы.

РАБОТА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

I. Цель работы

1. Ознакомить студентов с изоляционными материалами, применяемыми в электротехнических устройствах.
2. Ознакомить с одним из методов измерения и расчета диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

3. Научить проводить сравнительную оценку полярности исследуемых материалов.

4. Научить определять принадлежность изоляционных материалов к органическим и неорганическим материалам (по их внешнему виду и другим особенностям).

II. Содержание работы

1. Знакомство с большим количеством различных диэлектрических материалов; определение их принадлежности к той или иной классификационной группе.

2. Измерение размеров и расчет площади электродов.

3. Измерение ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь исследуемых образцов.

4. Расчет относительной диэлектрической проницаемости и определение величины заряда на поверхности образцов.

5. Сравнительная оценка полярности испытуемых образцов и определение их принадлежности к органическим или неорганическим материалам.

III. Основные теоретические положения

В электротехнических устройствах диэлектрики используются для изоляции токоведущих частей друг от друга, для накопления электрических зарядов и др. Диэлектрические материалы могут быть: газообразные, жидкие или твердые. Твердые диэлектрики могут быть: органические, неорганические, элементоорганические или смешанного состава; могут быть жесткие, эластичные, прозрачные, пленочные; природные, синтетические, пропитанные или непропитанные. Можно сказать, что диэлектрических материалов большое множество с разными механическими, тепловыми, химическими, физическими и электрическими свойствами.

Когда для тех или иных устройств аппаратуры, кабелей, электрических трансформаторов, генераторов, электродвигателей и других подобных устройств выбирается изоляционный (диэлектрический) материал, надо иметь представление о его особенностях, основных электрических и физических характеристиках.

В данной лабораторной работе студенты знакомятся с различными диэлектриками воочию и на ощупь, чтобы почувствовать их особенности и представить, где тот или иной материал может быть использован.

Диэлектрические материалы, помещенные в электрическое поле, поляризуются. Поляризация диэлектриков представляет собой процесс смещения связанных между собой противоположных электрических зарядов под воздействием внешнего электрического поля

$$P_d = \lim \frac{\sum m_i}{V} \Big| V \rightarrow 0,$$

где P_d – поляризуемость диэлектрика;

m_i – электрический момент связанных противоположных зарядов;

V – объем диэлектрика.

В результате смещения зарядов на противоположных плоскостях (электродах) диэлектрика появляются заряды противоположных знаков, т.е. поляризация приводит к накоплению электрических зарядов на поверхности диэлектрика. Чем выше его полярность, тем больше этот заряд.

Величина заряда Q зависит от ёмкости образца диэлектрика и от приложенного к нему напряжения:

$$Q = C \cdot U,$$

где Q – заряд на поверхности, Кл;

C – ёмкость образца;

U – приложенное к образцу напряжение.

В свою очередь ёмкость диэлектрика зависит от его диэлектрической проницаемости ε , его толщины d и площади электродов (площади меньшего электрода, если они не одинаковы), к которым приложено электрическое поле U .

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot S}{d},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала;

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, так называемая диэлектрическая постоянная вакуума, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

S – площадь меньшего электрода, м²;

d – толщина материала, м;

C – ёмкость диэлектрика, Ф.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна его относительной диэлектрической проницаемости, умноженной на постоянную вакуума:

$$\varepsilon_{abc} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0.$$

Для того чтобы знать степень поляризуемости диэлектрика, оценить его способность к накоплению заряда, его полярность, надо знать его диэлектрическую проницаемость. Ниже приводится формула, связывающая поляризуемость P_d диэлектрика, приложенную к нему напряженность электрического поля и его относительную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon = 1 + \frac{P_d}{E},$$

где P_d – поляризуемость диэлектрика;

E – напряженность приложенного электрического поля.

В данной лабораторной работе для измерения ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) испытуемых образцов используется универсальный

мост, на передней панели которого имеются ручки настройки, переключатели диапазонов, измерительный прибор и клеммы для подключения образцов.

Перед тем как приступить к измерениям параметров образцов диэлектриков, необходимо внимательно ознакомиться с прибором и учесть, что при настройке прибора с подключенным образцом стрелка амперметра должна показывать минимальное значение. Это будет означать, что подобранная емкость и $\text{tg}\delta$ по прибору будут равны ёмкости и $\text{tg}\delta$ испытуемого образца.

IV. Порядок выполнения работы

1. Определить наименование всех образцов материалов, выданных преподавателем, записать их в таблицу по форме 4.
2. Измерить длину, ширину электродов, нанесенных на образцы. Рассчитать площадь меньшего из электродов в кв. метрах и занести все результаты в таблицу по форме 4.
3. Измерить с помощью микрометра (или линейки) толщину образца, занести в таблицу в метрах.
4. С помощью универсального моста измерить емкость каждого образца в фарадах и занести в таблицу, записать для каждого образца значение $\text{tg}\delta$.
5. Вычислить относительную диэлектрическую проницаемость каждого образца, занести результаты в таблицу.
6. Вычислить величину поверхностного заряда, занести в таблицу.
7. На основании данных параметров образцов, имеющих в таблице, сделать выводы о сравнительной полярности испытуемых диэлектриков.
8. Определить какие из образцов являются органическими, неорганическими или имеют смешанный состав.

Ф о р м а 4

№ образца	Наименование материала	Толщина d , м	Длина a , м	Ширина b , м	Площадь S , м ²	Емкость образца C , Ф	$\text{tg}\delta$	Относительная диэл. проницаемость ϵ	Заряд Q , Кл
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

V. Содержание отчета

1. Все образцы материалов, их наименования, измерения и вычисления, представленные в таблице.
2. Анализ параметров образцов и сравнительная оценка их поляризуемости и полярности.

3. Определение отношения образцов к органическим материалам и к неорганическим.

РАБОТА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

I. Цель работы

Исследование электрической прочности газообразных (воздух), жидких и твердых диэлектриков.

II. Содержание работы

1. Изучение явлений пробоя газообразных диэлектриков в различных условиях:

а) влияние однородного и неоднородного электрического поля на прочность газов;

б) влияние величины зазора между электродами в однородном и неоднородном полях на электрическую прочность газов.

2. Исследование электрической прочности жидких диэлектриков.

Многократный пробой трансформаторного масла в условиях малых и больших промежутков времени между пробоями.

3. Исследование электрической прочности твердых диэлектриков:

а) влияние толщины диэлектрика на его электрическую прочность;

б) зависимость электрической прочности от количества слоев изоляции и их толщины: бумажно-масляной изоляции; лакоткани; полимерных пленок.

4. Построение графиков для газообразных и твердых диэлектриков. Их анализ. Написание выводов по полученным экспериментальным данным (с использованием теоретических знаний).

III. Основные теоретические положения

Электрическая прочность является одной из основных характеристик изоляционных материалов. Электрическая изоляция не может выдерживать очень большие напряжения; в диэлектрике возникают процессы, приводящие к возрастанию сквозного тока, а при некотором значении напряжения, превышающем критическое, в нем образуется проводящий канал. При этом плотность тока увеличивается до $\sim 10^8$ А/м², а сопротивление резко падает. Электрическая прочность характеризуется пробивной напряженностью

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h},$$

которая равна напряжению пробоя $U_{пр}$, отнесенному к толщине диэлектрика h в месте пробоя.

Пробивная напряженность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками. При нормальных условиях и однородном электрическом поле прочность равна $E_{пр} \approx 3$ кВ/мм, при расстояниях между электродами $h \approx 10$ мм. Если же электрическое поле неоднородно, а расстояния большие (как это имеет место в большинстве изоляционных конструкций), то электрическая прочность уменьшается. Например,

при $h=1 \dots 2$ метра - $E_{пр} \approx 0,5$, кВ/мм,

при $h=10 \dots 20$ метров - $E_{пр} \approx 0,15$, кВ/мм.

Воздух относится к самовосстанавливающимся изоляциям, то есть после пробоя и снятия напряжения его свойства восстанавливаются.

Твердые диэлектрики после пробоя (образования в них проводящего канала) свои свойства не восстанавливают. Поэтому их пробой стараются не допускать. Реальный твердый диэлектрик имеет в себе посторонние включения, трещинки, воздушные включения. В этих местах возникает усиление электрического поля и по ним идет частичный разряд. Он приводит к постепенному старению изоляции (ухудшению электрических характеристик: уменьшению ρ - электрического сопротивления, увеличению $\text{tg}\delta$ - диэлектрических потерь и т.п.) и через какое-то время это может привести к пробую.

В жидком диэлектрике, например в масле, вещество постоянно циркулирует и наблюдается большая устойчивость к частичным разрядам. Однако масло очень чувствительно к присутствию влаги и газовых пузырьков, которые в сильной степени снижают его электрическую прочность. После пробоя и снятия напряжения свойства жидких диэлектриков восстанавливаются, но не полностью. Электрическая прочность жидких диэлектриков, например трансформаторного, высушенного от влаги масла, в десять раз больше прочности воздуха $E_{пр} = 30-50$ кВ/мм², а электрическая прочность твердых однородных диэлектриков достигает величин порядка ~ 100 кВ/мм² и выше.

