СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Санкт-Петербург
2009

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии и дизайна радиоэлектронной техники

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Институт радиоэлектроники

Специальность
210302.65 - радиотехника

Направление подготовки бакалавра
210300.62 - радиотехника

Санкт-Петербург

Издате. тво СЗТУ
09
Утверждено редакционно-издательским советом университета
УДК 621.3.002.396.6

Радиоматериалы и радиокомпоненты: учебно-методический комплекс / сост. С. Д. Ханин, О. В. Денисова, А. И. Адер - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. – 165 с.

Учебно-методический комплекс разработан в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования.

В дисциплине рассматриваются основные типы радиоматериалов и радиокомпонентов. Излагается физика процессов, определяющих диэлектрические, полупроводниковые, проводниковые и магнитные свойства радиоматериалов, а также взаимосвязь этих свойств с эксплуатационными характеристиками дискретных радиокомпонентов (электрических конденсаторов, резисторов, полупроводниковых диодов и др.) и их интегральных аналогов. Рассматриваются тенденции развития электронного материаловедения и элементной базы электронной техники.

Рассмотрено на заседании кафедры технологии и дизайна радиоэлектронной техники 22.12.2008 г.; одобрено научно-методической комиссией института радиоэлектроники 26.02.2009 г.

Рецензенты: кафедра технологии и дизайна радиоэлектронной техники СЗТУ (зав. кафедрой В. Н. Воронцов, д-р техн. наук, проф.); С. Д. Дубровенский, канд. хим. наук, доц. кафедры химической нанотехнологии и материалов электронной техники СПбГТИ (ТУ).

Составители: С. Д. Ханин, д-р физ.-мат. наук, проф.;
О. В. Денисова, канд. хим. наук, доц.;
А. И. Адер, канд. техн. наук, доц.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2009

© Ханин С. Д., Денисова О. В., Адер А. И., 2009

1. Информация о дисциплине

1.1. Предисловие

Дисциплина «Радиоматериалы и радиокомпоненты» (ОПД.Ф.02) изучается студентами специальности 210302.65 и направления подготовки бакалавра 210300.62 в одном семестре. Дисциплина включает в себя разделы: «Радиоматериалы» (классификация радиоматериалов; полупроводниковые материалы; проводниковые материалы; диэлектрические материалы; радиоматериалы с магнитными свойствами; основные конструкционные материалы РЭС) и «Радиокомпоненты» (линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты; электрические конденсаторы; резисторы; катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки).

Целью изучения дисциплины является подготовка студентов к решению задач, связанных с поиском наиболее рациональных конструкторско-технологических решений при разработке и усовершенствовании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Задачи изучения дисциплины. Усвоение основных закономерностей, связывающих электрофизические свойства радиоматериалов с параметрами радиокомпонентов, создаваемых на их основе. В результате изучения дисциплины студент должен овладеть основами знаний по дисциплине, формируемыми на нескольких уровнях:

Иметь представление:

- о существующих типах радиоматериалов и радиокомпонентов;
- о физических процессах, определяющих функциональные свойства радиоматериалов;
- о влиянии свойств радиоматериалов на эксплуатационные характеристики радиокомпонентов, изготовленных на их основе;

Знать:

- основные качественные и количественные характеристики радиоматериалов различных классов, обеспечивающие возможность их практического применения;
- основные типы радиокомпонентов, их назначение, конструкции, основы технологии изготовления, эксплуатационные характеристики;

У*меть* применять полученные знания о свойствах радиоматериалов в практической деятельности – при конструировании изделий электронной техники;

Владеть:

- современными представлениями о физических процессах, определяющих основные свойства радиоматериалов;
- навыками экспериментального изучения свойств радиоматериалов и эксплуатационных параметров радиокомпонентов.

Место дисциплины в учебном процессе:

Теоретической и практической основами дисциплины являются курсы «Математика», «Физика», «Химия». Приобретенные студентами знания будут непосредственно использованы при изучении дисциплин «Электроника, ч. 2», «Интегральные устройства радиоэлектроники», «Основы конструирования и технологии производства РЭС», а также в курсовом и дипломном проектировании.

1.2.1. Содержание дисциплины по ГОС

Электрофизические свойства, характеристики и области применения в радиоэлектронных средствах (РЭС) проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических материалов; электрофизические свойства основных конструкционных материалов РЭС, пассивные радиокомпоненты: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки; типономиналы, модели и эксплуатационные характеристики

радиокомпонентов; принципы обозначения (маркировки) отечественных и зарубежных пассивных радиокомпонентов.

1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов		
	форма обучения		
	очная	очно-заочная	заочная
Общая трудоемкость дисциплины (ОТД)	**100**		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	**60**	**60**	**60**
В том числе аудиторные занятия:			
лекции	**16**	**8**	**4**
практические занятия (ПЗ)	**0**	**0**	**0**
лабораторные работы (ЛР)	**16**	**8**	**6**
Самостоятельная работа студента (СР)	**40**	**40**	**40**
Промежуточный контроль, количество	**11**	**12**	**12**
В том числе:			
курсовой проект (работа)	**-**	**-**	**-**
контрольная работа	**-**	**1**	**1**
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	**Зачет**		

1.2.3. Перечень видов практических занятий и контроля:

- одна контрольная работа (для очно-заочной и заочной форм обучения);
- лабораторные работы;
- тесты (по каждой из тем дисциплины);
- зачет.

2. Рабочие учебные материалы

2.1. Рабочая программа (100 часов)

Введение (2 часа)

Электрофизические свойства, характеристики и области применения в радиоэлектронных средствах (РЭС) проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических материалов. Основные типы радиоматериалов: классификация по электрическим и магнитным свойствам. Пассивные и активные радиокомпоненты. Связь материаловедения радиоматериалов с фундаментальными дисциплинами. Взаимосвязь функциональных свойств радиоматериалов и эксплуатационных характеристик радиокомпонентов на их основе. Создание радиоматериалов и радиокомпонентов с заданными свойствами. Типономиналы, модели и эксплуатационные характеристики радиокомпонентов; принципы обозначения (маркировки) отечественных и зарубежных пассивных радиокомпонентов.

Раздел 1. Радиоматериалы (58 часов)

Тема 1.1. Классификация радиоматериалов

[1], с. 7 … 27

Классификация радиоматериалов. Основные отличительные свойства полупроводников, проводников и диэлектриков. Электронное строение твердых тел. Основы зонной теории.

Тема 1.2. Полупроводниковые материалы

[1], с. 90 …106, 133 …182; [4], с. 146 … 301

Качественные особенности полупроводникового состояния. Классификация полупроводниковых материалов по составу и структуре. Кристаллические и некристаллические, неорганические и органические полупроводники.

Зонная структура полупроводников. Собственные и примесные полупроводники.

Электрофизические свойства, характеристики и области применения полупроводниковых материалов в РЭС. Электропроводность полупроводниковых материалов. Электронная и дырочная проводимость полупроводников. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Зависимость концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках от температуры. Температурная зависимость проводимости полупроводников.

Диффузия носителей заряда в полупроводниках. Диффузионный ток. Неравновесные электронные процессы в полупроводниках. Оптические и фотоэлектрические свойства полупроводников. Инжекционные явления в полупроводниках. Поверхностные электронные состояния и их влияние на свойства полупроводниковых материалов.

Тема 1.3. Проводниковые материалы

[1], с. 56 … 90; [4], с. 51 … 146

Качественные особенности металлического состояния. Металлическая химическая связь. Зонная структура металлов.

Классификация проводниковых материалов по структурно-химическим особенностям и уровню проводимости. Металлические сплавы. Неметаллические проводниковые материалы.

Электрофизические свойства, характеристики и области применения проводниковых материалов в РЭС. Температурная зависимость проводимости металлов и сплавов. Температурный коэффициент сопротивления проводниковых материалов. Влияние примесей и других дефектов структуры на проводимость металлов.

Явление сверхпроводимости. Низко- и высокотемпературная сверхпроводимость. Перспективы применения сверхпроводящих материалов в радиоэлектронике.

Тема 1.4. Диэлектрические материалы

[1], с. 182 … 236, 262 … 289; [3], с. 23 … 42, 57 … 63; [4], с. 301 … 428

Классификация диэлектрических материалов. Диэлектрики органические и неорганические, полярные и неполярные.

Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость. Механизмы поляризации диэлектриков. Спонтанная (самопроизвольная) поляризация. Сегнето- и параэлектрики. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и частоты переменного электрического поля.

Электрофизические свойства, характеристики и области применения диэлектрических материалов в РЭС. Электропроводность диэлектриков. Токи утечки. Диэлектрические потери. Явления электронного и ионного переноса в диэлектриках. Старение и пробой диэлектриков. Механизмы пробоя. Электрическая прочность диэлектриков.

Электроизоляционные материалы и их применение в электронной технике.

Тема 1.5. Радиоматериалы с магнитными свойствами

[1], с. 296 … 349

Классификация материалов по магнитным свойствам. Ферро- и ферримагнетики. Механизмы, отвечающие за магнитные свойства.

Магнитомягкие и магнитотвердые материалы. Элементы памяти с использованием магнитных свойств материалов.

Ферриты и их применение в технике сверхвысоких частот.

Тема 1.6. Основные конструкционные материалы РЭС

[1], с. 237 … 261

Электрофизические свойства основных конструкционных материалов РЭС.

Раздел 2. Радиокомпоненты (38 часов)

Тема 2.1. Линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты.

[2], с. 4 … 11

Основные параметры. Вольт-амперные характеристики линейного и нелинейного элемента при подаче постоянного и переменного напряжения.

Тема 2.2. Электрические конденсаторы

[2], с. 12 … 45; [3], с. 6 … 149; [5], с. 238 … 306

Основные параметры конденсаторов. Классификация конденсаторов по типу рабочего диэлектрика. Конденсаторы с неорганическим, оксидным и органическим диэлектриком. Высокочастотные, низкочастотные и полупроводниковые керамические конденсаторы. Воздушные конденсаторы постоянной и переменной емкости.

Конструктивно-технологические особенности современных конденсаторов. Монолитные керамические конденсаторы. Оксидно-электролитические и оксидно-полупроводниковые конденсаторы. Безвыводные конструкции конденсаторов. Пленочные конденсаторы как элементы гибридных интегральных схем.

Принципы обозначения (маркировки) отечественных и зарубежных конденсаторов.

Тема 2.3. Резисторы

[2], с. 46 … 86; [5], с. 203 … 238

Общие сведения. Типономиналы, основные характеристики и варианты классификации резисторов. Постоянные резисторы; переменные резисторы (потенциометры). Проволочные и непроволочные резисторы.

Тонкослойные резисторы на основе пленок проводниковых и полупроводниковых материалов (металлопленочные и металлоокисные резисторы) как элементы гибридных интегральных схем. Композиционные резисторы. Керметные резисторы.

Полупроводниковые резисторы функционального назначения: варисторы, терморезисторы, позисторы, критические терморезисторы, фоторезисторы.

Принципы обозначения (маркировки) отечественных и зарубежных резисторов.

Тема 2.4. Пассивные микросборки

[2], с. 93 … 103

Микросборки. Тонкопленочные микросборки. Толстопленочные микросборки. Материалы и технология.

Тема 2.5. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки

[5], с. 306 … 341

Основные свойства катушек индуктивности. Общая классификация. Катушки индуктивности с магнитным сердечником. Виды магнитных сердечников. Индуктивная связь между катушками. Дроссели высокой частоты. Типономиналы и основные эксплуатационные характеристики.

Трансформаторы. Применение трансформаторов в РЭА и требования к ним. Принцип действия и схемы замещения.

Основные расчетные соотношения и параметры трансформаторов питания. Особенности конструкций и анализ характеристик трансформаторов питания.

Линии задержки. Принцип действия, применение в РЭА.

Заключение (2 часа**)**

Современные тенденции развития электронного материаловедения и совершенствования элементной базы электронной техники.

2.2. Тематический план дисциплины

2.2.1. Тематический план дисциплины

для студентов **очно-заочной** формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Кол-во часов по очной форме обучения	Виды занятий и контроля							
			лекции		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	ЛР *
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ				
ВСЕГО		100	8	40	8	4	40	11	1	4
	Введение	2	0,5	0,5			1		1	
1.	Раздел 1. Радиоматериалы	58	4	22	6	3	23			
1.1	Классификация радиоматериалов	6		3			3	№1		
1.2	Полупроводниковые материалы	12	1	6			5	№2	Зад. 1	
1.3	Проводниковые материалы	12	1	3	2	1	5	№3		№1
1.4	Диэлектрические материалы	12	1	3	2	1	5	№4		№№ 2, 3
1.5	Радиоматериалы с магнитными свойствами	8		2	2	1	3	№5		№№ 4, 5
1.6	Основные конструкционные материалы РЭС	8	1	5			2	№6	Зад. 2	
2	Раздел 2. Радиокомпоненты	38	3	17	2	1	15			
2.1	Линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты	4		3			1	№7		

2.2	Электрические конденсаторы	10	1	4	2*	1*	7	№8	Зад. 3	№ 7
2.3	Резисторы	10	1	4				№9	Зад. 4	№6
2.4	Пассивные микросборки	4					4	№10		
2.5	Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки.	10	1	6			3	№11		
	Заключение	2	0,5	0,5			1			

* - выполняются работы по выбору преподавателя.

2.2.2. Тематический план дисциплины

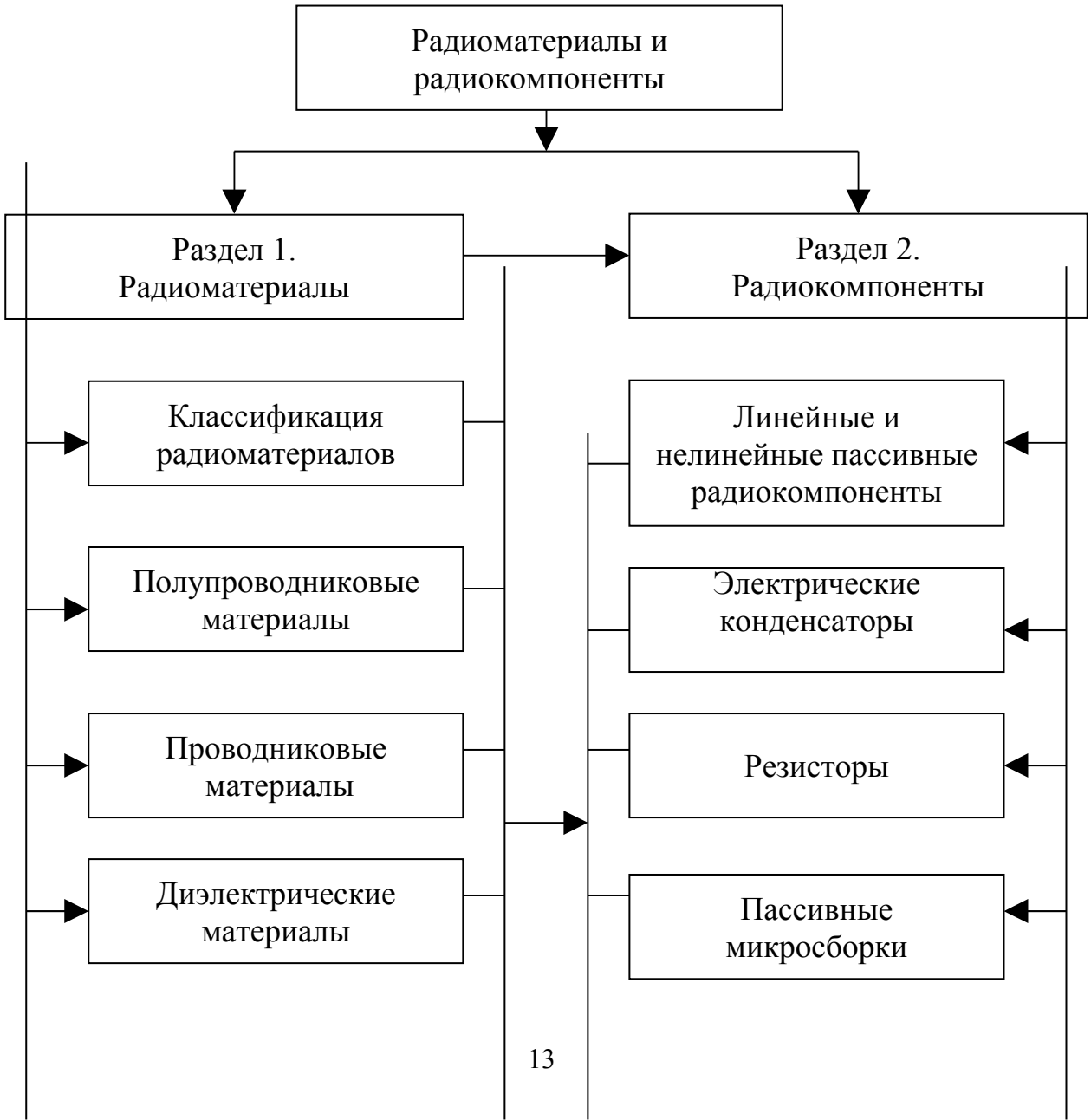
для студентов **заочной** формы обучения