IV. Описание лабораторной установки

Исследование электрической прочности изоляционных материалов производится при помощи установки, схема которой приведена на рис. 2. Она состоит из установки АИИ-70 и специальной камеры для испытания образцов диэлектриков.

Установка АИИ-70 включает в себя пульт, внутри которого установлены: высоковольтный трансформатор, пускорегулирующая и сигнальная аппаратура. Заземляющая штанга служит для снятия емкостного заряда с испытуемого образца после пробоя.

Электродами, между которыми исследуются различные виды разрядов и прочность воздуха, являются сферы диаметром 25 мм, а также заостренные электроды, которые крепятся на текстолитовом основании в горизонтальном положении.

Жидкие изоляционные материалы (масла) испытываются на пробой в стандартном фарфоровом разряднике с двумя дисковыми электродами с закругленными краями, имеющими диаметр 25 мм и закрепленными на расстоянии 2,5 мм друг от друга.

Для испытания твердых диэлектриков служит приспособление, изготовленное из текстолита. Electroдами в нем являются два металлических цилиндра диаметром 25 мм, укрепленные в вертикальном положении. Образец исследуемого материала помещается в горизонтальном положении между двумя цилиндрическими электродами.

Перед началом проведения исследования электрической прочности изоляционных материалов необходимо ознакомиться с испытательной установкой и инструкцией по технике безопасности для работающих с высоким напряжением – свыше 1000 В. После этого расписаться в соответствующем специальном журнале.

Различные переключения в испытательной камере и включение высоковольтной установки проводятся только с разрешения преподавателя и в его присутствии. При нахождении кого бы то ни было в камере дверь её должна быть открыта!

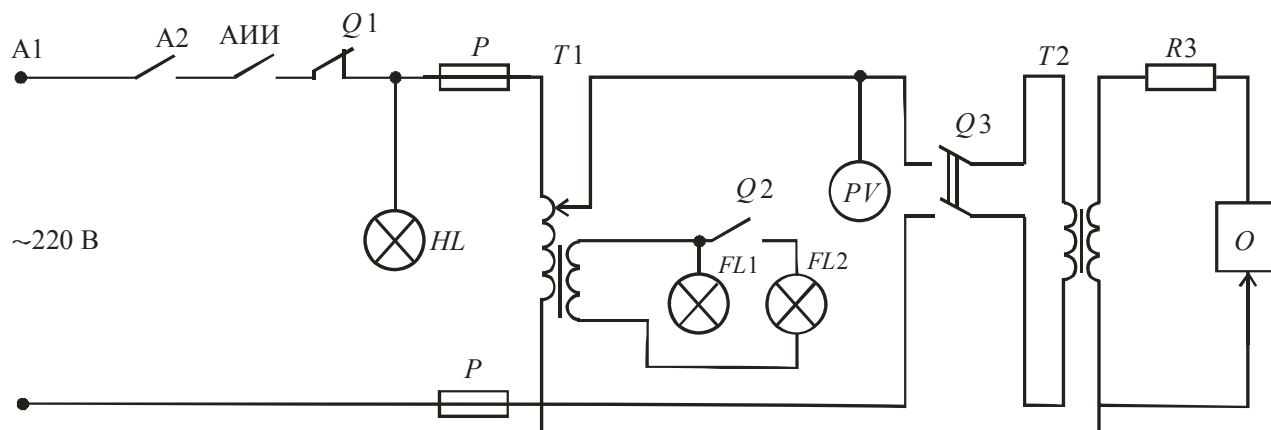


Рис. 2. Принципиальная схема испытательной установки: $A1$, $A2$, АИИ – автоматические выключатели; $Q1$ – выключатель дверной блокировки; $Q3$ – защитный выключатель (разъём); HL , $FL1$, $FL2$ – сигнальные лампы; P – предохранитель; PV – вольтметр; $T1$ – регулятор напряжения; $T2$ – высоковольтный трансформатор; $R3$ – защитный резистор; O – испытуемый объект

V. Порядок проведения испытаний

1. Изучение явлений пробоя воздуха в различных условиях

1) К шинам высоковольтного однофазного трансформатора установки подключить разрядник со сферами (шар-шар) и установить расстояние между ними, указанное преподавателем (3,5,7,10,15 мм). Затем выйти из помещения камеры, плотно закрыть за собой дверь для замыкания блокировочного контакта.

2) Рукоятку «защита» на пульте АИИ-70 установить в положение «чувствительная», вставить колодку в вилку «сеть» на пульте. Рукоятка регулятора напряжения установки должна быть в крайнем левом положении.

3) После этого надо включить автоматы, расположенные на стене слева от камеры: сначала А1, затем А2 и АИИ. При этом должна загореться зеленая лампочка на пульте и лампочка «Стоп! Высокое напряжение» на световом табло испытательной камеры. Теперь можно нажимать кнопку «Вкл.» на пульте и после этого на нем должна загореться красная лампочка.

4) Плавно вращая рукоятку регулятора напряжения по часовой стрелке, повысить напряжение до пробоя воздуха между сферами; при этом должен сработать автомат на пульте. Отсчет напряжения вести по верхней шкале киловольтметра, встроенного на пульте (это более чувствительная шкала – U эффективное). Записать показания и сразу же поставить рукоятку регулятора напряжения (путем вращения против часовой стрелки) в крайнее левое положение. При одном и том же промежутке между сферами произвести пробой 3 раза и записать значения в таблицу по форме 5.

5) После окончания испытания прочности данного промежутка между сферами выключить автоматы А2 и АИИ, открыть дверь камеры, взять заземляющую штангу и коснуться её металлическим концом высоковольтного электрода разрядника, чтобы снять остаточное напряжение. Затем повесить штангу на место. После этого поставить следующее расстояние между сферами (указанное преподавателем) и все повторить в той же последовательности, что и в предыдущих пунктах испытания. Данные испытаний занести в таблицу. Расстояние менять несколько раз (4-5), чтобы можно было по средним показателям вольтметра построить зависимость $E_{пр} = f(h)$, где h – расстояние между сферами.

6) После этого заменить одну из сфер заостренным электродом, т.е. создать неоднородное электрическое поле для воздуха, и при тех же промежутках между электродами снова провести испытания на электрическую прочность воздуха. Следует провести наблюдение явления, предшествующего пробоем, – легкого потрескивания, коронного свечения около острия, переходящего в проводящий светящийся канал. Такие явления характерны для неоднородного электрического поля.

В таблицу по форме 5 записываются средние арифметические значения пробивного напряжения для каждого промежутка в однородном и неоднородном полях.

Формулы для определения прочности диэлектриков

$$U_{\max} = \sqrt{2}U_{эфф}; E_{\max} = \frac{U_{\max}}{h},$$

где U_{\max} - показание вольтметра по нижней шкале, кВ;

$U_{эфф}$ - показание вольтметра по верхней шкале, кВ.

Для приведения напряжения пробоя, полученного при данных условиях ($U_{пр.сп}$), к нормальным условиям, его нужно разделить на относительную плотность воздуха δ :

$$U_{пр.н} = \frac{U_{пр.сп}}{\delta}.$$

Плотность воздуха определяется по формуле

$$\delta = \frac{0,386P}{273+t},$$

где P - давление воздуха, мм. рт. ст.; t – температура, °С.

Перед выполнением работы надо записать атмосферное давление и температуру.

Ф о р м а 5

h , мм	Переменное напряжение						Примечания
	Шар-шар Однородное поле			Шар-игла Неоднородное поле			
	$U_{np.эфф}$, кВ	$U_{np.мах}$, кВ	$E_{np.мах}$, кВ/мм	$U_{np.эфф}$, кВ	$U_{np.мах}$, кВ	$E_{np.мах}$, кВ/мм	
5							
10							
15							
20							

2. Исследование электрической прочности жидких изоляционных материалов

В качестве жидкого изоляционного материала испытывается трансформаторное масло (не очень хорошей очистки). Разрядник, наполненный маслом, подключить к испытательной установке с помощью специальных зажимов. Затем выйти из камеры, закрыть за собой дверь. Включить автоматы А2, АИИ и автомат на пульте установки АИИ-70. Плавно повышая напряжение на установке с помощью рукоятки, внимательно наблюдать за поведением масла в разрядке. Заметить начало кипения, образование газовых пузырьков и вспышку, означающую пробой масла. После пробоя сделать выдержку в течение ~5 минут и снова пробить масло. Третий пробой произвести без выдержки, и заметить величину напряжения. Четвертый, пятый, шестой пробой производить после пятиминутной выдержки. Данные занести в таблицу по форме 6. Вычислить среднее значение $U_{np.}$ без учета третьего пробоя и определить $E_{мах.пр.}$ с учетом расстояния между электродами в масле, равного 2,5 мм.