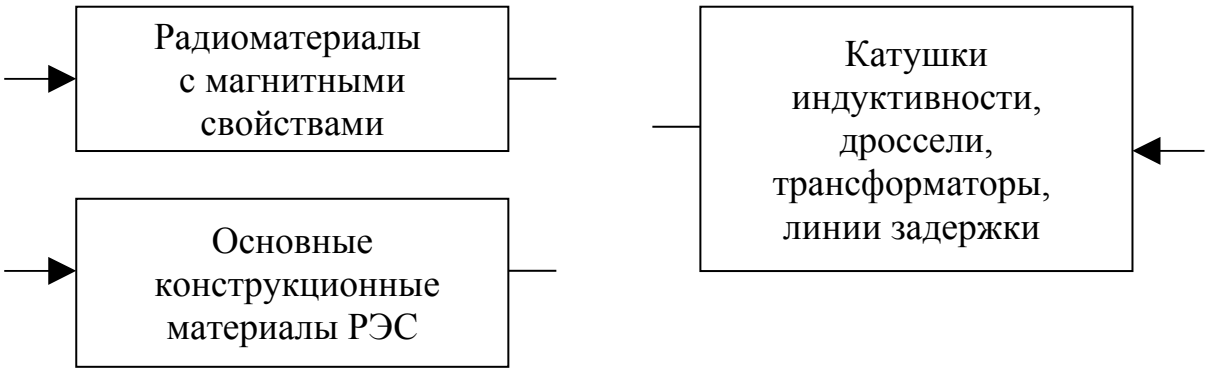
№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Кол-во часов по очной форме обучения	Виды занятий и контроля							
			лекции		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	ЛР *
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ				
ВСЕГО		100	4	47	6	3	40	11	1	3
	Введение	2		1			1		1	
1	Раздел 1. Радиоматериалы	58	2	27	4	2	23			
1.1	Классификация радиоматериалов	6		3			3	№1		
1.2	Полупроводниковые материалы	12	1	6			5	№2	Зад. 1	
1.3	Проводниковые материалы	12		5	2*	1*	10	№3		№1
1.4	Диэлектрические материалы	12	1	5				№4		№№ 2, 3
1.5	Радиоматериалы с магнитными свойствами	8		2	2*	1*	3	№5		№№ 4, 5
1.6	Основные конструкционные материалы РЭС	8		6			2	№6	Зад. 2	
2	Раздел 2. Радиокомпоненты	38	2	18	2	1	15			

2.1	Линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты	4					4	№7		
2.2	Электрические конденсаторы	10	1	5	2*	1*	5	№8	Зад. 3	№7
2.3	Резисторы	10	1	5				№9	Зад. 4	№6
2.4	Пассивные микросборки	4					4	№10		
2.5	Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки.	10		8			2	№11		
	Заключение	2		1			1			

* - выполняются работы по выбору преподавателя.

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты»





2.4. Временной график изучения дисциплины при использовании информационно-коммуникационных технологий

№	Название раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (темы) (из расчета – 4 часа в день)
	Введение	0,5 дн.
1	Раздел 1. Радиоматериалы	14,5 дн.
1.1	Классификация радиоматериалов	1,5 дн.
1.2	Полупроводниковые материалы	3 дн.
1.3	Проводниковые материалы	3 дн.
1.4	Диэлектрические материалы	3 дн.
1.5	Радиоматериалы с магнитными свойствами	2 дн.
1.6	Основные конструкционные материалы РЭС	2 дн.
2.	Раздел 2. Радиокомпоненты	9,5 дн.
2.1	Линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты	1 дн.
2.2	Электрические конденсаторы	2,5 дн.
2.3	Резисторы	2,5 дн.
2.4	Пассивные микросборки	1 дн.
2.5	Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки	2,5 дн.
	Заключение	0,5 дн.
	В том числе контрольная работа	2 дн.
	ИТОГО	25 дн.

2.5. Практический блок

2.5.1. Лабораторный практикум

2.5.1.1. Лабораторные работы (очно-заочная форма обучения)

Номер и название раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Кол-во часов	
		ауд.	ДОТ
1.3. Проводниковые материалы	№ 1. Электрические свойства проводниковых материалов	2	1
1.4. Диэлектрические материалы	№ 2. Электрические свойства диэлектриков	2	1
	№ 3. Исследование электрических свойств сегнетоэлектриков		
1.5. Радиоматериалы с магнитными свойствами	№ 4. Исследование свойств ферромагнитных материалов	2	1
	№ 5.Исследование магнитных свойств ферритов		
2.2. Электрические конденсаторы	№7. Электрические свойства конденсаторов с оксидным диэлектриком*	2	1
2.3. Резисторы	№ 6. Исследование свойств нелинейных полупроводниковых сопротивлений (варисторов) *		

* - выполняются работы по выбору преподавателя.

2.5.1.2. Лабораторные работы (заочная форма обучения)

Номер и название раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Кол-во часов	
		ауд.	ДОТ
1.3. Проводниковые материалы	№ 1. Электрические свойства проводниковых материалов	2	1
1.4. Диэлектрические материалы	№ 2. Электрические свойства диэлектриков		
	№ 3. Исследование электрических свойств сегнетоэлектриков		
1.5. Радиоматериалы с магнитными свойствами	№ 4. Исследование свойств ферромагнитных материалов	2	1
	№ 5. Исследование магнитных свойств ферритов		
2.2. Электрические конденсаторы	№7. Электрические свойства конденсаторов с оксидным диэлектриком*	2	1
2.3. Резисторы	№ 6. Исследование свойств нелинейных полупроводниковых сопротивлений (варисторов) *		

* - выполняются работы по выбору преподавателя.

2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний

Для успешного изучения дисциплины необходимо, кроме изучения теоретического материала, выполнение лабораторных работ и контрольной работы (для очно-заочной и заочной форм обучения), предусмотренных учебным планом.

Базисные рейтинг - баллы равны 100, в том числе:

- 44 балла – лекционные занятия (теоретический материал) – по результатам тестирования;

- 26 баллов – выполнение и защита лабораторных работ;

- 30 баллов – контрольная работа (для очно-заочной и заочной форм обучения).

Оценка **теоретических знаний** производится по результатам контрольного мероприятия, которым является тестирование. Тестирование проводится по всем 11 темам изучаемой дисциплины. Тест по каждой теме содержит 5 вопросов, каждый правильный ответ оценивается в 0,8 балла. Таким образом, максимальное количество баллов за тестирование составляет $11 \cdot 5 \cdot 0{,}8 = 44$. Повторное тестирование в случае необходимости проводится по новому варианту тестов.

Лабораторные занятия - 26 баллов.

За успешное выполнение всего цикла лабораторных работ начисляется 26 баллов; при невыполнении какой-либо из работ снимаются штрафные баллы: 6 баллов при очно-заочной форме обучения и 8 баллов при заочной форме обучения.

Контрольная работа – 30 баллов.

Контрольная работа содержит 4 задачи. За правильное решение каждой задачи начисляется по 6 баллов; при выполнении всего объема контрольной работы дополнительно начисляется 6 поощрительных баллов.

Оценка результатов обучения: при успешной работе с материалами курса студент может получить максимум - 100 баллов. Для получения зачета достаточно набрать более двух третей от этой суммы. **То есть, если Вы набрали более 67 баллов, зачет Вам обеспечен!**

3. Информационные ресурсы дисциплины

3.1. Библиографический список

Основной:

1. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники: учеб. для вузов/ В. В. Пасынков, В. С. Сорокин.- СПб.: Лань, 2003.
2. Ханин, С. Д. Пассивные радиокомпоненты. Конденсаторы, резисторы: учеб. пособие / С. Д. Ханин, О. В. Денисова, А. И. Адер.– СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009.
3. Пассивные радиокомпоненты. Электрические конденсаторы: учеб. пособие / С. Д. Ханин [и др.]. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2000, 2004.
4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники : учеб. для вузов. В 2 т. Т. 1. Проводники, полупроводники, диэлектрики / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – М.: Академия, 2006.
5. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники : учеб. для вузов. В 2 т. Т.2. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева.– М.: Академия, 2006.

Дополнительный:

6. Бриндли, К. Карманный справочник инженера электронной техники: пер. с англ. / К. Бриндли, Дж. Карр. - 3-е изд. - М.: Додэка-XX1, 2007.
7. Дэвис, Дж. Карманный справочник радиоинженера: пер. с англ. / Дж. Дэвис, Дж. Карр.- 4-е изд. – М.: Додэка-XX1, 2007.
8. Астайкин, А. И. Основы оптоэлектроники: учеб. пособие / А. И. Астайкин, М. К. Смирнов.- М.: Высш. шк., 2007.

9. Справочник по электротехническим материалам: в 3 т./ под общ. ред. Ю. В. Корицкого. - М.: Энергоатомиздат, 1986-1988.

Средства обеспечения освоения дисциплины (ресурсы Internet)

10. Единое окно доступа к образовательным ресурсам www.edu.ru

3.2. Опорный конспект

Введение

Эксплуатационные характеристики радиоэлектронной аппаратуры определяются свойствами составляющих ее деталей. Детали аппаратуры, выполняющие определенные функции по отношению к электрической энергии, называют компонентами (или элементами) радиоэлектронной аппаратуры.

Различают активные и пассивные компоненты радиоэлектронной аппаратуры. К активным относят компоненты, способные усиливать, генерировать или преобразовывать входной электрический сигнал, в том числе электронные лампы, транзисторы, интегральные микросхемы и другие полупроводниковые приборы.

Пассивные компоненты, или, как их часто называют, радиодетали предназначены для перераспределения электрической энергии: они потребляют или накапливают энергию. К ним относят конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности, трансформаторы и коммутирующие элементы.

Электрические свойства элементов описываются параметрами, устанавливающими связь между током и напряжением, которое прикладывается к элементу (вольт-амперной характеристикой).

В том случае, когда параметры элемента (например, ***L, C, R***) не изменяются с изменением тока или напряжения, элементы называются линейными, а состоящая из них радиотехническая цепь – линейной цепью.

Широкое распространение в радиоэлектронных устройствах имеют нелинейные пассивные элементы. Это резистивные элементы, у которых

сопротивление меняется под воздействием внешнего напряжения (например, варисторы) и емкостные нелинейные элементы, емкость которых меняется под воздействием приложенного напряжения.

Раздел 1. РАДИОМАТЕРИАЛЫ

Более подробная информация по данному разделу содержится в [1], [3], [4], [6], [8], [9].

В разделе рассматривается шесть тем:

1. Классификация радиоматериалов.
2. Полупроводниковые материалы.
3. Проводниковые материалы.
4. Диэлектрические материалы.
5. Радиоматериалы с магнитными свойствами.
6. Основные конструкционные материалы РЭС.

При работе с теоретическим материалом после изучения каждой темы следует ответить на вопросы, приведенные в конце ее изложения, после чего выполнить соответствующий тренировочный тест.

После проработки теоретического материала раздела 1 следует решить задачи № 1 и № 2 контрольной работы и выполнить лабораторные работы по указанию преподавателя.

Изучение каждой темы раздела заканчивается контрольным мероприятием: необходимо ответить на вопросы контрольных тестов №№ 1 - 6. Максимальное количество баллов, которые Вы можете получить по данному разделу, без учета лабораторных работ, составляет 39 баллов: 24 балла за тестирование и 15 баллов за решение двух задач контрольной работы.

1.1. Классификация радиоматериалов

По поведению в электрическом поле все материалы, используемые в электронной технике, делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Проводниковыми называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная электропроводность. Их применение в технике обусловлено в основном этим свойством, определяющим высокую удельную электрическую проводимость при нормальной температуре.

Условно к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5}$ Ом · м.

Диэлектрическими называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации, и в которых возможно существование электростатического поля. Реальный (технический) диэлектрик тем более приближается к идеальному, чем меньше его удельная проводимость, и чем слабее у него выражены замедленные механизмы поляризации, связанные с рассеянием электрической энергии и выделением тепла.

Условно к диэлектрикам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho > 10^{8}$ Ом ·м.

Полупроводниковыми называют материалы, являющиеся по удельной проводимости промежуточными между проводниковыми и диэлектрическими материалами, и отличительным свойством которых является сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей и различных дефектов, а также от внешних воздействий (температуры, освещенности и т.д.). Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материала, а также от условий их эксплуатации может изменяться в пределах $10^{-5} < \rho < 10^{8}$ Ом ·м.

Для понимания электрических, магнитных и других свойств радиоматериалов необходимы знания их химического состава, атомной структуры и структурных дефектов.

Взаимодействие атомов при образовании кристалла приводит к тому, что вместо отдельных энергетических уровней на шкале энергий образуются энергетические зоны (рис. 1.1). Количество уровней в каждой зоне настолько велико, что энергетический спектр в ней можно считать непрерывным. Как и в атоме, в кристалле идеальный порядок возможен только при T = 0 K, когда все (низшие и внешняя) энергетические зоны в полупроводниках и диэлектриках

заняты, а в металлах внешняя зона занята лишь частично. Большинство свойств материалов, включая электрические, зависят лишь от тех электронов, которые находятся во внешней зоне, называемой валентной. У металлов эта внешняя зона не заполнена и электроны могут повышать энергию под действием электрического поля. Но поскольку $E = \frac{mv^2}{2}$, то это означает, что электроны приобретают направленное движение, то есть становятся носителями тока. Таким образом, металл является проводником и при $T \to 0$ K.

Иное положение в полупроводниках и диэлектриках: в них зона, следующая за валентной, отделена энергетическим промежутком, называемым запрещенной зоной. Запрещенная зона — интервал энергий, которыми не могут обладать электроны (говорят, что электрон не может находиться в запрещенной зоне). Ширина запрещенной зоны E_g — минимальная энергия, отделяющая валентную зону от ближайшей энергетической зоны, где имеются пустые уровни, от зоны проводимости (рис. 1.2).

Следовательно, в полупроводниках и диэлектриках электрон становится носителем заряда, только преодолев запрещенную зону, то есть получив дополнительную энергию. Самым универсальным источником ее является тепло. Полупроводники являются диэлектриками при $T \to 0$ K, и в этом их принципиальное отличие от металлов.

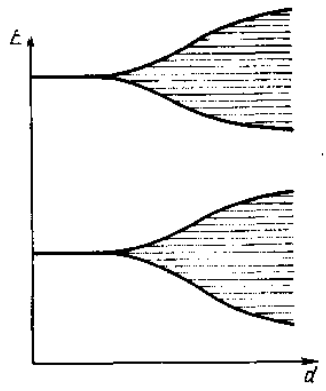


Рис. 1.1. Расщепление уровней в зоны при сближении атомов в кристалле

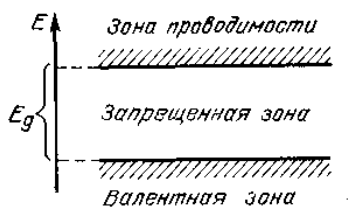


Рис.1.2. Схема расположения энергетических уровней полупроводников и диэлектриков

Уточним, что энергия, необходимая для преодоления запрещенной зоны, равна ширине запрещенной зоны.