Формулы для определения

$$U_{np.мах.ср.} = \sqrt{2} \frac{(U_{np.1} + U_{np.2} + U_{np.3} + U_{np.4} + U_{np.5} + U_{np.6})}{6};$$

$$E_{np.max} = \frac{U_{np.cp.max}}{h}.$$

Ф о р м а 6

h , мм	$U_{np.1}$, кВ	$U_{np.2}$, кВ	$U_{np.3}$, кВ	$U_{np.4}$, кВ	$U_{np.5}$, кВ	$U_{np.6}$, кВ	$U_{np.cp.эф.}$, кВ	$U_{np.cp.max.}$, кВ	E_{max} , кВ/мм

Из полученных результатов сделать вывод. Объяснить причину многократного пробоя масла в целях определения его реальной электрической прочности.

3. Исследование электрической прочности твердой изоляции

Влияние толщины твердого диэлектрика на его электрическую прочность.
Образец тонкого полиэтилена поместить между вертикальными цилиндрическими электродами и определить его прочность, плавно повышая приложенное к нему напряжение. После этого определить электрическую прочность образца полиэтилена большей толщины. Сравнить эти показания и сделать вывод.

Взять несколько слоев тонкого полиэтилена и исследовать прочность одного, двух, трех слоев. Построить зависимость прочности этого диэлектрика от числа слоев. Сделать выводы.

Такие же исследования провести со слоями бумажно-масляной изоляции (конденсаторной бумаги).

Такие же исследования провести со слоями лакоткани или другими твердыми пропитанными и непропитанными диэлектриками, предложенными преподавателем.

Все данные испытаний занести в таблицу по форме 7, построить графики E_{max} в функции числа слоев и сделать выводы. Исследовать место и характер пробоя слоев, пропитанных и непропитанных твердых диэлектриков.

Ф о р м а 7

Название материала и колич. слоев, n	Метод испытания (плавное повышение напряжения или выдержка)	Толщина одного слоя d , м	Общая толщина слоев h , м	$U_{np.эфф.}$, кВ	$U_{np.max.}$, кВ	$E_{np.max.}$, МВ/м	Место и характеристика пробоя

Формулы для расчета

$$h = nd; U_{np.max} = U_{np.эфф} \sqrt{2}; E_{np.max} = \frac{U_{np.cp.max}}{h}.$$

VI. Содержание отчета

1. Цель и краткое содержание работы.
2. Электрическая схема испытательной установки.
3. Результаты определения прочности воздушной изоляции в однородном и неоднородном электрических полях при разных расстояниях между электродами.
4. Графики, построенные для воздушной изоляции в однородном и неоднородном полях.
5. Результаты испытаний жидкого диэлектрика.
6. Результаты испытаний твердых диэлектриков одно- и многослойных, пропитанных и непропитанных.
7. Графики, для различных твердых диэлектриков.
8. Краткие выводы.

4. Блок контроля освоения дисциплины

4.1. Задания на контрольную работу

4.1.1. Задание на контрольную работу и указания к ее выполнению

Решение каждой из задач должно сопровождаться: объяснением проводимых вычислений, записями основных расчетных формул в буквенном выражении, подстановкой цифровых данных своего варианта и написанием ответа в соответствующих единицах измерения величин.

Выполняться контрольная работа должна в отдельной тетради, на обложке которой должны быть указаны фамилия и инициалы студента, шифр, факультет, номер специальности и название дисциплины.

Выбор варианта каждой из задач производится по двум последним цифрам шифра студента в соответствии с указаниями в таблицах исходных данных.

В процессе изучения данной дисциплины студенты выполняют одну контрольную работу, состоящую из четырех задач. Выполнение контрольной работы должно служить закреплению учебного материала в процессе самостоятельного решения поставленных инженерных задач.

В разделе 4.2 даны методические указания к решению каждой задачи. К задаче 4 (аппроксимировать кривую намагничивания трансформатора) приведен пример аппроксимации конкретной кривой.

З А Д А Ч А 1

Опорный стержневой керамический изолятор ОНС изолирует и поддерживает шины контактных деталей в открытом распределительном устройстве. Изолятор представляет собой сплошной круглый стержень с выступающими

ребрами. На торцевых частях изолятора закреплены металлические фланцы (колпаки), являющиеся электродами (рис.1).

Определить полный ток утечки, протекающий в изоляторе, емкость и диэлектрические потери в нем, если известны: номинальное напряжение на нем U_n ; частота электрического поля f ; размеры и основные электрические параметры диэлектрика, из которого изготовлен изолятор - ρ_s , ρ_v , $\text{tg}\delta$ и др. Исходные данные приведены в табл.1.

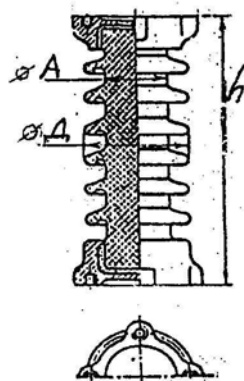


Рис. 1. Конструкция опорного изолятора ОНС наружной установки

Таблица 1

Параметры	Варианты и исходные данные									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Предпоследняя цифра шифра										
Материал изолятора	электрофарфор	ультрафарфор	стеатит	ультрафарфор	электрофарфор	стеатит	электрофарфор	стеатит	ультрафарфор	электрофарфор
Уд.объемное сопр. ρ_v , Ом·м	$7 \cdot 10^{10}$	10^{12}	10^{13}	10^{13}	$2 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{10}$	10^{14}	$5 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{11}$
Уд. поверхн. сопр. ρ_s , Ом	10^{12}	10^{13}	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{13}$	10^{13}	10^{14}	10^{14}	$3 \cdot 10^{12}$
Отн. диэл. прониц, ϵ	6	8,6	6,3	8	7	6,8	6	7	8,5	7
Тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$	0,025	0,001	0,001	0,0005	0,03	0,002	0,035	0,003	0,0008	0,032
Последняя цифра шифра										
Напряжение U , кВ	10	35	20	10	35	10	20	110	35	10
Высота изол. h , мм	170	420	315	1050	500	210	360	1060	420	240
Диаметр D , мм	160	180	170	220	225	170	180	220	200	180
Диаметр A , мм	140	160	150	200	200	150	160	200	180	160
Частота f , Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

ЗАДАЧА 2

Питание электрической установки осуществляется трехфазным током с помощью трех свинцовых высоковольтных кабелей.

Определить ёмкость одного свинцового высоковольтного кабеля, минимальную и максимальную напряженности электрического поля в изоляции кабеля и реактивную (зарядовую) мощность в нём, если известны: линейное напряжение U , частота поля f , сечение алюминиевой жилы кабеля S , толщина бумажной пропитанной изоляции d с диэлектрической проницаемостью ϵ , длина кабеля l . Числовые значения всех параметров указаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры	Варианты и исходные данные									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Предпоследняя цифра шифра										
Напряжение U , кВ	6	10	35	10	6	35	10	6	35	10
Сечение жилы кабеля S , мм ²	95	95	120	50	70	120	70	70	95	70
Толщина изоляции d , мм	5	8	12	10	6	10	9	8	12	9
Последняя цифра шифра										
Частота эл. поля f , Гц	50	50	50	60	60	60	50	60	50	60
Диэлектрическая проницаемость ϵ	3,5	3,8	3,6	4	4,5	4,1	4,4	4,2	4,3	3,7
Длина кабеля l , км	15	10	20	16	25	18	14	12	22	28

ЗАДАЧА 3

Электрическая установка, имеющая мощность P , питается от электрической сети напряжением U . Питающая линия выполнена проводами, имеющими предельно допустимую температуру нагрева $\theta_{пред.}$ и коэффициент теплопередачи σ .

Рассчитать допустимую по условиям нагрева плотность тока и допустимый ток, сравнить его с рабочим током и определить надежность и экономичность работы установки с данными проводами.

Числовые значения параметров установки, материалы проводов и их изоляции приведены в табл.3.

Таблица 3

Параметры	Варианты и исходные данные									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Предпоследняя цифра шифра										
Материал провода	М	М	А	А	М	А	А	М	М	А
Материал изоляции	ПЭ	ПХ	ПХ	ОПЭ	ОПЭ	ПЭ	ПХ	ПХ	ОПЭ	ПХ
Сечение провода S , мм ²	0,75	0,5	2,5	2	1	2,5	2	0,75	1	2,5

Предельно допустимая температура $\theta_{пред}$, °C	85	65	65	100	100	85	65	65	100	65
Последняя цифра шифра										
Мощность уст-ки P , Вт	1000	800	500	1200	1400	1000	800	500	1200	500
Напряжение сети U , В	220	380	380	220	220	380	380	220	380	220
Кэфф. теплоотдачи K^{10+5} Вт/мм ² град	3,2	3	3,1	3,2	3,08	3,1	3,2	3	3,08	3,1

Примечание: буква М – означает медный провод, А – алюминиевый, ПХ – поливинилхлорид, ПЭ – полиэтилен, ОПЭ – облучённый полиэтилен.

З А Д А Ч А 4

Выполнить аппроксимацию кривой намагничивания трансформатора в виде зависимости $H = a sh(\beta B)$. Кривые намагничивания электротехнических сталей приведены на рис. 2. Варианты кривых намагничивания, подлежащих аппроксимации, приведены в табл. 4.

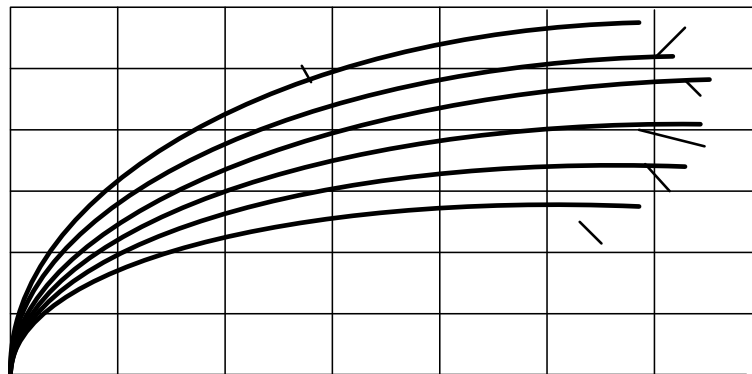


Рис. 2. Кривые намагничивания электротехнических сталей.

Таблица 4

Параметры	Варианты и исходные данные									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Последняя цифра шифра студента									
Кривая намагничивания (рис. 2)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

$B, Tл$

4.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

З А Д А Ч А 1

Опорные стержневые изоляторы, как правило, представляют собой сплошные керамические стержни с выступающими ребрами. На торцевых частях изоляторов закреплены металлические фланцы (электроды) с нарезными отверстиями для крепления на аппаратах и в распределительных устройствах.

В обозначениях типов опорных стержневых изоляторов буквы и цифры обозначают: *O* – опорный; *H* – наружной установки; *C* – стержневой; 1-я цифра – нормальное напряжение, кВ; 2-я цифра – минимальная разрушающая нагрузка на изгиб.

Например, ОНС-35-2000 (опорный стержневой изолятор наружной установки на напряжение 35 кВ, разрушающая нагрузка его 2000 Па). Опорный стержневой изолятор типа ОНС (см. рис. 1) имеет следующие основные размеры:

h – высота, мм;

A – диаметр керамического стержня, мм;

D – диаметр, учитывающий величину выступающих ребер, которые увеличивают длину пути утечки тока по поверхности изолятора, мм.

Последовательность решения задачи

1. Для определения полного тока утечки следует учитывать ток утечки через объем изолятора и ток утечки по его поверхности, а для этого надо определить полное электрическое сопротивление опорного изолятора по формуле

$$\frac{1}{R_n} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s},$$

где R_n – полное сопротивление изолятора, Ом;

R_v – объемное сопротивление, Ом;

R_s – поверхностное сопротивление, Ом.

Чтобы упростить решение задачи, длину пути прохождения тока по поверхности изолятора следует принять равной $1,75 \cdot h$, т.е. считать её в 1,75 раза больше длины прохождения тока по объему.

Длину электрода (фланца), соприкасающегося с поверхностью, рассчитать по диаметру A . Помнить, что объемное электрическое сопротивление зависит от удельного объемного сопротивления и размеров изолятора (ρ_v, S, h), а поверхностное сопротивление зависит от удельного поверхностного сопротивления, длины окружности стержня, соприкасающегося с электродом, и высоты стержня – изолятора (ρ_s, b, h).

2. При расчете емкости изолятора площадь электрода, находящегося под напряжением, следует определять по наименьшему диаметру стержня A , а расстояние между электродами будет равно высоте стержня h . Формулой пользоваться для расчета ёмкости обычного конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{h},$$

где C – ёмкость конденсатора, Ф.

3. Диэлектрические потери в опорном изоляторе складываются из потерь на поляризацию в материале стержня и из потерь, обусловленных сквозной проводимостью, то есть это активная мощность, рассеиваемая в изоляторе, которая вызывает его нагрев P_a :

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

4. Все величины в расчетные формулы надо подставлять в единицах СИ.

З А Д А Ч А 2

Электрическое поле кабеля подобно полю цилиндрического конденсатора, которое характеризуется осевой симметрией.

Последовательность решения следующая.

1. В соответствии с теоремой Гаусса, напряженность электрического поля по толщине изоляции выражается формулой

$$E_x = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 2\pi r_x l},$$

где q – заряд жилы кабеля, Кл;

r_x – переменная величина, определяющая гиперболический закон изменения напряженности электрического поля по толщине изоляции кабеля, м;

l – длина кабеля, м;

E_x – напряженность электрического поля, кВ/м.

2. Напряжение между жилой кабеля и свинцовой оболочкой выражается через определенный интеграл вектора напряженности поля по пути убывания (знак минус) потенциала вдоль направления силовых линий:

$$U = -\int_R^r E_x dx = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 2\pi l} \int_R^r \frac{dx}{rx},$$

откуда

$$U = \frac{q}{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 l} \ln \frac{R}{r}, \quad (1)$$

где $R=r+d$ – внутренний радиус свинцовой оболочки, мм;

r – радиус медной жилы, мм;

d – толщина изоляции, мм;

U – напряжение, кВ.

3. В соответствии с определением ёмкости кабеля, как отношения заряда к напряжению, имеем

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}},$$

где C – ёмкость кабеля, Ф.

4. Подставив в (1) $q = UC$, получим

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}},$$

где ($r \leq x \leq R$), или

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad \text{и} \quad E_{\min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r}}.$$

5. Реактивная мощность в кабеле (зарядная мощность) определяется из выражения

$$Q = \omega C U_{\phi}^2,$$

где $U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}$ – фазовое напряжение, В;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота поля, Гц.

З А Д А Ч А 3

Согласно ПУЭ проводники любого назначения должны удовлетворять требованиям в отношении предельно допустимого нагрева. Количество теплоты, выделяемое ежесекундно в проводе сопротивлением R в проходящем токе I , определяется выражением

$$\frac{W}{t} = I^2 R,$$

где W – количество теплоты, Вт; t – время, с.

Часть этого тепла идет на повышение температуры провода, а другая часть рассеивается в окружающей среде.

В установившемся тепловом режиме количество рассеиваемого ежесекундно тепла станет равным количеству тепла, выделяемого током. Уравнение теплового баланса имеет следующий вид

$$I^2 R = \sigma \cdot S_{\text{п}} \cdot \theta_{\text{уст}},$$

где σ – коэффициент теплоотдачи, Вт/мм² · град;

$S_{\text{п}}$ – поверхность охлаждения провода, мм²;

$\theta_{\text{уст}}$ – установившаяся разность температур провода и окружающей среды:

$\theta_{\text{уст}} = \theta_{\text{пред}} - \theta_{\text{окр}}$.

Плотность тока определяется из выражения

$$\delta = \frac{I}{S},$$

где δ – плотность тока, А/мм².

Сопротивление провода

$$R = \frac{l}{\gamma S},$$

где l – длина провода, м;

$S = \frac{\pi d^2}{4}$ – сечение провода (диаметр d), мм²;

γ – удельная проводимость токоведущей жилы провода (обратная величине удельного сопротивления), Ом⁻¹м⁻¹;

R – сопротивление провода, Ом.

Принимаем в первом приближении, что поверхность охлаждения равна боковой поверхности цилиндрического провода, т.е.

$S_{\text{п}} = \pi d l \cdot 10^3$, где l выражено в мм.

Уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$\delta^2 S^2 \frac{l}{\gamma S} = k S_{\text{п}} \theta_{\text{уст}} \quad \text{или} \quad \delta^2 \frac{\pi d^2 l}{4 \gamma} = k \pi d l \theta_{\text{уст}} \cdot 10^3.$$

Соответственно получим, что плотность тока определяется из выражения:

$$\delta = \sqrt{\frac{4k\theta_{\text{уст}}\gamma \cdot 10^3}{d}},$$

где δ – плотность тока, А/мм².

Допустимая плотность тока $I_{\text{доп}}$ получается, если в это выражение подставить значение $\gamma = \gamma_{\theta}$, т.е. удельную проводимость проводника при изменении температуры до $\theta_{\text{пред}}$.

При нагреве сопротивление проводника возрастает. Температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(\theta_2 - \theta_1)},$$

где R_1 – сопротивление проводника при температуре $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$, т.е. температуре, для которой приводятся в справочниках удельные сопротивления (проводимости) материалов;

R_2 – сопротивление проводника, соответствующее температуре,
 $\theta_{\text{пред}} = \theta_2$,

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)].$$

При нагреве провода до θ_2 его удельное сопротивление возрастает до значения

$$\rho_\theta = \rho_{20}[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)],$$

и, следовательно,

$$\gamma_\theta = \frac{1}{\rho_\theta},$$

Параметры ρ , γ и α задаются в справочниках для каждого материала проводника. Получив для предельной температуры $\delta = \delta_{\text{доп}}$, определяем длительно допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = \delta_{\text{доп}} \cdot S,$$

где S – площадь сечения провода, мм^2 .

Рабочий ток определяется по формуле:

$$I_{\text{раб}} = \frac{P}{U},$$

где $I_{\text{раб}}$ – рабочий ток, А.