Именно по ширине запрещенной зоны материалы делятся на три класса: у металлических проводников $E_g = 0$, у полупроводников 0,1 эВ < E_g <3,0 эВ, у диэлектриков E_g > 3,0 эВ.

Концентрация носителей заряда. Носителями зарядов в металлах и полупроводниках являются свободные электроны, в диэлектриках— слабосвязанные ионы. Концентрация носителей в металлах очень высока и достигает 10^{21} ... 10^{22} см $^{-3}$, поскольку почти каждый атом отдает свой электрон. Атомы полуметаллов, например висмута, «расстаются» со своими валентными электронами труднее, и примерно на 1000 атомов приходится лишь один свободный электрон.

В полупроводниках концентрация носителей может меняться очень сильно (в пределах 10^{10} ... 10^{20} см $^{-3}$) под действием как внутренних факторов (ширина запрещенной зоны, концентрация примесей и дефектов), так и внешних (изменения температуры, облучение, механическая деформация). Если концентрация примесей в образце невелика (собственный полупроводник), то концентрация носителей заряда в нем, n_i, определяется шириной запрещенной зоны E_g и значением температуры T по уравнению Больцмана:

$$n_i = K \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right),$$

которое отражает тот факт, что при 0 < kT <E_g переброс электронов через запрещенную зону возможен. Чем меньше ширина запрещенной зоны, тем больше вероятность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, так для широкозонного полупроводника ($E_g \geq$ 3 эВ) вероятность такого перехода очень мала.

Подвижность носителей заряда (μ), в отличие от их концентрации, является качественной характеристикой, она отражает, прежде всего, совершенно разную способность двух видов носителей — электронов и ионов — переносить электрический заряд.

Одни и те же носители заряда в разных материалах по-разному реагируют на электрическое поле, в то же время в одном и том же материале поведение носителей зависит от концентрации примесей, структурных дефектов, температуры. Параметром, характеризующим упорядоченное движение

носителей заряда в веществе, является их подвижность μ, которая представляет собой скорость, приобретаемую свободным электроном или ионом в электрическом поле единичной напряженности, м^2/(В·с)

$$\mu = v / E \ .$$

Удельная электропроводность (γ). Этот параметр учитывает вклад в процесс электропереноса обеих характеристик носителей заряда: и концентрации, и подвижности, (e - заряд электрона).

$$n \cdot \mu \cdot e = \gamma \ .$$

Для характеристики электропроводности материалов часто используется величина, обратная удельной электропроводности, — удельное электрическое сопротивление ρ , Ом ·м

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \ .$$

Удельное объемное сопротивление пленок часто не является константой и зависит от их толщины и условий получения. В микроэлектронике применительно к тонкопленочным проводникам и резисторам применяется параметр «удельное поверхностное сопротивление», ρ_s, характеризующий сопротивление участка пленки, имеющего геометрическую форму квадрата. называемое Удельное поверхностное сопротивление (иногда его называют сопротивлением слоя), измеряемое в омах, - параметр, численно равный отношению удельного объемного сопротивления материала ρ_v к толщине слоя δ:

$$\rho_s = \rho_v / \delta$$

Параметр ρ_s широко используется в пленочной технологии, а также в физике диэлектриков.

Вопросы для самопроверки по теме 1.1:

1. Чем определяются свойства любого материала? Какое значение имеют состав и строение материала?
2. Каковы основные отличительные свойства полупроводников?

3. Каковы основные отличительные свойства проводниковых материалов?

4. Каковы основные отличительные свойства диэлектриков?

5. Какой тип химической связи характерен для металлов?

6. Какой тип химической связи характерен для диэлектриков?

7. Какой тип химической связи характерен для полупроводников?

8. Какие энергетические зоны присутствуют в энергетической зонной диаграмме полупроводника?

9. Какие энергетические зоны присутствуют в энергетической зонной диаграмме металла?

10. Назовите основные электрические свойства материалов. Дайте определения понятиям «концентрация носителей заряда», «подвижность носителей заряда».

11. На какие три класса делятся все материалы электронной техники по электрическим свойствам? Что лежит в основе такой классификации?

1.2. Полупроводниковые материалы

1.2.1. Общие сведения. Собственные и примесные полупроводники

К полупроводникам относится широкий класс веществ, в которых концентрация подвижных носителей заряда значительно ниже, чем концентрация атомов, и может изменяться под влиянием температуры, освещения или относительно малого количества примесей.

Удельное сопротивление полупроводников при нормальной температуре находится между значениями удельного сопротивления проводников и диэлектриков.

Основной особенностью полупроводников является их способность изменять свои свойства под влиянием различных внешних воздействий (изменения температуры, освещенности, приложения электрического и магнитного полей и т.д.)

Свойства полупроводников очень сильно зависят от содержания примесей, даже в малых количествах присутствующих в кристалле. При введении примеси изменяется не только значение проводимости, но и характер ее температурной зависимости. В этом состоит качественное отличие

полупроводников от металлов, в которых примеси, независимо от их природы, всегда снижают проводимость, не оказывая существенного влияния на характер температурной зависимости.

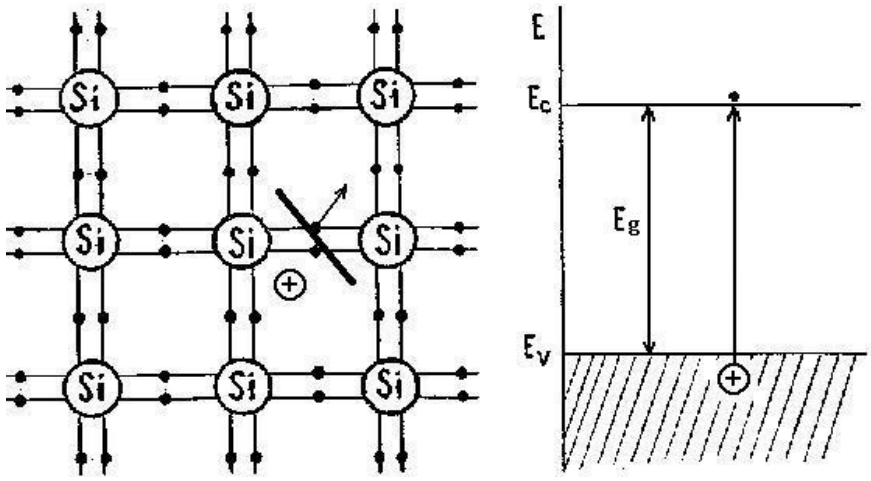
В настоящее время теория полупроводников достигла такого уровня, при котором можно направленно управлять свойствами материалов и приборов на их основе, заранее прогнозировать их поведение в конкретных условиях эксплуатации.

Собственными называются полупроводники, в которых концентрация электрически активных примесей столь мала, что они не оказывают существенного влияния на удельную проводимость материала.

Получить в виде столь чистых в химическом отношении полупроводников удалось ряд элементарных веществ (Ge, Si, Se), а также некоторые химические соединения (GaAs, InAs, InSb, SiC и др.).

Рассмотрим полупроводник, не содержащий примесей и дефектов. При $T \to 0$ К электропроводность такого полупроводника должна обращаться в нуль, поскольку в нем нет свободных носителей заряда. Действительно, валентная зона полностью заполнена электронами и не дает никакого вклада в проводимость, а зона проводимости пуста.

При $T > 0$ К появляется возможность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости (рис.1.3, а, б).



а б

Рис.1.3. Схематическое изображение кристаллической решетки собственного полупроводника и разрыва химической связи Si-Si (а), зоннная диаграмма и процесс генерации пары электрон –дырка в собственном полупроводнике (б)

В валентной зоне при этом образуются дырки (рис.1.3, а). Очевидно, что концентрации образующихся электронов (n_i) и дырок (p_i) будут равны, т. е. $n_i = p_i$. Одновременно с процессом образования свободных носителей заряда (генерацией) идет процесс их исчезновения (рекомбинация). Часть электронов возвращается из зоны проводимости в валентную зону и заполняет разорванные связи (дырки). При постоянной температуре за счет действия двух конкурирующих процессов в полупроводнике устанавливается некоторая равновесная концентрация носителей заряда.

Если к полупроводнику приложить электрическое поле напряженностью Е, то в нем возникает ток, складывающийся из электронной и дырочной составляющих.

Полупроводники, в которых за счет перехода некоторого количества электронов из валентной зоны в зону проводимости образуется такое же количество дырок, называют собственными. Соответственно их проводимость, состоящую из электронной и дырочной составляющих, называют собственной проводимостью.

Приписав электронам в зоне проводимости и дыркам в валентной зоне эффективную массу, мы можем считать их свободными и воспользоваться выражением для плотности тока $\boldsymbol{j}$ согласно модели свободных электронов

$$j = ne < v >= \frac{ne^2 \tau}{m_n} E ,$$

где m_n- эффективная масса электрона;

$\boldsymbol{v}$ - средняя скорость дрейфа в электрическом поле;

$\boldsymbol{\tau}$ - время релаксации.

Поскольку, согласно выражению для закона Ома в дифференциальной (локальной) форме, $j = \gamma \cdot E$, получим

$$\gamma = \frac{ne^2 \tau}{m_n} = n e \frac{\langle v \rangle}{E}$$

или, с учетом приведенного в 1.1 (стр. 24) выражения для подвижности носителей заряда

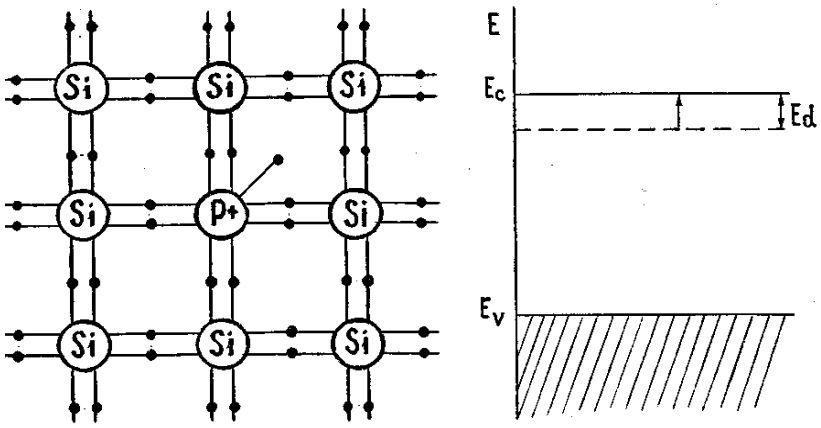
$$\gamma = e \cdot n \cdot \mu_n$$

Аналогичные выражения можно записать и для дырочной составляющей. Результирующая электропроводность собственного полупроводника определяется суммой электронной и дырочной составляющих

$$\gamma = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p \quad .$$

Если в полупроводник введена донорная (элементы 5 группы системы Д. И. Менделеева) или акцепторная (элементы 3 группы) примесь, то такой полупроводник называется примесным.

Рассмотрим полупроводник, легированный донорной примесью. Из общих соображений понятно, что незадействованный в образовании химических связей валентный электрон примеси может сравнительно легко оторваться от атома примеси и оказаться в зоне проводимости полупроводника (рис.1.4.).



а б

Рис 1.4. Схематическое (плоскостное) изображение кристаллической решетки кремния с фосфором в качестве примеси замещения (а) и энергетическая диаграмма примесного полупроводника с донорной примесью (б). Примесные уровни обозначены черточками, что означает пространственную (вблизи примесных атомов) локализацию примесных состояний, в отличие от состояний в разрешенных зонах, которые делокализованы в пространстве

Энергия связи относительно слабо связанного электрона с атомом примеси может быть оценена в рамках модели электрона в атоме водорода (модель водородоподобного примесного атома) с двумя существенными поправками.

Во-первых, вместо реальной массы электрона в модели должна фигурировать эффективная масса m_n.

Во-вторых, энергия связи должна быть в ε^2 раз меньше (ε-диэлектрическая проницаемость полупроводника) из-за влияния материала полупроводника.

Таким образом, энергия примесного электрона или, иначе, глубина примесного уровня относительно дна зоны проводимости может быть оценена по формуле

$$E_d = E_i \frac{m_n}{m} \frac{1}{\varepsilon^2},$$

где E_i - энергия ионизации атома водорода (~13,5 эВ).

Численная оценка дает величины порядка сотых долей эВ, что существенно меньше ширины запрещенной зоны типичных полупроводников (~ 1 эВ). Следовательно, энергетический уровень "лишнего" электрона примеси элементов пятой группы в полупроводниковом кристалле, образованном атомами элементов четвертой группы, располагается в запрещенной зоне полупроводника, как показано на рис. 1.4.

Поскольку примесные уровни рассмотренного вида относительно легко поставляют электроны в зону проводимости полупроводника, такие примеси называются донорами, а уровни - донорными уровнями.

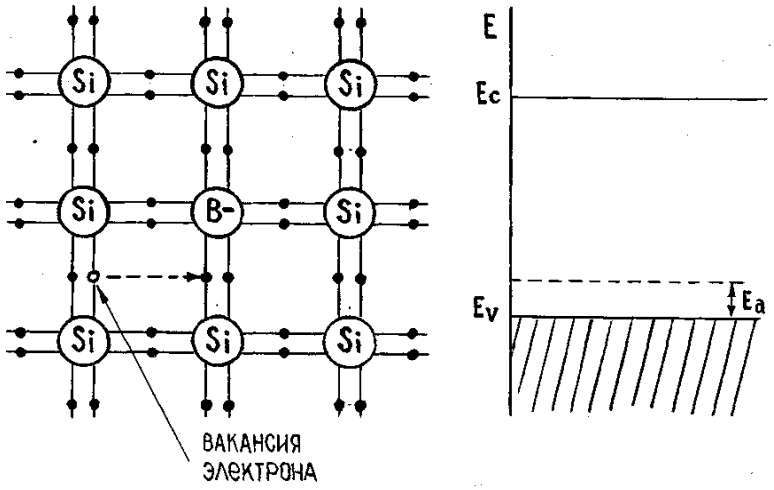
Примесные полупроводники, содержащие донорные уровни, характеризуются преобладанием электронного компонента проводимости (по сравнению с дырочным компонентом) и называются электронными полупроводниками или полупроводниками ***n***-типа.

Рассмотрим ту же кристаллическую решетку элемента четвертой группы, в которую введена другая примесь - элемент третьей группы (например, B). Для образования ковалентных связей с четырьмя ближайшими соседями у атома примеси не хватает одного электрона (рис. 1.5, а). Примесь такого вида может захватывать недостающий электрон у соседних атомов кристаллической решетки (то есть электрон из валентной зоны переходит на примесный уровень в запрещенной зоне), при этом по кристаллу начнет блуждать вакансия электрона - дырка.

Примеси такого вида называют акцепторами, а примесные уровни - акцепторными уровнями.

Зонная диаграмма такого примесного полупроводника изображена на рис.1.5, б. Примесные полупроводники с акцепторами характеризуются преобладанием дырочной проводимости и поэтому они называются дырочными полупроводниками, или полупроводниками ***p***-типа.

Таким образом, характер примеси замещения определяется, в первую очередь, соотношением валентностей атомов примесей и основы. Примесные атомы с меньшей валентностью, по сравнению с атомами основы, ведут себя как акцепторы, а с большей - как доноры.



а б

Рис.1.5. Схематическое изображение кристаллической решетки кремния с бором в качестве примеси замещения (а) и энергетическая диаграмма примесного полупроводника с акцепторной примесью (б)

Приведенные энергетические диаграммы справедливы только для так называемых слаболегированных полупроводников, концентрация примесей $N_{пр}$ в которых мала. С увеличением концентрации примесей среднее расстояние между атомами примеси уменьшается. В данном случае говорят о промежуточном уровне легирования полупроводника. Электрон, локализованный вблизи одного из примесных атомов, испытывает при этом воздействие и со стороны других примесных центров, в результате чего энергетический уровень примеси несколько смещается. Величина смещения зависит от взаимного расположения примесных атомов, а поскольку примеси распределены в кристалле хаотически, то положение примесного уровня в разных частях кристалла различно. В результате этого в запрещенной зоне вместо дискретного энергетического уровня примеси появляется набор

пространственно локализованных примесных уровней, что проявляется в так называемом классическом (вследствие статистического усреднения) уширении плотности состояний.