После полученных результатов необходимо сделать вывод о работе установки.

З А Д А Ч А 4

Кривую намагничивания трансформатора или дросселя можно аппроксимировать зависимостью вида $H = \alpha sh(\beta B)$, где α измеряется в А/м, а β - в 1/Тл. Эти коэффициенты определяются из кривой намагничивания следующим образом:

1. На кривой $H=f(B)$ (рис. 2) выбирают две произвольные точки a и b . Их значения соответственно равны $H_1 B_1$ и $H_2 B_2$. Тогда можно записать два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= \alpha sh(\beta B_1), \\ H_2 &= \alpha sh(\beta B_2). \end{aligned} \right\}$$

2. Затем делят эти уравнения одно на другое и получают значение m :

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{sh(\beta B_2)}{sh(\beta B_1)} = m.$$

3. Задаваясь рядом значений β_i , находят отношения

$$\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)}; \text{ при } i=1, \dots, n.$$

4. Строят зависимость $\left(\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)} \right) = f(\beta_i)$.

5. Для значения m , полученного в п. 2, из данной кривой п. 4 находят искомое значение β_m .

6. Воспользовавшись любым из выражений п.1, определяют коэффициент α , например

$$\alpha = \frac{H_2}{sh(\beta_m B_2)}.$$

Пример. Пусть заданной является кривая 1 на рис.2.

1. Возьмем точки а и б : $H_1 = 200$ А/м; $B_1 = 0,925$ Тл; $H_2 = 1000$ А/м; $B_2 = 1,35$ Тл.

$$2. m = \frac{H_2}{H_1} = \frac{1000}{200} = 5.$$

3. Задаемся пятью значениями β_i ; пользуясь справочником, вычисляем гиперболические синусы соответствующих аргументов. Результаты расчета сведём в табл. 4.

4. Строим график $\left(\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)} \right) = f(\beta_i)$ (рис. 3), из которого находим искомый

коэффициент для значения m (табл. 5):

$$\beta_x = \beta_m, 1/\text{Тл}: \beta_x = \beta_m = 4 \text{ (для } m=5).$$

5. Определяем α , А/м:

$$\alpha = \frac{1000}{sh(4 \cdot 1,35)} = 8,2.$$

Таблица 5

β_i		5		4		3		2		1
$\beta_i \cdot B_2$		6,75		5,34		4,06		2,7		1,35
$\beta_i \cdot B_1$		4,62		3,7		2,78		1,85		0,92
$sh(\beta_i B_2)$	435		122		27		7,45		1,8	
$sh(\beta_i B_1)$	49,7		24		7,6		3,1		1,07	
$\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)}$	8,76		5,04		3,55		2,33		1,68	

Примечание: цифры в таблице даны ориентировочно

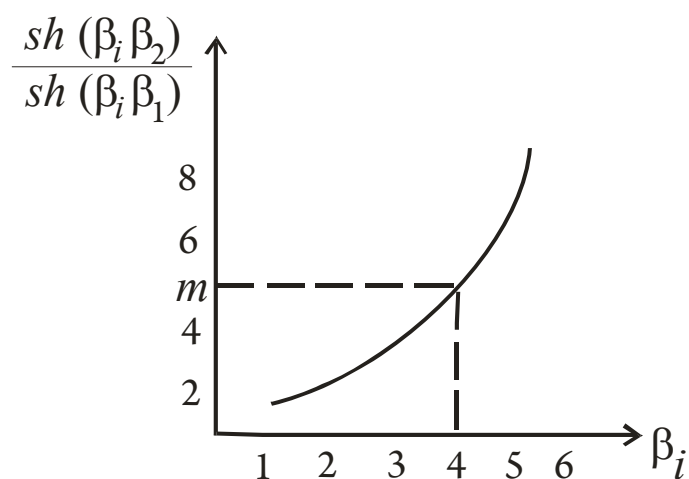


Рис. 3. График $\left(\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)} \right) = f(\beta_i)$.

Итак, получим $H=8,2 \text{ sh}(4 \cdot B)$

Примечание: гиперболический синус можно рассчитать по приведенной формуле.

4.3. Текущий контроль

После каждого раздела в опорном конспекте приведены вопросы для самоконтроля.

Кроме этого имеются тесты, ваши ответы на них могут быть проверены по таблицам, приведенным в приложениях.

Вопросы для самоконтроля и тесты даны для того, чтобы Вы могли себя проверить в усвоении материала дисциплины. Кроме того, они помогают приобрести навыки самообучения в дальнейшей жизни, так как научно-технический прогресс ставит перед специалистами все новые задачи в разных аспектах деятельности, которые приходится порой решать самостоятельно.

4.4. Тесты

Тест № 1 (Раздел 1)

1. Для изоляции токоведущих частей друг от друга используются ...
 - A. Проводники
 - B. Диэлектрики
 - C. Магнитные материалы
 - D. Полупроводники

2. Для каналирования заряженных частиц в электрическом поле используются...

- A. Ферромагнетики
- B. Полупроводники
- C. Диэлектрики
- D. Проводники

3. Для концентрации магнитных силовых линий в своем объеме используются...

- A. Диэлектрики
- B. Полупроводники
- C. Ферромагнетики
- D. Проводники

4. Среди перечисленных групп электроматериалов самую широкую запрещенную зону имеют...

- A. Проводники
- B. Ферромагнетики
- C. Полупроводники
- D. Диэлектрики

5. Поляризация диэлектрика в электрическом поле это ...

- A. Образование в нем проводящего капитала
- B. Перенос заряженных частиц
- C. Смещение связанных противоположных зарядов
- D. Препятствия на пути движения заряженных частиц

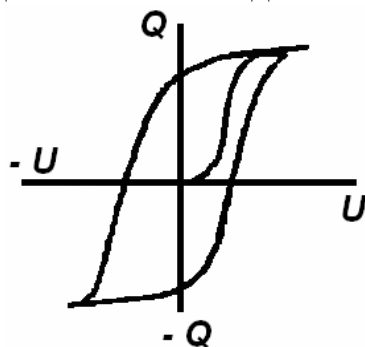
6. Поляризуемость диэлектриков определяется параметром ...

- A. Электрическим сопротивлением – ρ
- B. Диэлектрическими потерями – $\operatorname{tg}\nu$
- C. Электрической прочностью – $E_{\text{пр}}$
- D. Диэлектрической проницаемостью – ϵ

7. Для полярных диэлектриков относительная диэлектрическая проницаемость ϵ ...

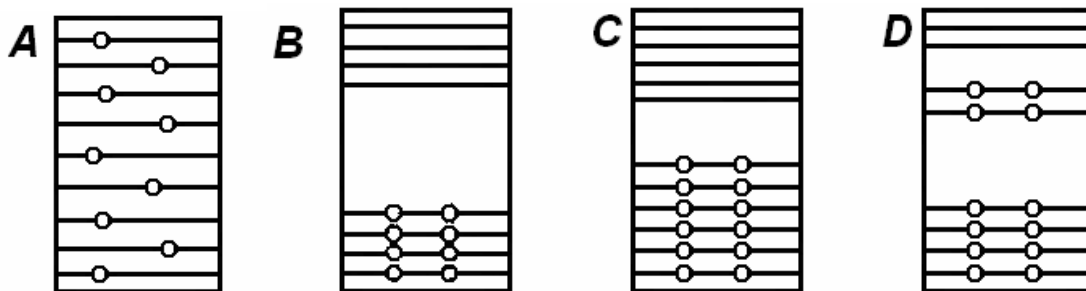
- A. $\epsilon < 3$
- B. $\epsilon \approx 1$
- C. $\epsilon > 3$
- D. $\epsilon < 1$

8. Для каких диэлектриков зависимость заряда Q на поверхности от приложенного напряжения U представляется в виде петли гистерезиса?



- A. неполярных диэлектриков
- B. сегнетоэлектриков
- C. полярных диэлектриков
- D. структурно-неоднородных диэлектриков

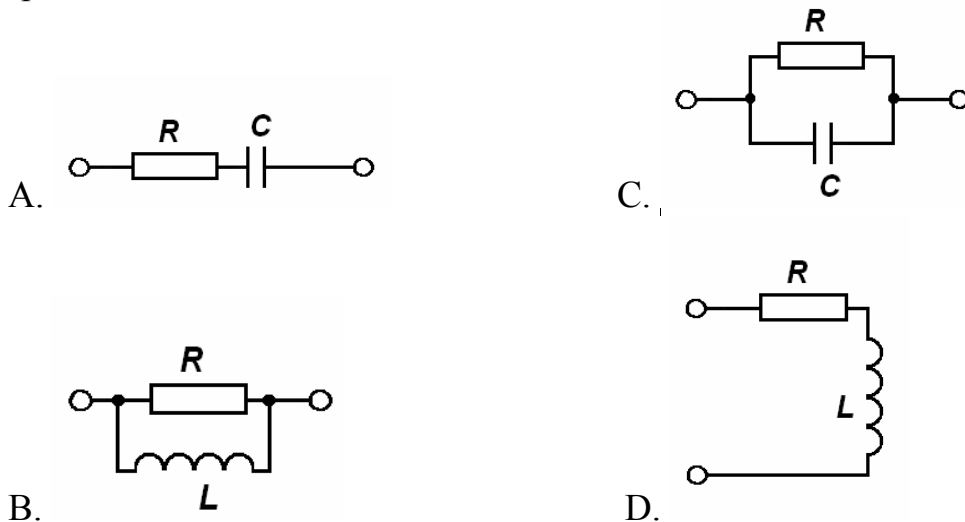
9. Укажите энергетическую диаграмму, принадлежащую диэлектрику.