Наконец, при еще большем увеличении $N_{\text{пр}}$ можно получить сильнолегированные полупроводники.

У сильнолегированного полупроводника примесные электроны обобществляются, в результате чего возникает дополнительная зона разрешенных состояний - примесная зона, электроны в которой уже не локализованы в пространстве. Такой вид уширения примесных состояний называют квантовым.

1.2.2. Концентрация носителей заряда в собственном и слаболегированном полупроводниках

Поскольку в полупроводнике, в общем случае, имеются носители заряда двух типов - электроны и дырки - ток проводимости в этих материалах имеет две составляющие

$$j = -en\,v_n + qp\,v_p,$$

где n и p - концентрации электронов и дырок соответственно;

v_n и v_p - скорости дрейфа электронов и дырок.

Выражая дрейфовые скорости носителей заряда через подвижности и учитывая направление движения электронов и дырок в электрическом поле, можем записать в скалярном виде

$$j = en\mu_n E + ep\mu_p E = (en\mu_n + ep\mu_p)E = \gamma E \quad ,$$

где E - напряженность электрического поля;

γ - удельная электропроводность полупроводника,

μ_n и μ_p - подвижность электронов и дырок соответственно.

Таким образом, проводимость полупроводника определяется концентрацией и подвижностью носителей заряда.

На рис. 1.6 представлена температурная зависимость концентрации носителей в примесном полупроводнике. Данная зависимость линеаризуется в координатах $ln\ n$ - $1/T$. При этом тангенс угла наклона прямых на участках 1 и 3 определяется энергией активации примесной и собственной электропроводности соответственно.

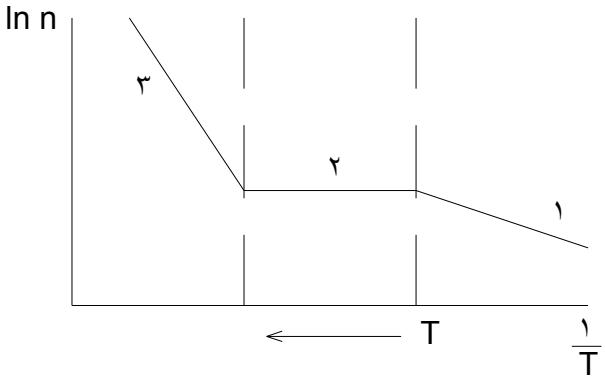


Рис. 1.6. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в примесном полупроводнике в координатах $\ln n = f\left(\frac{1}{T}\right)$

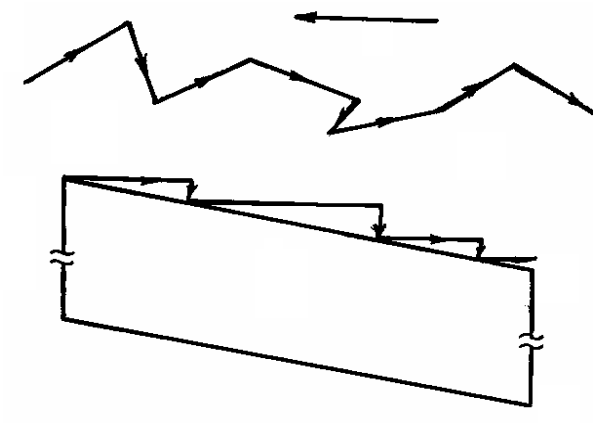
1.2.3. Подвижность носителей заряда в полупроводнике

Предположим, что к кристаллу полупроводника приложено электрическое поле. На зонной диаграмме это проявляется в наклоне энергетических уровней электронов, в том числе краев зон, причем тангенс угла наклона пропорционален напряженности поля, а смещение уровня между двумя данными точками объема полупроводника - разности потенциалов между ними (рис. 1.7).

Заметим, что энергетические диаграммы строятся для электронов, поэтому энергия электрона растет с повышением энергетических уровней на диаграмме, а энергия дырок, наоборот, увеличивается с понижением энергетических уровней. Увеличению потенциала, таким образом, соответствует понижение энергетических уровней.

В течение промежутка времени, равного в среднем времени релаксации τ, электроны ускоряются вдоль направления поля. Направленное движение носителей под воздействием не слишком сильного поля представляет собой небольшое возмущение хаотического теплового движения. Поэтому τ практически не зависит от напряженности поля.

а



б

Рис. 1.7. Движение электрона в полупроводнике под воздействием внешнего электрического поля (а); энергетическая диаграмма полупроводника при приложении к нему электрического поля (б)

В отличие от вырожденного электронного газа в металле, у которого в переносе заряда участвуют только электроны, находящиеся вблизи уровня Ферми, в полупроводнике все свободные электроны в одинаковой степени участвуют в электропроводности.

Скорость упорядоченного движения "среднего" электрона под действием внешнего электрического поля $\boldsymbol{E}$ определяется выражением

$$\vec{v} = -\frac{e\tau}{m_n}\vec{E}.$$

Таким образом, подвижность электронов в общем случае равна

$$\mu_n = \frac{e\tau}{m_n}.$$

Однако в отличие от металлов, для невырожденного электронного газа в полупроводнике

$$\mu_n = \frac{e v < \lambda_e >}{m_n < v_n >},$$

где $v_n \geq \sqrt{\frac{\wedge k T}{\pi m_n}}$ - средняя скорость теплового движения частиц невырожденного газа, $\langle \lambda_e \rangle$ - средняя длина свободного пробега, ν - число столкновений, приводящих к утрате направленного движения носителя.

Аналогичным образом можно определить подвижность дырок в полупроводнике:

$$\mu_p = \frac{e v \langle \lambda_p \rangle}{m_p \langle v_p \rangle} .$$

Проанализируем зависимость подвижности электронов и дырок в полупроводнике от температуры.

В области высоких температур основное значение имеет рассеяние носителей заряда на тепловых колебаниях решетки, то есть на фононах.

При высоких температурах фононы обладают столь высокими импульсами, что уже при единичных актах столкновения с ними носители заряда полностью утрачивают скорость в первоначальном направлении.

Таким образом, в области высоких температур, в которой основным механизмом рассеяния является рассеяние на фононах, подвижность носителей заряда (электронов, дырок) в полупроводниках падает с увеличением температуры по закону $T^{-3/2}$.

В области низких температур основным механизмом рассеяния является рассеяние носителей заряда на ионизированных примесных атомах. Электрическое поле ионов примеси отклоняет электроны (дырки), проходящие вблизи них, и тем самым уменьшает скорость их движения в первоначальном направлении.

Чем выше начальная скорость электрона, тем большее число актов рассеяния потребуется для того, чтобы прекратить движение электрона в заданном направлении.

Таким образом, в области низких температур подвижность носителей заряда в полупроводнике, ограниченная рассеянием на ионизированных примесях, пропорциональна $T^{3/2}$.

График температурной зависимости подвижности носителей заряда в полупроводнике приведен на рис. 1.8.

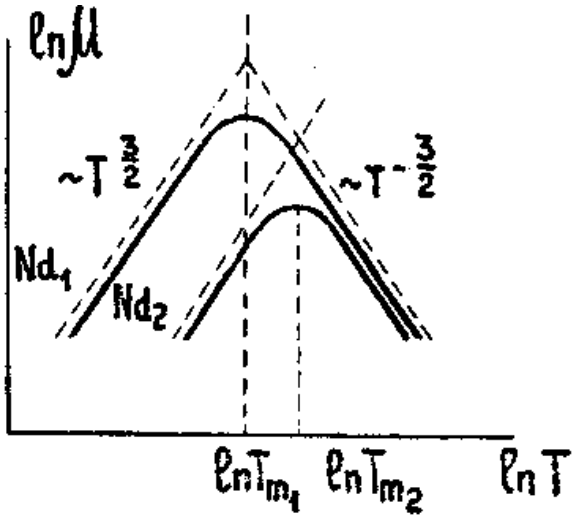


Рис.1.8. Температурная зависи-мость подвижности носителей заряда в примесном полупрово-днике с различной концен-трацией примеси: $N_{d2}>N_{d1}$

Видно, что увеличение концентрации примесей ведет, с одной стороны, к уменьшению подвижности (так как $<\lambda> \sim 1/N_d$), а с другой стороны - к расширению области температур, в которой основным механизмом рассеяния является рассеяние на примесях, т. е. к смещению положения максимума зависимости $\mu(T)$ в область более высоких температур.

1.2.4. Температурная зависимость проводимости полупроводника

Учитывая температурные зависимости концентрации свободных носителей заряда и их подвижности, можно предсказать температурную зависимость проводимости полупроводника. В области температур ниже температуры истощения примеси ($T < T_s$) температурная зависимость проводимости

$$\gamma = en_n\mu_n + ep_n\mu_p$$

определяется температурной зависимостью концентрации носителей (так как μ является степенной функцией температуры, а n - экспоненциальной) и линеаризуется в координатах $ln\sigma$ - $1/T$. При этом тангенс угла наклона получающейся прямой равен $\Delta E_d / 2k$.

В области высоких температур $T>T_i$, где T_i - температура перехода к собственной проводимости, зависимость $\gamma(T)$ также в основном определяется зависимостью $n(T)$, где $n = n_i$. График зависимости $\gamma(T)$ в координатах $ln\gamma$ - $1/T$ и в этом случае имеет вид прямой линии, тангенс угла наклона которой равен $E_g/2k$ (рис.1.9).

В промежуточной области - от температуры истощения примесных центров до температуры перехода к собственной проводимости ($T_s<T<Ti$) - все примесные атомы уже ионизированы, однако заметной генерации собственных носителей еще не наблюдается. Поэтому в этой области температур концентрация свободных носителей заряда остается примерно постоянной и равной $N_{пр}$. В силу этого обстоятельства изменение проводимости полупроводника в указанной области температур определяется температурной зависимостью подвижности .

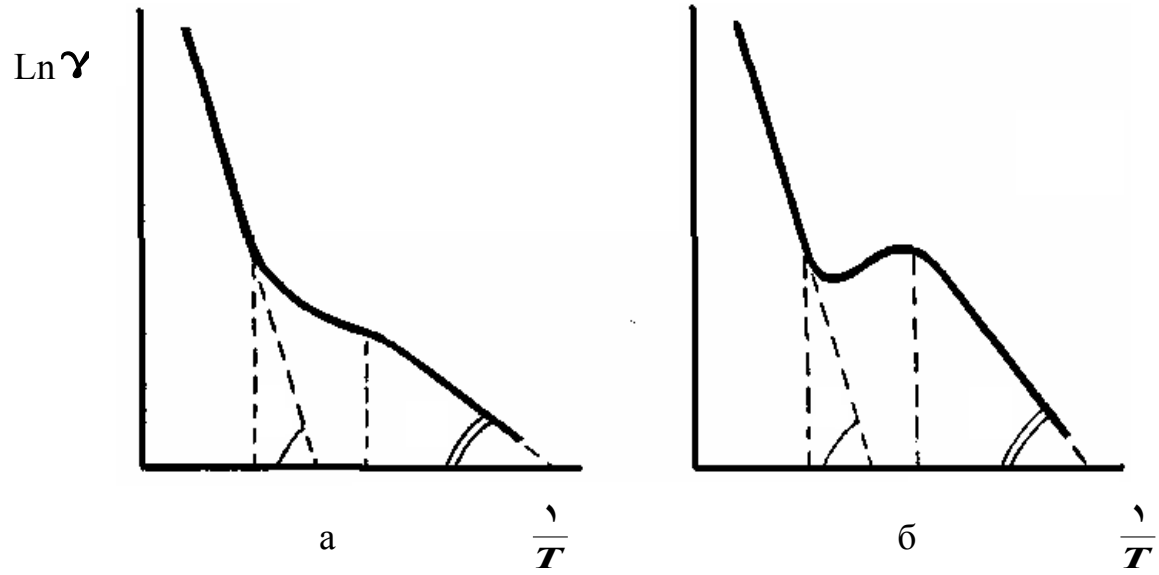


Рис.1.9. Температурная зависимость проводимости примесного полупроводника с различными механизмами рассеяния в области истощения примесных центров: рассеянием на примесях (а) и рассеянием на фононах (б)

1.2.5. Основные материалы полупроводниковой микроэлектроники

Кремний. В настоящее время кремний является базовым материалом для изготовления дискретных приборов и интегральных схем. Несмотря на интенсивное развитие интегральной микроэлектроники, в общем объеме выпуска полупроводниковых изделий значительную долю составляют кремниевые дискретные приборы. Из кремния изготавливают

выпрямительные, импульсные и СВЧ-диоды, низкочастотные и высокочастотные, мощные и маломощные биполярные транзисторы, полевые транзисторы и приборы с зарядовой связью, а также большинство стабилитронов и тиристоров. Широко применяются кремниевые фотоэлементы (солнечные батареи) и фотодиоды.

Кремний кристаллизуется в структуре алмаза, имеет ширину запрещенной зоны 1,12 эВ, благодаря чему удельное сопротивление кремния на три с лишним порядка превышает собственное сопротивление германия. Кремний устойчив на воздухе и при нагревании до 900 °С, выше этой температуры он начинает интенсивно окисляться с образованием оксида SiO_2.

Монокристаллы кремния выращивают методами вытягивания из расплава и бестигельной зонной плавки. Первый метод применяется, как правило, для получения крупных монокристаллов с относительно небольшим удельным сопротивлением (менее 2,5 Ом·м). Метод заключается в том, что в расплав медленно вводится монокристаллическая затравка, закрепленная на вращающемся держателе. Затравка выдерживается в расплаве, пока не оплавится с поверхности, а затем, вращаясь, начинает медленно подниматься. За затравкой тянется жидкий столбик расплава, который при вытягивании над поверхностью расплава затвердевает, образуя единое целое с затравкой. Процесс выращивания монокристаллов сопровождается их одновременным легированием, причем примеси вводят в строго контролируемом количестве непосредственно в расплав. В качестве легирующих примесей наиболее часто используют фосфор и бор. Методом вытягивания из расплава в промышленных условиях получают монокристаллы кремния диаметром до 150 мм и длиной до 1 м с широким диапазоном удельного сопротивления.

Метод вертикальной бестигельной зонной плавки используется для получения высокоомных монокристаллов кремния (с удельным сопротивлением до 200 Ом·м) и с малым содержанием остаточных примесей. Этот метод обеспечивает выращивание монокристаллов с одновременной кристаллизационной очисткой. При этом узкая расплавленная зона удерживается между твердыми частями слитка за счет сил поверхностного натяжения и постепенно перемещается вверх по слитку.

Соединения группы $A^{III}B^{V}$. Ближайшими электронными аналогами кремния являются соединения группы $A^{III}B^{V}$, которые образуются в результате

взаимодействия элементов Ш группы периодической системы (бора, алюминия, галлия, индия) с элементами V группы (азотом, фосфором, мышьяком и сурьмой). Соответственно различают нитриды, фосфиды, арсениды и антимониды. Самым малым значением ширины запрещенной зоны характеризуется InSb (0,18 эВ), у арсенида галлия она превышает ширину запрещенной зоны кремния и составляет 1,43 эВ, а у фосфида галлия составляет 2,26 эВ. Среди всех полупроводников антимонид индия обладает рекордно высокой подвижностью электронов. Ценным свойством многих полупроводников типа $A^{III}B^{V}$ является высокая эффективность излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда. Для генерации излучения в видимой области спектра ширина запрещенной зоны полупроводника должна быть больше 1,7 эВ, этому условию удовлетворяют только фосфид галлия GaP и нитрид галлия GaN. Материалы с более узкой запрещенной зоной способны эффективно излучать в инфракрасной области. К их числу относится арсенид галлия.

Многообразие свойств полупроводников типа $A^{III}B^{V}$ обусловило их широкое применение в приборах и устройствах различного технического назначения. Инжекционные лазеры и светодиоды, а также другие элементы оптоэлектроники созданы на основе материалов этой группы. Большой набор значений ширины запрещенной зоны позволяет создать различные виды фотоприемников, перекрывающих широкий диапазон спектра, это фотодиоды и фотоэлементы. Также соединения группы $A^{III}B^{V}$ демонстрируют возможность плавно управлять их шириной запрещенной зоны путем изменения компонентного состава, например, замещая часть атомов галлия индием в GaAs или часть атомов мышьяка фосфором в арсениде индия. Это открывает широкие возможности для создания гетеропереходов и приборов на их основе.

Соединения группы $A^{II}B^{V1}$. Соединения типа $A^{II}B^{V1}$ также широко используются в оптоэлектронике. К ним относят халькогениды (сульфиды, селениды, теллуриды) цинка, кадмия и ртути. Большая доля ионной связи в соединениях этого типа приводит к большим значениям ширины запрещенной зоны и заниженным подвижностям носителей заряда. Важной особенностью является то, что многие из полупроводников типа $A^{II}B^{V1}$ проявляют электропроводность только одного типа. Так сульфиды и селениды цинка, кадмия и ртути всегда являются полупроводниками ***n***-типа. По масштабам

применения из всех соединений данной группы выделяют сульфид цинка и сульфид кадмия. Первый является основой многих промышленных люминофоров, а второй - для изготовления фоторезисторов для видимой области спектра.

Вопросы для самопроверки по теме 1.2:

1. Какой материал называют собственным полупроводником и каковы его основные свойства?
2. Какие примеси в полупроводниках называют донорными, а какие – акцепторными?
3. Каково соотношение концентраций электронов и дырок в собственном полупроводнике?
4. Каково соотношение концентраций электронов и дырок в примесном полупроводнике *n*-типа?
5. Каково соотношение концентраций электронов и дырок в примесном полупроводнике *p*-типа?
6. Что понимают под подвижностью носителей заряда в полупроводниках?
7. Каковы основные механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках?
8. Чем обусловлено широкое применение кремния в микроэлектронике?
9. Какие полупроводниковые материалы используют для создания гетеропереходов?
10. Какие полупроводниковые материалы применяют при изготовлении светодиодов?

1.3. Проводниковые материалы

1.3.1. Общие сведения о проводниках. Физические процессы в проводниках

Проводники - материалы, имеющие удельное электрическое сопротивление менее 10^{-6} Ом · м и предназначенные для коммутации, формирования контактов и накопления зарядов. На основе проводников (как и полупроводников) можно

изготавливать также и резистивные элементы, служащие для регулирования и распределения энергии между электрическими цепями.

К проводникам относятся все металлы, а также полуметаллы — углерод (графит), мышьяк, сурьма, висмут и растворы электролитов.

В радиоэлектронике в качестве проводников чаще всего используют металлы.

Поскольку в металлах практически каждый атом отдает в состав электронного газа валентные электроны, концентрация свободных носителей чрезвычайно велика - $5 \cdot 10^{21} \ldots 5 \cdot 10^{22}$ $см^{-3} \cdot$ Она мало зависит от внешних воздействий, что резко отличает металлы от полупроводников. Под воздействием внешнего электростатического поля только небольшая часть свободных электронов металла перемещается на его поверхность. При дальнейшем увеличении напряженности поля смещается дополнительное количество электронов, но создать такое поле, которое было бы способно вытеснить к поверхности все электроны, «опустошить» металл, освободив его объем от электронного газа, невозможно. Поэтому электрическое поле внутри металла, помещенного между заряженными электродами, отсутствует.

Удельное сопротивление различных металлов отличается незначительно - в большинстве случаев - в пределах $1{,}6 \cdot 10^{-6} \ldots 7 \cdot 10^{-5}$ Ом · см. Это тоже следствие определяющей роли в электропроводности большой и стабильной концентрации электронов.

Концентрации свободных электронов в чистых металлах мало отличаются и практически не зависят от изменения температуры. Поэтому проводимость и сопротивление определяются в основном средней длиной свободного пробега электронов, которая зависит от строения проводника.

1.3.2. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников

Движение свободных электронов в металле можно рассматривать как распространение плоских электронных волн. Такая электронная волна в строго периодическом поле распространяется без рассеяния, то есть идеальная кристаллическая решетка не оказывает рассеивающего влияния на поток электронов. Это означает, что в идеальном кристалле при $T \to 0$ К длина

свободного пробега электронов равна бесконечности, а сопротивление электрическому току равно 0.

Рассеяние, приводящее к появлению сопротивления, возникает в тех случаях, когда в решетке имеются различного вида нарушения ее строгой периодичности в атомном строении.

В чистых металлах совершенной структуры единственной причиной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, являются тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки. Очевидно, что с ростом температуры увеличивается амплитуда тепловых колебаний атомов и связанные с ними флуктуации периодического поля решетки (нарушение периодического поля решетки). А это, в свою очередь, усиливает рассеяние электронов и вызывает возрастание удельного сопротивления.

Относительное изменение удельного сопротивления ρ, при изменении температуры на один Кельвин (градус) называют температурным коэффициентом удельного сопротивления

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$$

Положительный знак α_ρ соответствует случаю, когда удельное сопротивление возрастает при повышении температуры.

На практике при расчете α_ρ часто пользуются следующей формулой:

$$\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l \quad ,$$

где α_R - температурный коэффициент сопротивления самого материала, из которого изготовлен образец;

α_l - температурный коэффициент линейного расширения этого материала.

У чистых металлов $\alpha_\rho >> \alpha_l$, поэтому у них $\alpha_\rho \approx \alpha_R$. Однако для термостабильных металлических сплавов такое приближение не является справедливым.

1.3.3. Влияние примесей на удельное сопротивление металлов

Причинами рассеяния электронных волн в металле могут быть не только тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки, но и статические дефекты структуры, которые также нарушают периодичность потенциального поля решетки кристалла. Рассеяние на дефектах структуры, к которым, в основном, относятся примесные атомы, не зависит от

температуры. Поэтому по мере приближения температуры к абсолютному нулю сопротивление реальных металлов стремится к некоторому постоянному значению, называемому остаточным сопротивлением. Отсюда вытекает правило Матиссена об аддитивности удельного сопротивления: полное сопротивление металла есть сумма сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки ρ_T, и остаточного сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на дефектах структуры $\rho_{ост}$

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}.$$

Исключение из этого правила составляют сверхпроводящие металлы. Наиболее существенный вклад в остаточное сопротивление вносит рассеяние на примесях. Примеси всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнения, либо в виде легирующего элемента (сплавы).

1.3.4. Электрические свойства металлических сплавов

В технике широко применяются металлические сплавы. Распределение атомов разных сортов по узлам кристаллической решетки вызывает значительное нарушение периодического потенциала решетки, что приводит к сильному рассеянию электронов. Как и в случае металлов, полное удельное сопротивление сплава можно выразить в виде суммы двух слагаемых:

$$\rho_{спл} = \rho_T + \rho_{ост},$$

где ρ_T – удельное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки;

$\rho_{ост}$ – остаточное удельное сопротивление, связанное с рассеянием электронов на неоднородностях структуры сплава.

Чем больше удельное сопротивление сплава, тем меньше его температурный коэффициент удельного сопротивления $\alpha_\rho^{спл}$. Это вытекает из того, что в сплавах $\rho_{ост}$, как правило существенно превышает ρ_T и не зависит от температуры. В соответствии с определением температурного коэффициента

$$\alpha_\rho^{спл} = \frac{1}{\rho_{спл}} \frac{d\rho_{спл}}{dT} = \frac{1}{\rho_{ост} + \rho_T} \cdot \frac{d\rho_T}{dT}.$$

В сплавах обычно $\rho_{ост}$ на порядок и более превышает ρ_T. Поэтому $\alpha_\rho^{сп}$ может быть значительно ниже α_ρ чистого металла. На этом основано получение термостабильных проводящих материалов. Во многих случаях температурная зависимость удельного сопротивления сплавов оказывается более сложной, чем та, которая вытекает из простой аддитивной закономерности. В некоторых сплавах при определенных соотношениях компонентов наблюдается отрицательный α_ρ.

1.3.5. Классификация проводниковых материалов

Материалы высокой проводимости. К этой группе материалов относятся проводники с удельным электрическим сопротивлением не более, чем 0,1 мкОм·м. Наиболее широко применяются медь и алюминий.

Медь характеризуется малым удельным сопротивлением. Из всех металлов только серебро имеет меньшее значение удельного сопротивления, достаточно высокую механическую прочность, стойкость к коррозии, хорошую обрабатываемость, легкость пайки и сварки. Недостатком меди является ее подверженность атмосферной коррозии с образованием окисных и сульфидных пленок. Значительное влияние на механические свойства меди оказывает водород. В металле образуются микротрещины, которые придают ему хрупкость и ломкость. В производстве это явление называют водородной болезнью меди.

Алюминий является вторым по значению проводниковым материалом. Удельное сопротивление алюминия в 1,6 раза больше сопротивления меди, но алюминий в 3,5 раза легче. Благодаря малой плотности обеспечивается большая проводимость на единицу массы. Алюминий активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Такая пленка предохраняет металл от коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта. Поэтому пайка алюминия обычными методами не производится.

Пленки алюминия широко используют в интегральных микросхемах в качестве контактов и межсоединений. Алюминий легко напыляется, обладает хорошей адгезией к кремнию, образует хорошие омические контакты с кремнием.

Сплавы высокого сопротивления. Сплавами высокого сопротивления называют проводниковые материалы, у которых значения удельного сопротивления составляют не менее 0,3 мкОм·м. Их применяют при изготовлении электроизмерительных приборов, образцовых резисторов, реостатов и электронагревательных устройств. При использовании сплавов в измерительной технике от них требуется не только высокое сопротивление, но и возможно меньшее значение α_ρ. Проводниковые сплавы в электронагревательных приборах должны длительно работать при температурах порядка 1000 °С. Наиболее распространенными являются сплавы на основе меди – манганин и константан, а также хромосилицидные и железохромоалюминиевые сплавы.

Манганин – основной сплав для электроизмерительных приборов и образцовых резисторов.

Константан (сплав меди и никеля) используется для реостатов и электронагревательных приборов, является материалом термопар, которые служат для измерения температуры.

Хромоникелевые сплавы (нихромы) используют для изготовления нагревательных элементов электрических печей, паяльников. Сплав имеет высокую жаропрочность. Тонкие пленки нихрома применяют для формирования тонкопленочных резисторов.

Резистивные материалы. Резисторы являются самыми распространенными компонентами РЭА и ЭВА, в которой они выполняют функции регулирования и распределения электрической энергии между цепями и элементами схемы.

Требования к резисторам, используемым во всех видах РЭА, очень разнообразны, а диапазон параметров весьма широк, поэтому для изготовления резисторов используются десятки различных материалов, каждый из которых обладает специфическими достоинствами и недостатками. Набор резистивных материалов должен быть достаточно широким с тем, чтобы можно было перекрыть диапазон значений сопротивления в пределах 1 ... 10^6 Ом (реже до 10^9 Ом и выше). Очевидно, что наибольшие трудности связаны с разработкой материалов для высокоомной части этого диапазона.

Материал большинства резисторов должен обладать стабильностью, то есть минимальным обратимым (температурным) и необратимым дрейфом удельного сопротивления. Его величина определяется по результатам длительных испытаний (~1000 ч) резистора при полной нагрузке и повышенной температуре — около 353 К (80 °С).

Следует иметь в виду, что значения параметров, стабильность и надежность при эксплуатации резисторов, особенно микроэлектронных, зависит не только от свойств исходного материала, но и в значительной, а иногда решающей мере - от способа и режимов формирования пленок.

Функциональному назначению резисторов наиболее полно соответствуют материалы в виде *тонких пленок*, так как они позволяют реализовывать большие погонные (т. е. на единицу длины) значения сопротивления. Поэтому тонкопленочные резисторы являются самым обширным и перспективным классом резисторов. По условиям совместимости с другими элементами, прецизионности, мощности, экономичности, стабильности применяются резисторы и других типов, а именно: толстопленочные (стеклоэмалевые), проволочные, фольговые и кремниевые диффузионные (в полупроводниковых ИС).

Металлопленочные резисторы можно изготовлять на основе чистых химически стойких металлов— Та, Re, Cr (а самые низкоомные - на основе Au, A1), сплавов металлов и интерметаллических соединений.

Пленки тантала достаточно стабильны, а сопротивление резистора легко подгонять под номинал (в сторону увеличения) путем анодного окисления. Тантал дефицитен, а процессы получения танталовых резисторов плохо совмещаются с другими операциями при изготовлении ГИС и микросборок. Поэтому они используются главным образом в схемах, целиком изготовленных по танталовой технологии.

Рений выделяется высокой тугоплавкостью - это второй после вольфрама металл по значению температуры плавления (3470 К), прецизионные резисторы на основе рения получаются проще, причем не требуется никаких дополнительных обработок.

Естественно, что ни Та, ни Re не удовлетворяют требованиям массового производства резисторов ввиду их высокой стоимости, дефицитности, сложной технологии напыления. Значительно большее распространение в качестве резистивных материалов получили сплавы металлов. По сравнению с чистыми

металлами они имеют, как было установлено выше, большее удельное сопротивление и меньший по абсолютному значению ТКЛР. Это сочетание обеспечивает их очевидные преимущества как резистивных материалов. Среди них первым в пленочном виде был получен нихром (80 % Ni, 20 % Cr). Нихром используют для получения только низкоомных резисторов R<20...50 кОм.

Повышенным удельным сопротивлением обладают сплавы, в которых образуются интерметаллические соединения, а среди них лучшие свойства имеют силициды. Известны силициды 60-ти металлов, но особенно высокое удельное сопротивление характерно для $CrSi_2$ и $FeSi_2$. Поэтому именно хром и железо наряду с кремнием являются основными компонентами резистивных силицидных сплавов. В технологии ГИС и микросборок часто приходится наносить на одну подложку группы резисторов, различающихся по номиналам сопротивлений. Задача расширения диапазона не решается только за счет геометрических размеров и приходится вводить новые материалы. При этом очень желательно, чтобы их физико-химическая природа была одной и той же. Силицидные сплавы предоставляют такую возможность: сейчас разработано около 15 типов таких материалов.

Кермет представляет собой оксидную матрицу, в которую погружены тонкодисперсные частицы хрома, причем элементный состав его тот же, что и силицидных сплавов (Cr, Si, O), но содержание кислорода в них выше. Кермет К-50С является оптимальным по большинству свойств и нашел широкое применение. Близость состава, свойств и методов получения силицидных сплавов и керметов позволяет рассматривать их как единую оксихромсилицидную группу резистивных материалов. Для низкоомного диапазона сопротивлении предпочтительны малоокисленные пленки — силициды хрома со стабилизирующими добавками, для высокоомного — кермет — композиция из хромсилицидного сплава и стекла.

1.3.6. Явление сверхпроводимости. Сверхпроводники

В 1908 г. голландским ученым Х.Каммерлинг-Оннесом был впервые получен жидкий гелий и появилась возможность исследовать материалы при такой низкой температуре, как 4,2 К. Одним из первых объектов стало удельное электрическое сопротивление. В то время было известно лишь то, что удельное

сопротивление металлов падает при понижении температуры, но существовала неопределенность относительно пределов этого падения. В принципе допускалась возможность любого из трех вариантов хода кривой в области температур, близких к абсолютному нулю (рис.1.10).