10. Какой из параметров определяет электрическую прочность диэлектриков?

- A. ϵ
- B. ρ
- C. $E_{пр}$
- D. $\text{tg } \delta$

11. Какая из приведенных схем замещения характеризует реальный диэлектрик?



12. Какой из приведенных видов пробоя характерен для твердых диэлектриков с большими диэлектрическими потерями?

- A. Ионизационный
- B. Чисто электронный
- C. Электротепловой
- D. Электротехнический

13. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ определяет какой процесс?

- A. Электропроводность
- B. Электрическую прочность
- C. Диэлектрические потери
- D. Поляризацию

14. Удельное электрическое сопротивление хороших диэлектриков составляет примерно величину:

- A. $\sim 10^{-8}$ Ом·м
- B. $\sim 10^{16}$ Ом·м
- C. $\sim 10^3$ Ом·м
- D. $\sim 10^{-3}$ Ом·м

15. Для изготовления подвесных изоляторов высоковольтной линии электропередачи наиболее подходит материал:

- A. Полиэтилен
- B. Полихлорвинил
- C. Керамика
- D. Сегнетоэлектрик

16. Какой из приведенных материалов относится к органическим материалам?

- A. SiO_2
- B. Cu
- C. $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$
- D. Al_2O_3
- E. NaCl

17. Для газообразных диэлектриков характерен вид пробоя:

- A. Электротепловой
- B. Ионизационный
- C. Электрохимический
- D. Электронный

18. К неорганическим диэлектрикам относится:

- A. $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$
- B. $(\text{C}_8\text{H}_8)_n$
- C. Al_2O_3
- D. $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$

19. В каких электрических полях перестает соблюдаться закон Ома, а действует закон Пуля?

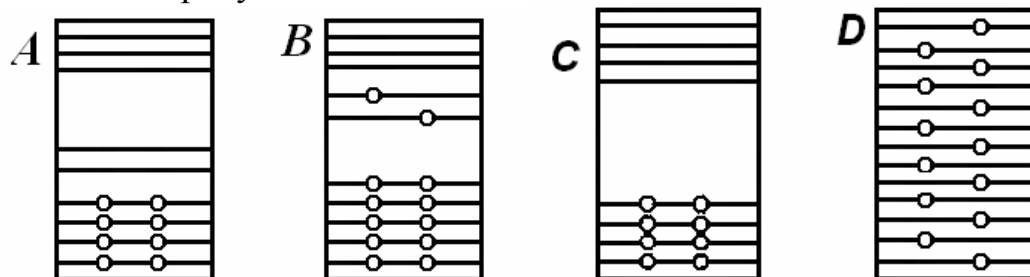
- A. Сильных полях
- B. Очень слабых полях
- C. Переменных полях
- D. Постоянных полях

20. При каких условиях в твердом диэлектрике не может произойти электрохимический пробой?

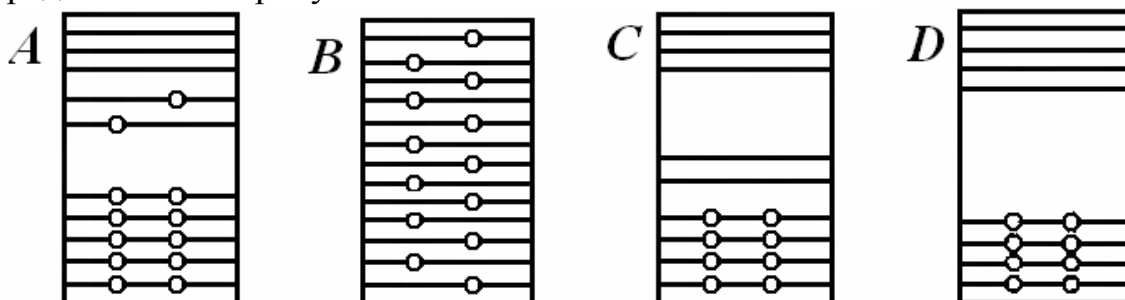
- A. В постоянном электрическом поле
- B. При повышенной влажности диэлектрика
- C. При повышенной температуре диэлектрика
- D. При переменном электрическом поле высокой частоты

Тест № 2 (Раздел 2)

1. Энергетическая диаграмма полупроводника с донорной примесью представлена на рисунке...



2. Энергетическая диаграмма полупроводника с акцепторной примесью представлена на рисунке...



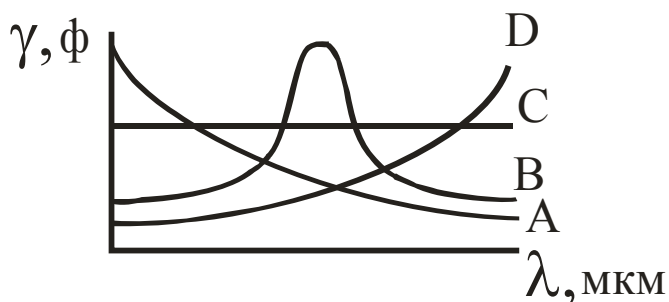
3. Формула удельной электропроводности для собственного полупроводника без примесей имеет вид...

- A. $\gamma = qni_n$
- B. $\gamma = qni_p$
- C. $\gamma = qni_n - qri_p$
- D. $\gamma = qni_n + qri_p$

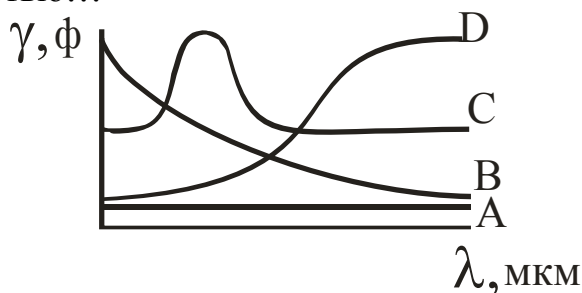
4. По какому закону изменяется электропроводность полупроводников с увеличением температуры?

- A. Линейному
- B. Квадратичному
- C. Экспоненциальному
- D. Нормальному

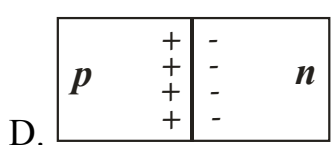
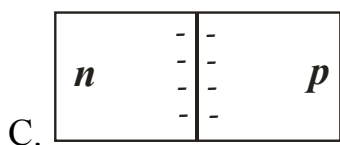
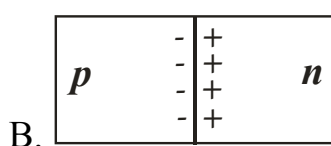
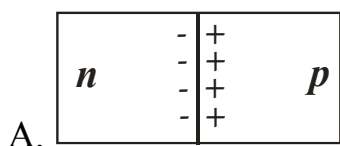
5. Спектральная характеристика полупроводника представлена зависимостью ...



6. Интегральная характеристика полупроводникового фотосопротивления представлена зависимостью...



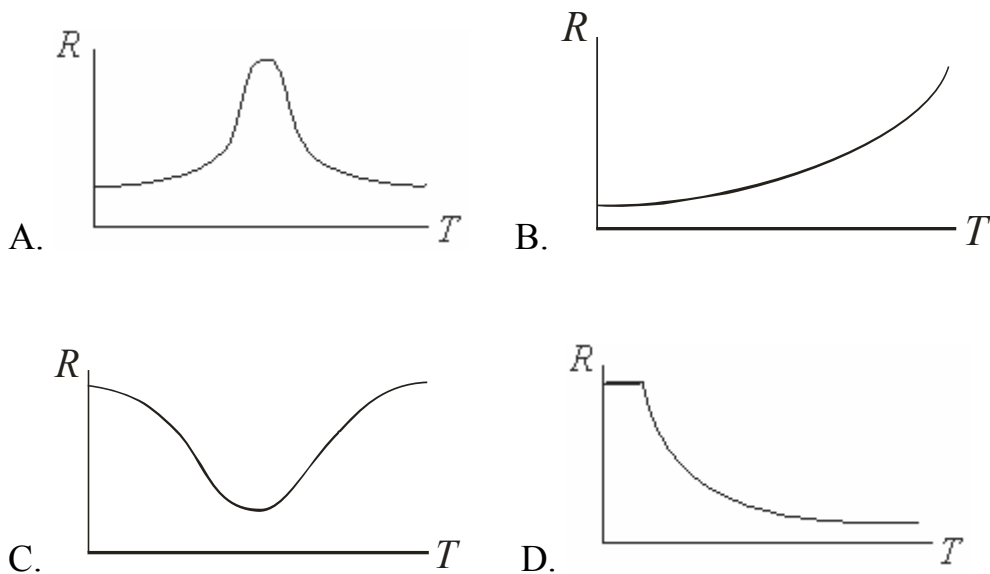
7. При соприкосновении двух полупроводников разного типа проводимости (n и p) на границе образуется $n - p$ переход. Как на контакте ($n - p$) распределены заряды?