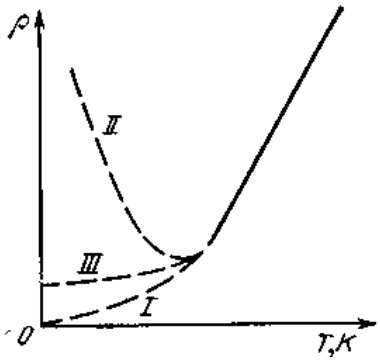


Рис. 1.10. Возможные варианты изменения удельного сопротивления металлов в области низких температур (до открытия сверхпроводимости):

I —снижение до нуля,

II —снижение до минимума с последующим повышением;

III — горизонтальный ход вплоть до 0 К

Первые эксперименты были проведены с платиной и золотом - в то время наиболее доступными металлами высокой чистоты. Оказалось, что их удельное сопротивление изменяется по кривой 3, то есть эти металлы обладают остаточным удельным сопротивлением. Было решено, что их чистота недостаточно высока, таким образом, оставалось место для гипотезы о том, что удельное сопротивление чистых металлов стремится к нулю. Для дальнейших экспериментов была выбрана ртуть как металл, легко поддающийся очистке методом многократной перегонки. При температуре 4,2 К сопротивление ртути не регистрировалось ни одним прибором (то есть падало до 0), но выяснилось, что падение удельного сопротивления происходило в интервале в несколько сотых долей Кельвинов, напоминало скорее скачок, нежели постепенное плавное снижение (рис.1.11). Это противоречило колебательной теории сопротивления. Ртуть перешла в новое состояние, которое, учитывая его исключительные свойства, можно было назвать сверхпроводящим.

Явление резкого скачкообразного падения сопротивления при температурах, близких к абсолютному нулю, получило название

сверхпроводимости. А температура $T_{кр}$, при которой происходит переход в сверхпроводящее состояние, называется критической температурой.

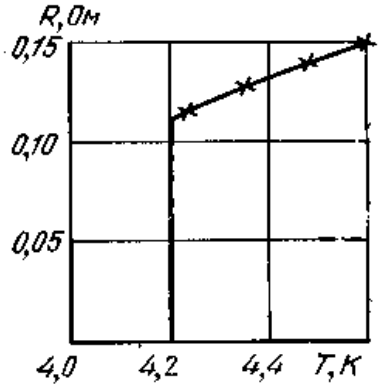


Рис. 1.11. Температурная зависимость сопротивления ртути в области низких температур (экспериментальная кривая, полученная Каммерлинг-Оннесом в 1911 г.)

Выяснилось далее, что чистота металла не имеет определяющего значения: сверхпроводниковыми свойствами обладают лишь немногие металлы, в остальных случаях не помогает и глубокая очистка — металл сохраняет остаточное удельное сопротивление.

Скачок сопротивления при переходе в новое состояние составляет, как минимум, 12 порядков, тогда как у обычных металлов он вообще отсутствует.

Поскольку зарегистрировать сверхпроводимость только по падению сопротивления трудно, особое значение приобретает эффект, обязательно сопровождающий переход в сверхпроводящее состояние — выталкивание магнитного поля из объема на поверхность сверхпроводника (эффект Мейснера) (рис. 1.12).

Сверхпроводник характеризуется тем, что у него $\mu = 0$ и $B = 0$. Сверхпроводящее состояние можно разрушить внешним магнитным полем, если его напряженность превысит некоторое критическое значение, различное для разных сверхпроводников.

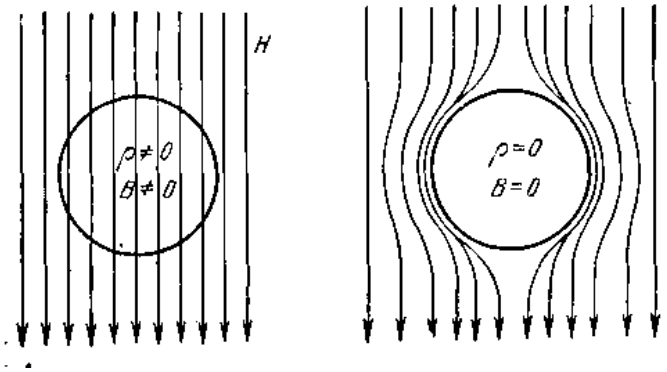


Рис. 1.12. Выталкивание магнитного поля из объема сверхпроводника (эффект Мейснера)

Плотность тока, протекающего через сверхпроводник, также ограничена критическим значением, выше которого материал переходит в обычное резистивное состояние. Это значение часто составляет 10^4 А/мм^2 при 4,2 К.

В течение 50 лет природа сверхпроводимости не была понятной. Только в 60-х годах благодаря работам Бардина, Купера, Шрифера была создана теория сверхпроводимости (БКШ-теория). Отправной точкой этой теории стала идея Купера об образовании пар электронов за счет их взаимодействия с участием фонона при криогенных температурах. Каждый электрон слегка поляризует кристалл. На какой-то другой электрон действует полное поле первого электрона и решетки. Но второй электрон тоже действует на кристалл и, поляризуя его, действует на первый электрон. Между ними возникает сила взаимного притяжения и образуются так называемые пары Купера. Движение электронов, связанных в пару, оказывается согласованным. Электроны образуют единый коллектив куперовских пар, при движении которых рассеяние становится энергетически невыгодным и пары, раз образовавшись, могут существовать годами.

Таким образом, квантовые процессы электрон-электронного взаимодействия при низких температурах дают совершенно новый эффект большей упорядоченности.

Верхний предел теории БКШ оценивается в 30...40 К, поэтому возможность создания высокотемпературных сверхпроводников считалась маловероятной. Существуют и другие теории сверхпроводимости, например возможен и экситонный механизм образования пар (экситон - в простейшем случае - пара электрон-дырка, связанная кулоновскими силами). Экситонный

механизм был положен в основу известной гипотезы Литтла о высокотемпературной сверхпроводимости в некоторых органических полимерах. Автор другой идеи — академик В. Я. Гинзбург — предложил структуры «сэндвич», состоящие из чередующихся тонких слоев диэлектрика и металла. Значительный вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли работы академика Н. Н. Боголюбова.

Сверхпроводниковыми свойствами обладают 26 металлов, еще 13 элементов проявляют сверхпроводящие свойства при высоких давлениях (среди них такие полупроводники как кремний, германий, сурьма, теллур). Наивысшим среди простых веществ значением температуры перехода в сверхпроводящее состояние обладает ниобий — 9,2 К.

Кроме чистых металлов сверхпроводимостью обладает ряд интерметаллических соединений и сплавов. В настоящее время известно около двух тысяч сверхпроводников. Среди них самые высокие критические температуры имеют сплавы и соединения ниобия (для сплава ниобия с германием температура перехода в сверхпроводящее состояние составляет 24 К). К ним относятся соединения Nb_3Me (Me - Al, Ge, Sn, La). Так, высокой критической температурой (20,7 К) отличается сплав $Nb_3Al_{0,75}Ge_{0,25}$, сложная кристаллическая структура которого благоприятна для образования пар.

Одной из главных задач науки постоянно оставалось повышение значения температуры перехода в сверхпроводящее состояние, однако прогресс, достигнутый за 75 лет, был очень небольшим и не был устойчиво преодолен даже водородный рубеж. Тот факт, что еще в 1973 г. сверхпроводимость была обнаружена в некоторых оксидных системах, остался недооцененным учеными, но именно на этом направлении состоялся главный прорыв. В конце 1986 г. Д. Беднорц и К. Мюллер впервые преодолели «неоновый» барьер, создав керамику на основе оксидов лантана, бария и меди. Полупроводниковая при обычных температурах керамика становилась сверхпроводником уже при 35 К.

Наиболее устойчивые результаты были затем получены на иттриево-бариево-медной керамике. Путем экспериментального подбора технологии обработки очень быстро, в течение лишь нескольких месяцев, был преодолен и «азотный» рубеж. Одновременно столь же успешно отодвигался магнитотоковый барьер, благодаря чему стали возможными технические устройства

на сверхпроводниках, работающие при охлаждении жидким азотом. Стала, по-видимому, близкой реальностью и «комнатная» сверхпроводимость.

Особенность новой керамики — слоистая структура типа перовскита, благоприятствующая существованию пар экситонного типа, наличие наряду с ионами Cu^{2+} еще и необычных ионов Cu^{3+} обмен зарядами между которыми обеспечивает сравнительно высокую электропроводность керамики уже при обычных температурах. Сверхпроводящую керамику можно получать в виде тонких и толстых пленок. Это открывает большие перспективы в применении сверхпроводников.

Важная область применения, где невозможно обойтись без сверхпроводников, — создание сверхсильных магнитных полей, требуемых в ядерных исследованиях. Сверхпроводящие соленоиды позволяют получать магнитные поля напряженностью свыше 10^7 А/м в достаточно большой области пространства. К тому же в сверхпроводящих системах циркулирует незатухающий ток, и не требуется внешний источник питания.

Широкое развитие получают электрические машины со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Также созданы сверхпроводящие трансформаторы, рассчитанные на высокий уровень мощности.

Разрабатываются сверхпроводящие линии электропередач, импульсные сверхпроводящие катушки, в радиотехнике – сверхпроводящие резонаторы.

Нарушение сверхпроводимости материала внешним магнитным полем используется в конструкции прибора, который называют криотроном. Из криотронов можно собрать любую схему памяти или переключения.

Вопросы для самопроверки по теме 1.3:

1. Как зависит от температуры удельное сопротивление металлов?
2. Что характеризует температурный коэффициент удельного сопротивления?
3. Какие проводниковые материалы называются сплавами?
4. Какое соотношение формулирует правило Матиссена?
5. Как соотносятся удельное сопротивление металла и сплава на его основе?
6. В каком соотношении находятся значения температурного коэффициента сопротивления металла и сплава на его основе?

7. Что означает понятие «размерный эффект» применительно к электрическим параметрам тонких пленок?

8. Что понимают под «сверхпроводимостью» материалов?

9. Что такое высокотемпературная и низкотемпературная сверхпроводимость?

10. Какие модели, описывающие явление сверхпроводимости, Вам известны?

1.4. Диэлектрические материалы

1.4.1. Основные свойства диэлектриков. Поляризация диэлектриков

Большинство химических соединений — ионных и молекулярных кристаллов — имеет высокое удельное электрическое сопротивление — более 10^7 Ом · м и является диэлектриками. Это материалы с шириной запрещенной зоны $E_g > 3$ эВ и, поскольку $E_g >> kT$, концентрация свободных электронов в них ниже 1 см $^{-3}$. Изоляционные функции диэлектрики выполняют потому, что они препятствуют протеканию тока в цепи. Однако этим их роль не исчерпывается, так как при малой толщине в направлении переменного тока диэлектрики не разрывают электрическую цепь — переменный ток течет через них необычным способом. Это происходит вследствие явлений поляризации, физического процесса, характерного только для класса диэлектрических материалов.

Поляризация - это процесс смещения связанных зарядов на ограниченное расстояние под действием внешнего электрического поля.

Если диэлектрик находится между электродами конденсатора, то смещение вызывает дополнительный переход электронов с положительной пластины на отрицательную при том же напряжении. В результате заряд конденсатора увеличивается в ε раз. Величина ε называется диэлектрической проницаемостью и отражает увеличение емкости конденсатора при замене в нем вакуума диэлектриком. Таким образом, емкость конденсатора с диэлектрическим материалом зависит от его способности поляризоваться

$$C_o = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon \cdot S}{d},$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}854\ 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная;

S - площадь пластин;

d - расстояние между пластинами.

Как видно из рис. 1.13, в диэлектрике создается внутреннее электрическое поле, направленное противоположно внешнему и ослабляющее его.

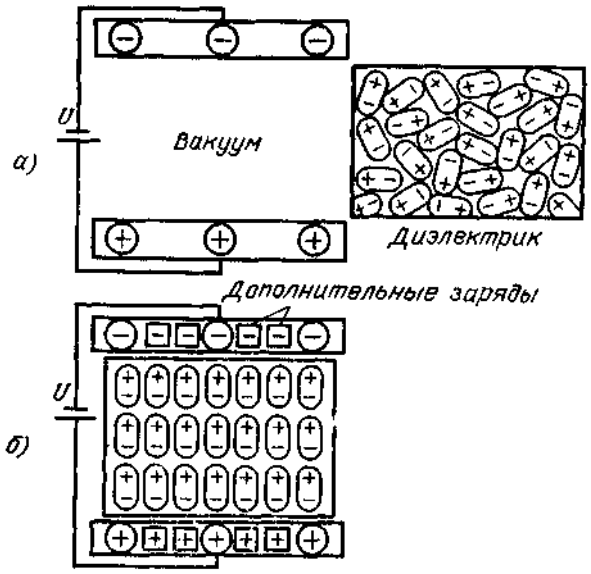


Рис. 1.13. Поляризация диэлектриков в электростатическом поле:

а - конденсатор, пространство между электродами которого вакуумировано,

б - конденсатор с диэлектриком

Поле внутри диэлектрика имеет конечное, не равное нулю, значение.

Способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \frac{C_д}{C_.},$$

где C_0 – емкость конденсатора, между обкладками которого вакуум.

Теперь данное выше определение диэлектриков как веществ, обладающих высоким удельным сопротивлением, можно дополнить: во-первых, диэлектрик — среда (не только твердая, но и жидкая, и газообразная), в которой может длительно существовать электрическое поле; во-вторых, диэлектрик — среда, проницаемая для электрического поля и способная поляризоваться.

Процесс поляризации наблюдается во всех без исключения диэлектриках. В зависимости от вида заряда, расстояния, на которое он способен перемещаться, времени, затрачиваемого на поляризацию, различают четыре ее механизма:

1. Электронная поляризация - смещение под действием поля электронного облака атомов, в результате чего центры масс отрицательных и положительных зарядов перестают совпадать, и каждый атом становится электрическим диполем (рис. 1.14, а).

Специфика этого вида поляризации — упругое смещение на очень малые расстояния частиц с предельно малой массой - обусловливает ее безинерционность (время установления электронной поляризации порядка 10^{-15} с), так что она успевает следовать за полем даже в области оптических частот.

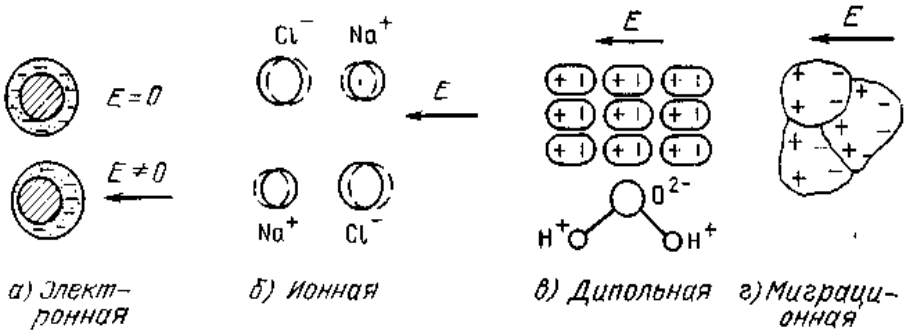


Рис.1.14. Схемы, поясняющие механизмы поляризации диэлектриков

Поэтому диэлектрическая проницаемость материалов, обладающих преимущественно электронной поляризацией, не зависит от частоты и практически не зависит от температуры.

Электронная поляризация происходит без потерь энергии на нагрев диэлектрика, то есть имеет чисто упругий характер. Значение диэлектрической проницаемости материалов, обладающих электронной поляризацией, обычно колеблется в пределах 2 ... 2,5.

2. Ионная поляризация вызывается упругим смещением ионов на небольшое в сравнении с параметром решетки расстояние и наблюдается в ионных твердых телах (рис. 1.14, б). Время установления ионной поляризации около 10^{-13} с, что обеспечивает ее независимость от частоты.

Эффект ионной поляризации перекрывает проявление электронной, которая, естественно, происходит и в этом случае, и типичное значение диэлектрической проницаемости для чисто ионных кристаллов составляет 5 ... 10 . Характерна она для стекол и керамик. Аномально высока диэлектрическая проницаемость у оксидов металлов, обладающих полупроводниковыми

свойствами, среди них особо выделяется оксид титана с диэлектрической проницаемостью, равной 120.

С повышением температуры смещение ионов облегчается, вследствие чего растет и диэлектрическая проницаемость. Это является важной особенностью диэлектриков с ионным строением — керамики и стекол — и должно учитываться при их использовании.

3. Дипольная (ориентационная) поляризация проявляется как ориентация под действием поля полярных молекул или групп атомов. Полярной является, например, молекула воды, расположение атомов водорода в которой несимметрично относительно атома кислорода (рис. 1.14, в). Полярны также многие полимеры, но их молекулы в целом не могут ориентироваться по полю из-за большой длины; для них типично смещение отдельных фрагментов.

На преодоление взаимодействия молекул и сил трения при ориентации диполей расходуется энергия поля, которая превращается в тепло (рассеивается). Следовательно, дипольная поляризация неупругая, релаксационная.

При нагревании материала подвижность молекул возрастает, но в твердых телах это сказывается на увеличении ε лишь при температурах, приближающихся к температуре плавления или размягчения. В жидкостях и полимерах может наблюдаться экстремальная температурная зависимость ε: при нагреве она сначала растет из-за ослабления связей между молекулами, а затем падает, так как превалирующее значение приобретает тепловое разупорядочивающее движение молекул, а не ориентирующее действие поля.

При увеличении частоты диэлектрическая проницаемость снижается, поскольку проявляется инерционность процесса ориентации.

Ионные кристаллы не обладают дипольной поляризацией, так как в них нет молекул. Но если материал содержит примеси, состоящие из полярных молекул, диэлектрические потери могут резко возрасти. Так бывает, например, когда полимер содержит в виде примесей остатки отвердителя. Влажность диэлектрика (особенно для пористых материалов) также может быть причиной повышенных потерь вследствие дипольной поляризации.

4. Миграционная поляризация — неупругое перемещение слабосвязанных примесных ионов на расстояния, превышающие параметр кристаллической решетки, часто до границ зерен (рис. 1.14, г). Ион примеси не

становится носителем, потому что он не может преодолеть границу зерна, но участвует в переносе тока при смене его полярности. Закономерности для поляризации по миграционному механизму те же, что и для дипольной.

Чтобы избежать потерь связанных с миграционной поляризацией, надо обращать внимание на отсутствие в материале пор, механических включений и примесей, прежде всего легкоподвижных ионов Na^+.

Анализируя пригодность какого-либо диэлектрика для тех или иных целей, необходимо прежде всего представлять себе, насколько он полярен. Как говорилось выше, строго неполярных диэлектриков практически не существует.

Очень слабо полярными являются многие высококачественные полимеры, по своему строению тоже неполярные, но все же содержащие некоторые количества примесей, повышающих значение диэлектрических потерь вследствие дипольной и миграционной поляризации.

Полупроводники - Ge, Si, GaAs - имеют диэлектрическую проницаемость в интервале значений 12 ... 15, уменьшающуюся по мере увеличения частоты.

1.4.2. Пьезоэлектрики

Поляризация под действием механических напряжений является особым механизмом поляризации.

Как известно, обязательным следствием напряжений в упругом теле является деформация, величина которой определяется модулем упругости. Лишь в сравнительно немногих кристаллах помимо деформации обнаруживается еще и поляризованность. Материалы, способные поляризоваться в отсутствие внешнего электрического поля под действием механических напряжений, называются пьезоэлектриками, а физическое явление, сопровождающее деформацию, - пьезоэффектом. Его причиной служит смещение положительных и отрицательных ионов или отдельных фрагментов молекул в кристаллах, не имеющих центра симметрии (рис. 1.15). Пьезоэффект в них можно вызвать не только чистым сжатием или растяжением, как показано на рисунке, но и изгибом, скручиванием, сдвигом.

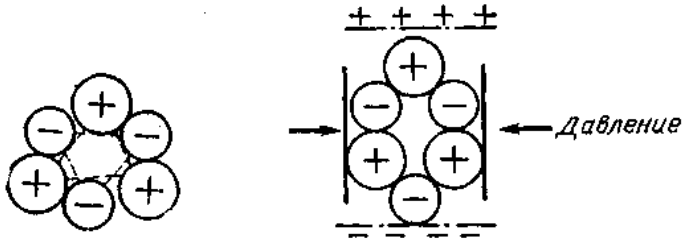


Рис.1.15. Возникновение прямого пьезоэффекта

Важная особенность пьезоэффекта, резко расширяющая области его практического применения, - обратимость, то есть свойство монокристаллических материалов деформироваться во внешнем электрическом поле. Схематично обратимость пьезоэффекта представлена на рис.1.16.

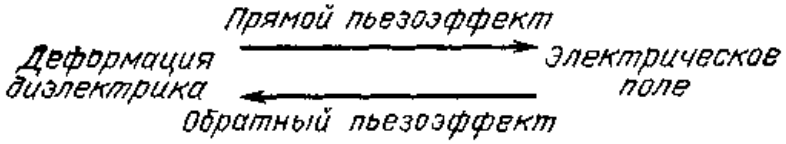


Рис.1.16. Схема возникновения прямого и обратного пьезоэффекта

Явление, сходное с обратным пьезоэффектом, - удлинение кристалла вследствие поляризации под действием электрического поля - наблюдается во всех без исключения диэлектриках и называется электрострикцией. Признаки, отличающие пьезоэффект от электрострикции: 1) линейная зависимость деформации от напряженности поля, тогда как при электрострикции эта зависимость квадратична; 2) электрострикция необратима, механические напряжения в материалах, не являющихся пьезоэлектриками, не приводят к поляризации; 3) электрострикционная деформация значительно меньше, чем пьезоэлектрическая.

Первым применением пьезоэлектриков была ультразвуковая подводная локация, основанная на том, что в результате обратного пьезоэффекта в воду излучаются механические колебания высокой частоты — ультразвук. Отраженные сигналы (звуковое эхо) принимаются другим кристаллом и преобразуются в электрический сигнал с помощью прямого пьезоэффекта. Пьезоэффект широко используется в бытовых приборах. Так, на прямом пьезоэффекте действуют источники высокого напряжения в зажигалках,

пьезозвукосниматели, пьезомикрофоны, датчики давления и перемещений. На обратном пьезоэффекте основано действие пьезотелефонов, пьезозвонков, пьезоэлектрических безобмоточных двигателей и микропозиционеров. В радиоэлектронике наибольшее значение имеют пьезоэлектрические преобразователи: резонаторы, излучатели, вибраторы, основным элементом которых являются детали простой формы (пластины, стержни, диски) из пьезоэлектрика с нанесенными на них контактами. Такие пьезопреобразователи выполняют в РЭА функции стабилизаторов частоты, высокоизбирательных фильтров, стандартов частоты.

В технике большое применение находят монокристаллы простых и сложных оксидов—кварц, ниобат и танталат лития ($LiNbO_3$ и $LiTaO_3$), а также пьезокерамика.

1.4.3. Спонтанная поляризация. Сегнетоэлектрики

Среди ионных полярных кристаллов есть такие, которые способны поляризоваться без каких-либо внешних воздействий, самопроизвольно, спонтанно. Такой диэлектрик можно представить цепочкой диполей, образование которых обусловлено несовпадением «центров тяжести» положительных и отрицательных ионов.

Сегнетоэлектриками называют вещества, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, которая существенно изменяется под влиянием внешних воздействий: электрического поля, упругих напряжений, изменения температуры и др.

Спонтанная поляризация, то есть наличие электрического дипольного момента в отсутствие внешнего электрического поля, обусловлена особенностями строения сегнетоэлектриков. В отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрики имеют доменную структуру. Домены представляют собой макроскопические области вещества, обладающие самопроизвольной поляризацией. Направления электрических моментов у разных доменов различны (рис. 1.17, а), поэтому поляризованность образца в целом равняется нулю.

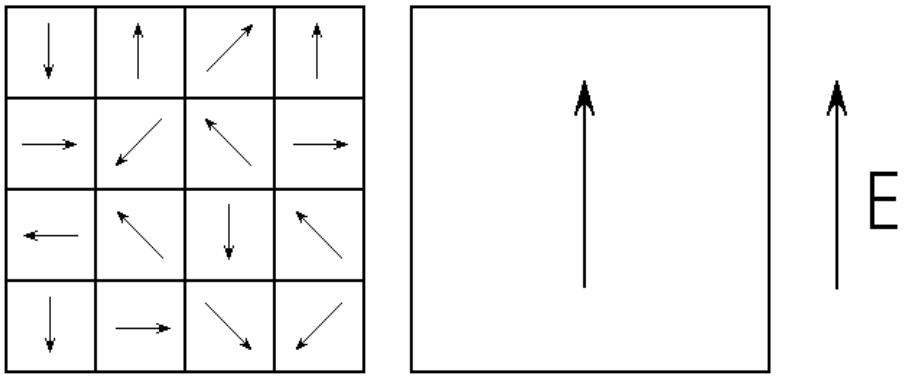


Рис. 1.17. Доменное строение сегнетоэлектрика в отсутствие внешнего электрического поля (а) и при приложении внешнего электрического поля напряженностью E (б)

Участок кривой OA соответствует процессу роста доменов, у которых вектор спонтанной поляризации образует наименьший угол с направлением поля. В точке A наступает состояние технического насыщения, поляризация достигает максимального значения P_{max}, все домены ориентируются по направлению поля. Кривую OA называют кривой заряда сегнетоэлектрического конденсатора.

Если в поляризованном до насыщения образце уменьшить напряженность поля до 0, то поляризация в 0 не обратится, а примет некоторое остаточное значение $P_{ост}$ (рис. 1.18). При воздействии полем противоположной полярности поляризация быстро уменьшается и при некоторой напряженности поля E_c (называемой коэрцитивной силой) обращается в ноль.

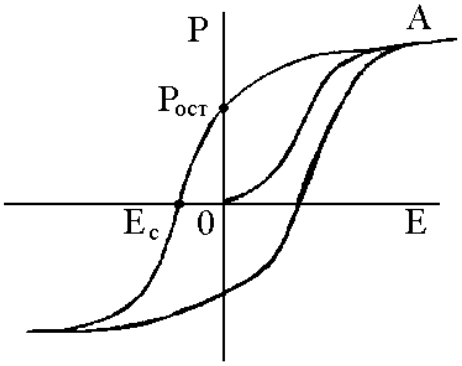


Рис. 1.18. Основная кривая поляризации сегнетоэлектрика (кривая OA) и петля диэлектрического гистерезиса

Так как наличие гистерезиса - это результат запаздывания поляризации по отношению к внешнему электрическому полю, то площадь, ограниченная петлей гистерезиса, пропорциональна потерям, связанным с затратами энергии электрического поля на ориентацию доменов.

Специфические свойства сегнетоэлектриков проявляются только в определенном интервале температур. При увеличении температуры усиливается тепловое движение и, как следствие, нарушается доменная структура. Таким образом происходит переход из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую. Температура, выше которой спонтанная поляризация исчезает, называется точкой Кюри. В точке Кюри диэлектрическая проницаемость достигает максимума.

В настоящее время известно несколько сотен соединений, обладающих свойствами сегнетоэлектриков. Наиболее известны среди них титанат бария $BaTiO_3$, титанат свинца $Pb\ TiO_3$, ниобат калия $KNbO_3$.

Температура перехода в спонтанно-поляризованное состояние (точка Кюри) для различных сегнетоэлектриков составляет от нескольких Кельвин (например, 15 К для $Pb_2Nb_2O_7$; 393 К для $BaTiO_3$) до полутора тысяч Кельвин (1483 К для $LiNbO_3$).

В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых считаются:

- изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью;

- использование материалов с большой нелинейностью поляризации как основы различных радиотехнических устройств (параметрических усилителей, низкочастотных усилителей мощности, умножителей частоты, стабилизаторов напряжения и др.) .

1.4.4. Электропроводность диэлектриков

К диэлектрикам относятся материалы с большой шириной запрещенной зоны, поэтому концентрация свободных электронов в них ничтожно мала.

Опыт показывает, что удельное сопротивление диэлектриков не бесконечно велико, и часто в них имеются значительные потери именно из-за протекания сквозных токов. В микросхемах расстояния между проводниками, находящимися под напряжением, очень малы (5 ... 10 мкм) и, несмотря на ма-

лые напряжения, токи утечки могут быть достаточными для появления паразитных сигналов. В СВЧ-устройствах потери в диэлектрике приводят к затуханию сигналов в линии, то есть также к утрате работоспособности.

Установлено, что причиной повышенной электропроводности диэлектриков является наличие в них подвижных ионов — носителей заряда.

Однозначно теоретически предсказать концентрацию ионов в диэлектриках нельзя из-за их различной природы и бесконечного разнообразия примесей и дефектов.

В электропроводности могут участвовать как собственные ионы (в солях, стеклах, керамике при повышенных температурах), так и ионы примеси. Поэтому ионная электропроводность наблюдается и в материалах, имеющих неионное строение, например, в полимерах.

Так же, как и в полупроводниках, различить собственную и примесную электропроводность в диэлектриках можно по виду ее температурной зависимости. Вклад различных примесей в электропроводность диэлектриков неравнозначен: наибольшее значение имеют легкоподвижные ионы. Ионная электропроводность осуществляется подобно диффузии - в простейшем случае перемещением ионов по вакантным узлам решетки. Отличие состоит лишь в движущей силе: при электропроводности это разность потенциалов, при диффузии - уменьшение химического потенциала, которое можно выразить через градиент концентраций. Поэтому существует связь между подвижностью ионов μ и коэффициентом диффузии D, определяемая соотношением Эйнштейна $\mu=eD/kT$.

Поскольку коэффициенты диффузии ионов при комнатной температуре очень малы (не более 10^{-15} см^2/с), их подвижность, вычисленная по соотношению Эйнштейна, оказывается низкой, порядка 10^{-14} см^2/(В·с). Подвижны только так называемые быстродиффундирующие примеси. Такими примесями во многих диэлектриках являются ионы Cu^+, Au^+, Ag^+, K^+, но особенно Na^+, H^+, легко проникающие через тонкие пленки уже при комнатных температурах, а при высоких температурах — и через стенки кварцевой аппаратуры.

Вследствие экспоненциального роста удельной проводимости изоляционные свойства диэлектриков резко ухудшаются с повышением температуры (рис.1.19).

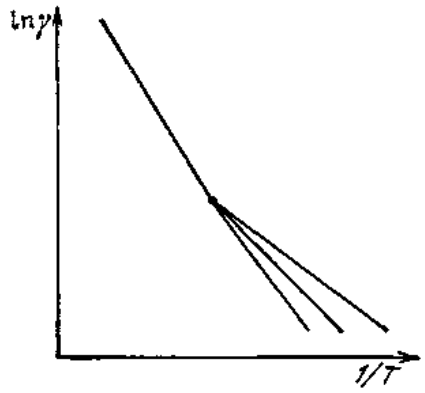


Рис. 1.19. Температурная зависимость электропроводности диэлектрика

Поскольку ионная электропроводность, в отличие от электронной, представляет собой перенос не только зарядов, но и вещества, в процессе длительной эксплуатации изменяется химический состав диэлектрика. Следствием этого может быть и постепенная деградация диэлектрика, и полное разрушение, особенно при воздействии постоянного электрического поля на тонкопленочные структуры. Поэтому в ответственных случаях, например в производстве ИС, чистоте, однородности и структуре диэлектрических пленок уделяют не меньшее внимание, чем качеству самого полупроводника.

Говоря об ионной электропроводности, мы рассматривали объем диэлектрика. Удельное объемное сопротивление – параметр, который при постоянной температуре не зависит от внешних условий.

В противоположность этому поверхностные слои диэлектрика способны активно взаимодействовать с окружающей средой. Поверхность ионных диэлектриков может быть сплошь покрыта тонкой пленкой адсорбированной воды.