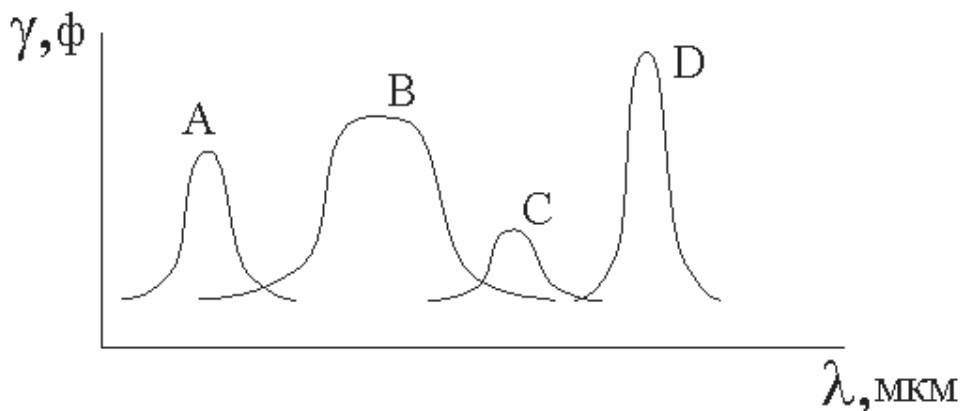
8. Температурный коэффициент сопротивления полупроводников – ТКР представлен выражением...

- A. $\text{TKR} \gg 0$
- B. $\text{TKR} > 0$
- C. $\text{TKR} = 0$
- D. $\text{TKR} < 0$

9. Как ведет себя сопротивление полупроводника – терморезистора с увеличением температуры?



10. Какая из приведенных спектральных характеристик принадлежит полупроводнику, имеющему самую широкую из них запрещенную зону?



Тест № 3 (Раздел 3)

1. Удельное электрическое сопротивление хороших проводников 1-го рода имеет порядок...

- A. 10^{16} Ом·м
- B. 10^2 Ом·м
- C. 10^{-8} Ом·м
- D. 10^{-2} Ом·м

2. Температурный коэффициент сопротивления чистых проводников 1-го рода представлен выражением...

- A. $\text{TKR} \leq 0$
- B. $\text{TKR} \gg 0$
- C. $\text{TKR} \geq 0$
- D. $\text{TKR} \ll 0$

3. Если ввести в чистый проводник 1-го рода металл с меньшим удельным сопротивлением, то удельное сопротивление сплава...

- A. Уменьшится
- B. Останется неизменным
- C. Увеличится
- D. Уменьшится по экспоненциальному закону

4. При искажении кристаллической решетки проводника первого рода его электропроводность...

- A. Уменьшится
- B. Увеличится
- C. Останется неизменной
- D. Увеличится по закону экспоненты

5. Какой из параметров (γ), входящих в формулу электропроводности, изменится при искажении правильной кристаллической решетки чистого металла?

$$\gamma = q \cdot u \cdot N$$

- A. q B. u C. N D. никакой

6. При каких, примерно, температурах в металлах может наблюдаться явление сверхпроводимости?

- A. $\sim 0,8 \dots 18 \text{ K}$
- B. При температуре плавления металла
- C. $\sim 100 \dots 200 \text{ K}$
- D. $\sim 273 \text{ K}$

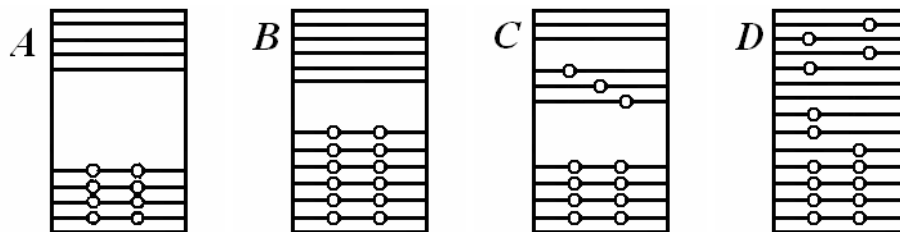
7. Какой из приведенных проводников 1-го рода обладает большим сопротивлением?

- A. Медь
- B. Серебро
- C. Нихром
- D. Золото
- E. Платина

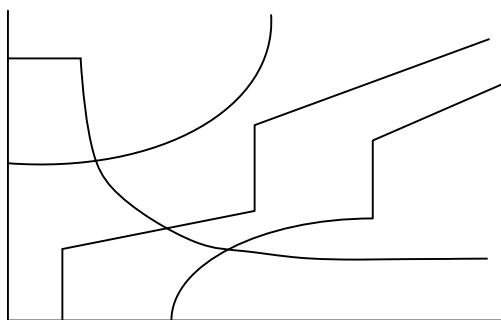
8. Какой из приведенных проводников 1-го рода обладает высокой проводимостью?

- A. Серебро
- B. Хромель
- C. Нихром
- D. Константан

9. Энергетическая диаграмма проводника 1-го рода представлена на рисунке...



10. Какая из зависимостей $R = f(T)$ принадлежит сверхпроводнику 1-го рода?



Тест № 4 (Раздел 4)

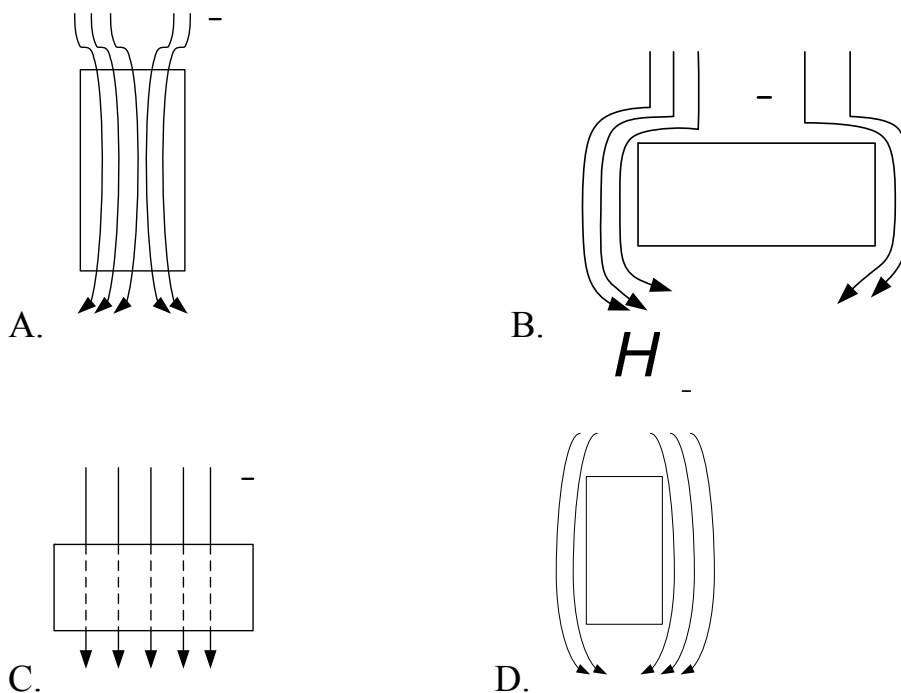
1. Ферромагнитные материалы имеют ... структуру.

- A. Аморфную
- B. Стеклообразную
- C. Жидкокристаллическую
- D. Доменную

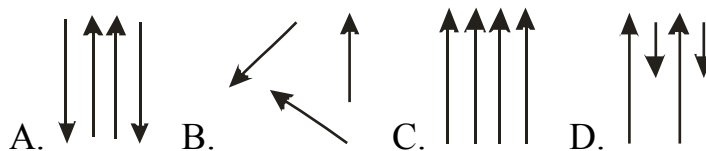
2. Величина относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков...

- A. $\mu \geq 1$
- B. $\mu \gg 1$
- C. $\mu \leq 1$
- D. $\mu \ll 1$

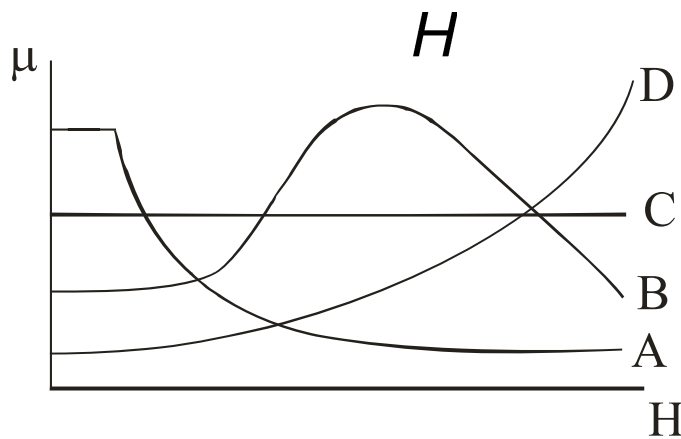
3. Поведение силовых линий магнитного поля при наличии на их пути ферромагнетика соответствует рисунку...



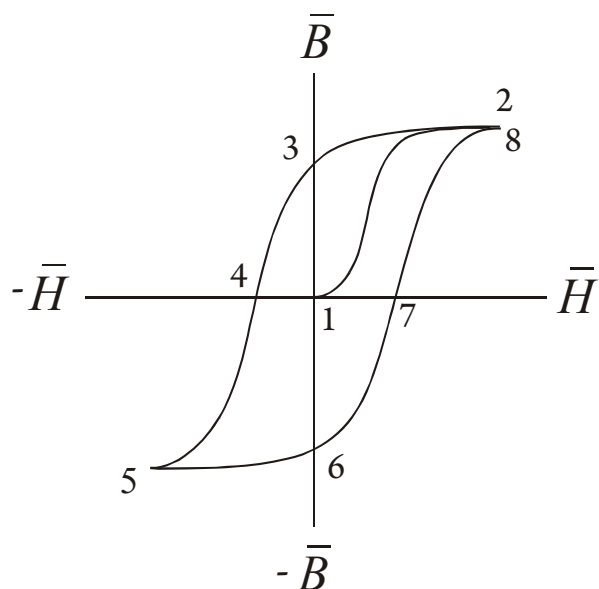
4. Направление магнитных дипольных моментов ферромагнитных материалов представлена на рисунке...



5. Зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнитных материалов от приложенной напряженности магнитного поля имеет вид...



6. Какой из участков петли гистерезиса характеризует коэрцитивную силу?



A. 1 - 4

B. 1 - 3

C. 1 - 2

D. 1 - 8

E. 4 - 5

7. Какой из участков петли гистерезиса характеризует остаточную индукцию?

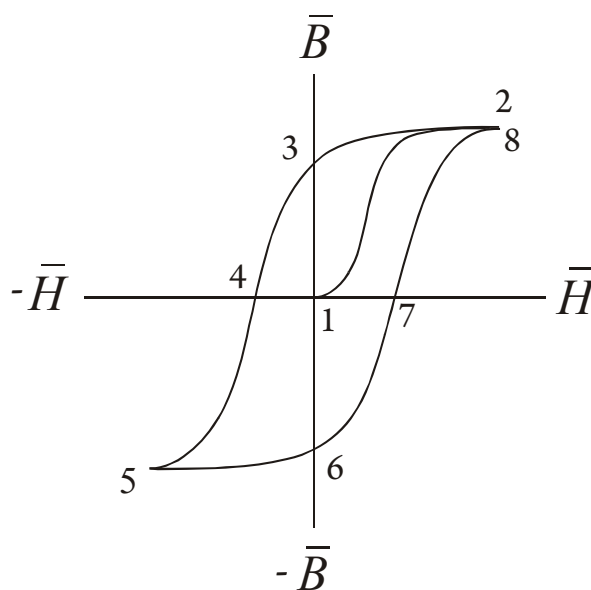
A. 1 - 4

B. 1 - 2

C. 1 - 3

D. 3 - 4

E. 3 - 2



8. Формула, определяющая относительную магнитную проницаемость ферромагнитного материала, соответствует позиции...

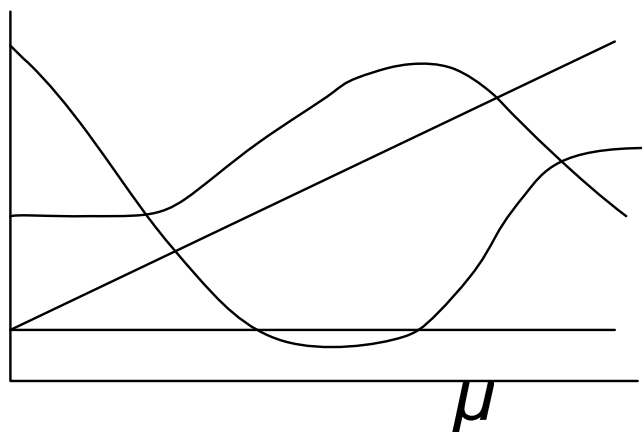
A. $\mu = \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} \cdot \mu_0$

B. $\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \mathbf{H}}$

C. $\mu = \frac{\mathbf{H}}{\mu_0 \mathbf{B}}$

D. $\mu = \frac{\mu_0 \mathbf{H}}{\mathbf{B}}$

9. Зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от температуры в широком диапазоне ее изменения соответствует кривой...



10. Из приведенных ниже материалов ферромагнетизмом обладает...
- A. Cu
 - B. Al
 - C. Si
 - D. Fe
 - E. Ag

4.5. Итоговый контроль

Итоговый контроль в виде зачета проводится преподавателем при наличии зачетной контрольной работы (или реферата) и проработки правильных ответов на вопросы для самоконтроля и на тестовые задания.

Приложения

Приложение 1

Тест №1

Номер вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Правильный ответ	B	D	C	D	C	D	C	B	B	C
Номер вопроса	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Правильный ответ	C	D	D	B	C	C	B	C	A	D

Приложение 2

Тест №2

Номер во-проса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Правильный ответ	В	С	Д	С	В	Д	В	Д	Д	А

Приложение 3

Тест №3

Номер во-проса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Правильный ответ	С	С	С	А	В	А	С	А	Д	А

Приложение 4

Тест №4

Номер во-проса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Правильный ответ	Д	В	А	С	В	А	С	В	С	Д

Приложение 5

Основные единицы СИ

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения	
		Наименование	Русское обозначение
Масса	m	килограмм	кг
Длина	l	метр	м
Время	t	секунда	с
Сила тока	I	ампер	А
Температура	T	кельвин	К
Количество вещества	n	моль	моль
Сила света	I_v	кандела	Кл

Некоторые производные единиц СИ

Физическая величина	Единица измерения		Связь с основными единицами СИ
	наименование	русское обозначение	
Давление	паскаль	Па	$\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$
Сила	ньютон	Н	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$
Частота	герц	Гц	$\frac{1}{\text{с}}$
Электрическая емкость	фарада	Ф	$\frac{\text{А}^2 \cdot \text{с}^4}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}$
Электрический заряд	кулон	Кл	А·с
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3 \cdot \text{А}^2}$
Электродвижущая сила	вольт	В	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3 \cdot \text{А}}$
Энергия	джоуль	Дж	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$

Названия некоторых букв греческого алфавита

α	альфа	η	эта	μ	ми (мю)	ε	ипсилон
β	бета	θ	тэта	ξ	кси	φ	фи
γ	гамма	ϊ	йота	π	пи	χ	хи
δ	дельта	ϰ	каппа	ρ	ро	ψ	пси
ε	эпсилон	λ	лямбда (лямбда)	σ	сигма	ω	омега
ζ	дзета	ν	ни (ню)	τ	тау		

СОДЕРЖАНИЕ

1. Информация о дисциплине	3
1.1. Предисловие.....	3
1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы	4
2. Рабочие учебные материалы	5
2.1. Рабочая программа.....	5
2.2. Тематический план дисциплины	7
2.3. Структурно-логическая схема дисциплины	8
2.4. Временной график изучения дисциплины.....	10
2.5. Практический блок	10
2.6. Рейтинговая система оценки знаний.....	10
3. Информационные ресурсы дисциплины.....	11
3.1. Библиографический список.....	11
3.2. Опорный конспект по дисциплине.....	12
Раздел 1. Диэлектрики	12
Раздел 2. Полупроводники	24
Раздел 3. Проводники	35
Раздел 4. Магнитные материалы	42
3.3. Словарь терминов.....	51
3.4. Методические указания к выполнению лабораторных работ.....	52
Работа 1.....	53
Работа 2.....	59
Работа 3.....	61
Работа 4.....	65
4. Блок контроля освоения дисциплины.....	71
4.1. Задания на контрольную работу	71
4.2. Методические указания к выполнению контрольной работы	75
4.3. Текущий контроль.....	81
4.4. Тесты.....	81
Тест 1 (Раздел 1)	81
Тест 2 (Раздел 2)	85
Тест 3 (Раздел 3)	87
Тест 4 (Раздел 4)	89
4.5. Итоговый контроль	92
Приложения	92

Таира Евгеньевна Харламова

Материаловедение
Технология конструкционных материалов
В 2 частях
Часть II
Электроматериаловедение

Учебно-методический комплекс

Редактор Т.В. Шабанова

Сводный темплан 2009 г.

Лицензия ЛР №020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение №78.01.07.953.П.005641.11.03
от 21.11.2003

Подписано в печать	09 г.	Формат 60x84 1/16
Б. кн.-журн.	П.л. 6,00	Б.л. 3,00
Тираж		Издательство СЗТУ
		Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет
Издательство СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации
университетов России

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5