Свойства адсорбционных слоев количественно охарактеризовать трудно, поскольку их толщина и удельное сопротивление не поддаются непосредственному измерению. Чтобы, не имея этих данных, количественно оценить состояние поверхности диэлектрика, используется тот же параметр, что был введен выше для проводниковых и резистивных пленок - удельное поверхностное сопротивление. Разница состоит в том, что связь между параметрами ρ_s и ρ_v в диэлектриках неопределенна, тогда как для проводников легко сделать пересчет, зная толщину пленки. Высокие значения удельного поверхностного сопротивления ρ_s во влажной атмосфере имеют только те

диэлектрики, поверхность которых обладает гидрофобными свойствами, то есть угол смачивания которых Θ>90°.

Измерения удельного поверхностного сопротивления диэлектриков преследуют цель оценить реальное состояние поверхности в зависимости либо от состояния окружающей атмосферы, либо от качества обработки поверхности. В частности, именно таким способом ведется контроль отмывки поверхности печатных плат после травления рисунка. Если поверхность слоистого пластика очищена от остатков реагентов — кислот и солей — недостаточно тщательно, удельное поверхностное сопротивление снижается примерно до 10^6 Ом, тогда как при выполнении всех необходимых требований его значение должно быть близким к удельному объемному сопротивлению, для стеклотекстолита - к 10^{14} Ом.

1.4.5. Потери в диэлектриках

Потери энергии в диэлектриках обусловлены протеканием в них двух видов активных токов: сквозного (объемного и поверхностного) и тока абсорбции. Из них второй представляет собой активную часть поляризационного тока, расходуемую при установлении дипольной и миграционной поляризации. Ток абсорбции протекает только при изменении напряженности, то есть при $dE/dt \neq 0$. Вследствие инерционности релаксационных видов поляризации токовое равновесие в диэлектрике устанавливается не сразу после подачи напряжения, так же как не сразу падает до нуля после отключения питания.

Количественной мерой потерь в данном диэлектрике служит тангенс угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta$. Определение $\mathrm{tg}\,\delta$ следует из векторной диаграммы (рис.1.20). В реальном диэлектрике, заключенном между двумя контактами, фазовый сдвиг φ между током и напряжением менее $\pi/2$. Таким образом, угол, дополняющий до прямого фазовый сдвиг между током и напряжением в емкостной цепи или, что то же, угол между вектором полного тока и его реактивной составляющей, называется углом диэлектрических потерь. Практическое значение $\mathrm{tg}\,\delta$ как одного из важнейших диэлектрических параметров материала состоит в том, что он определяет потери мощности

$$P_a = 2\pi f \cdot C \cdot U^2 \cdot tg\delta,$$

где $2\pi f$ - круговая частота;

U –напряжение в цепи, обладающей емкостью С.

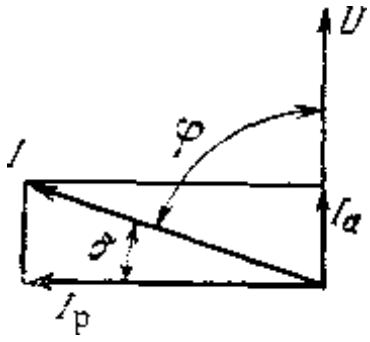


Рис.1.20. Векторная диаграмма токов и напряжений в диэлектрике

1.4.6. Электрическая прочность диэлектриков

Электрическая прочность — способность диэлектрика сохранять высокое удельное сопротивление в полях большой напряженности: $E_{пр} = U_{пр} / d$, где $U_{пр}$ - пробивное напряжение, то есть минимальное напряжение, приложенное к диэлектрику, приводящее к его пробою, d - толщина диэлектрика. Электрическая прочность материала может изменяться в зависимости от толщины диэлектрика и условий теплоотвода.

Вопросы для самопроверки по теме 1.4

1. Какие материалы принято относить к диэлектрикам?
2. Что такое «поляризация диэлектриков»?
3. Какие механизмы поляризации диэлектриков Вам известны?
4. Каковы причины наличия электропроводности у диэлектриков?
5. Чем обусловлены диэлектрические потери?Какое явление называют «пробоем диэлектрика»?
6. Какие механизмы электрического пробоя твердых диэлектриков Вам известны?
7. Какие материалы относятся к сегнетоэлектрикам?

8. Как связаны свойства сегнетоэлектриков с их кристаллохимическим строением?

9. С чем связано наличие у сегнетоэлектриков гистерезиса поляризационной кривой?

1.5. Радиоматериалы с магнитными свойствами

1.5.1. Общие сведения. Классификация материалов по магнитным свойствам

Магнитными называются материалы, которые применяются в технике с учетом их магнитных свойств и характеризуются способностью накапливать, хранить и трансформировать магнитную энергию.

Магнитные свойства вещества определяются его атомной структурой и зависят прежде всего от того, обладают ли атомы вещества постоянным магнитным моментом. Полюсы магнита не существуют раздельно, в отличие от раздельно существующих отрицательных и положительных электрических зарядов. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что магнетизм атома обусловлен тремя причинами:

1. Наличием у электрона спинового магнитного момента, который связан с соответствующим механическим моментом электрона.

2. Орбитальным движением электронов в атоме, создающим орбитальный магнитный момент, или в соответствии с современным представлением о строении атома — наличием магнитного момента пространственного движения электронного облака вокруг ядра.

3. Магнитным моментом атомного ядра, который создастся спиновыми моментами протонов и нейтронов.

Спиновый магнитный момент ядра составляет менее 10^{-3} спинового магнитного момента электрона, так как масса ядра значительно больше массы электрона, поэтому можно считать, что элементарными носителями магнитных моментов в веществах являются электроны.

В атоме, содержащем несколько электронов, результирующий спиновый магнитный момент определяется исходя из спиновых магнитных моментов отдельных электронов. Согласно принципу Паули в каждом квантовом состоянии могут находиться два электрона с противоположными спинами.

Результирующий спиновый момент таких спаренных электронов равен нулю. Если атом или ион содержит нечетное число электронов, то один из них окажется неспаренным, и атом в целом будет обладать постоянным магнитным моментом.

Полностью заполненные оболочки не дают результирующего спинового момента, так как в этом случае каждому спину одного направления в атомной оболочке соответствует спин, направленный антипараллельно, и суммарный магнитный момент, создаваемый такой парой электронов, равен нулю.

Помимо спинового орбитального магнитного момента электрон характеризуется орбитальным магнитным моментом, который возникает за счет протекания элементарного кругового тока, обусловленного вращением электронов по орбитам.

Из квантовой теории следует, что результирующий орбитальный магнитный момент, отличный от нуля, может наблюдаться лишь на некруговых орбитах.

Орбитальные и спиновые магнитные моменты отдельных электронов складываются в результирующие орбитальные спиновые моменты атомов.

Если поместить вещество во внешнее магнитное поле, то, взаимодействуя с полем, вещество будет намагничиваться.

Для характеристики магнитного состояния вещества используют следующие основные магнитные величины:

намагниченность M, А/м; магнитная восприимчивость χ; напряженность магнитного поля H, А/м

$$\overline{M} = \chi \cdot \overline{H} \quad .$$

Если магнитное поле создается соленоидом длиной l (м), с числом витков N, через который течет ток I, (А), то напряженность магнитного поля, А/м

$$H = N \cdot I / l \quad .$$

Магнитная индукция B, (Тл), характеризующая суммарное поле внутри материала

$$\overline{B} = \mu_0 (\overline{H} + \overline{M}) = \mu_0 (1 + \chi) \overline{H} = \mu_0 \mu \cdot \overline{H} \ ,$$

где μ_0 - магнитная постоянная, численно равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, характеризует магнитную проницаемость вакуума;

μ - относительная магнитная проницаемость вещества – безразмерная величина, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума.

Все вещества по магнитным свойствам делятся на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики, ферриты и различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости χ, а также по характеру ее зависимости от температуры и напряженности внешнего магнитного поля.

Диамагнетиками называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов. Для диамагнетиков магнитная восприимчивость отрицательна и имеет абсолютную величину порядка 10^{-5} , а магнитная проницаемость $\mu \approx 0{,}99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Диамагнетики выталкиваются из неоднородного магнитного поля.

К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Си, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Hg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Вещества, атомы которых имеют постоянные магнитные моменты, могут быть парамагнитными, антиферромагнитными или ферримагнитными в зависимости от характера взаимодействия между магнитными моментами атомов.

Парамагнетиками называются вещества, в которых взаимодействие между постоянными магнитными моментами атомов — элементарными магнитными диполями — мало, в результате чего при обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления (рис. 1.21, а) и суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, то есть материал оказывается намагниченным, однако при обычных полях и температурах намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение 10^{-5}….10^{-2}.

У парамагнетиков магнитная проницаемость близка к 1 и практически не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. С повышением температуры, при неизмененной напряженности поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул, и поэтому намагниченность M убывает. Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, A1, Cr, Mo, Mn, Pt, Pd .

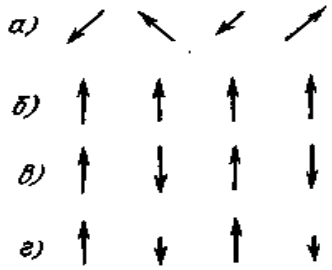


Рис.1.21. Схематическое изображение расположения спинов в парамагнитных (а), ферромагнитных (б), антиферромагнитных (в) и ферримагнитных (г) веществах

Ферромагнетиками называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что они выстраиваются параллельно друг другу (рис.1.21,б). Ферромагнетики в большинстве случаев имеют кристаллическую структуру и характеризуются большими положительными значениями χ (до сотен тысяч и миллионов) и сложной нелинейной зависимостью χ от температуры и внешнего магнитного поля. Характерная особенность ферромагнетиков — способность сильно намагничиваться даже при обычных температурах в слабых полях. При комнатной температуре ферромагнетизмом обладают три чистых металла: железо (Fe), никель (Ni) и кобальт (Co).

Антиферромагнетиками называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что они стремятся выстроиться антипараллельно друг другу (рис.1.21, в). В отсутствие внешнего магнитного поля энергетически выгодно антипараллельное расположение соседних спинов и имеет место взаимная компенсация магнитных моментов атомов.

Теоретическое обоснование явления антиферромагнетизма впервые было дано советским физиком Л. Д. Ландау в 1933 г. Французский физик Л. Неель

провел значительные исследования в этой области, поэтому теорию антиферромагнетизма и ферримагнетизма называют теорией Нееля.

Одно из основных положений теории Нееля сводится к тому, что кристаллическая решетка некоторых соединений рассматривается как сложная структура, состоящая из двух (и более) подрешеток, намагниченных противоположно друг другу.

Антиферромагнетикам свойственна специфическая температурная зависимость магнитной восприимчивости. Вблизи 0 К магнитные моменты подрешеток компенсируют друг друга и результирующий магнитный момент антиферромагнетика во внешнем поле равен нулю. По мере повышения температуры антипараллельное расположение спинов постепенно нарушается и магнитная восприимчивость возрастает, достигая максимума в точке Нееля (рис. 1.22), в которой упорядоченное расположение спинов полностью нарушается и антиферромагнетик становится парамагнетиком.

Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков мала и составляет порядка $10^{-5} \cdots 10^{-3}$. В слабых полях магнитная восприимчивость антиферромагнетиков практически не зависит от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных полях обычно является сложной функцией от напряженности магнитного поля.

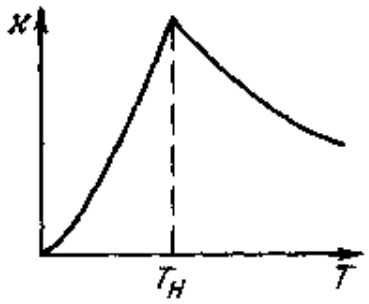


Рис.1.22. Зависимость магнитной восприимчивости антиферромагнетика от температуры

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы - Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn; многие окислы, хлориды, фториды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: MnO, $MnCI_2$, MnF_2, MnS_2 и другие, аналогично на основе Fe, Co, Ni, Cr.

Ферримагнетиками (или нескомпенсированными антиферромагнетиками) называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу (рис.1.21, г), однако величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой.

К ферримагнетикам относятся ферриты — соединения, которые могут иметь различную структуру кристаллической решетки типа шпинели, граната, каменной соли, гексагональную и другую. Ферриты со структурой типа шпинели представляют собой соединения окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов, структурная формула которых $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me - двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и другие). Применяются однокомпонентные ферриты, в которых ионы двухвалентного металла одинаковы, а также двух- и многокомпонентные.

Магнитные параметры ферритов в постоянных и низкочастотных магнитных полях ниже соответствующих параметров металлических магнитных материалов, поэтому ферриты получили практическое применение значительно позднее в связи с развитием ВЧ-техники.

Безусловные преимущества ферритов при работе в ВЧ-диапазоне объясняются тем, что их удельное электрическое сопротивление в $10^6 \ldots 10^{11}$ раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, так как они являются оксидными соединениями, а не металлами. По значению удельного электрического сопротивления они относятся к классу полупроводников или даже диэлектриков. Вследствие этого вихревые токи в ферритах при воздействии на них переменных магнитных полей очень малы и они применяются в качестве магнитного материала при частотах до сотен мегагерц.

1.5.2. Ферромагнитные материалы, их основные свойства. Магнитный гистерезис и основная кривая намагничивания

В ферромагнетиках группы железа основную роль в создании магнитного момента атома играет спиновый магнитный момент. В первом приближении магнитный момент атома определяется алгебраической суммой спиновых магнитных моментов электронов незаполненной оболочки. Так, в незаполненной электронной оболочке железа вместо десяти имеются только

шесть электронов, спины пяти из них направлены параллельно друг другу, а одного — антипараллельно.

Ферромагнетики характеризуются большими значениями магнитной проницаемости, а также сложной нелинейной зависимостью магнитной проницаемости μ от температуры, которая имеет максимум при достижении температуры Кюри (рис 1.23).

При температурах выше точки Кюри, определенной для каждого материала, происходит переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное состояние (рис. 1.23).

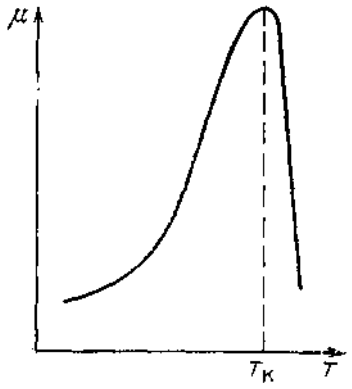


Рис. 1.23. Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от температуры

Точка Кюри чистого железа составляет 1043 К, никеля - 631 К, кобальта - 1404 К.

Для ферромагнетиков характерно также наличие гистерезиса (рис. 1.24), сущность которого состоит в том, что значение индукции В не однозначно определяется величиной магнитного поля Н, а зависит также от предшествующей истории образца, то есть от величины и направления магнитного поля, действовавшего на него раньше. Например, индукция в данном поле будет больше в том случае, если материал предварительно намагничивался до насыщения полем того же направления; в случае же, когда ранее действовавшее поле насыщения имело противоположное направление, индукция будет меньше.

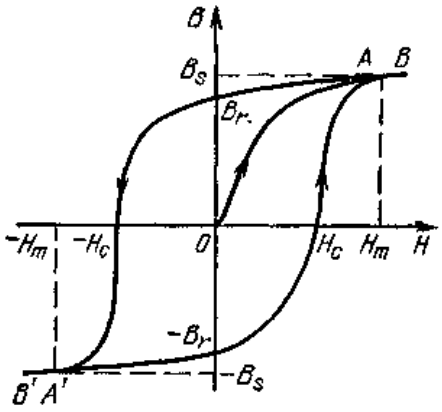


Рис.1.24. Кривая намагничивания (участок ОВ) и петля гистерезиса ферромагнитного материала

Магнитный гистерезис — отставание намагниченности ферромагнитного вещества от внешнего магнитного поля и вследствие этого неоднозначная зависимость намагниченности и магнитной индукции от напряженности внешнего магнитного поля.

Гистерезис обусловлен необратимостью процессов намагничивания, что приводит к рассеянию энергии и снижению качества тех намагничивающих устройств, где ферромагнитные материалы используются как сердечники (магнитопроводы). Однако такая необратимость и полезна, так как именно благодаря ей материал остается намагниченным после снятия намагничивающего поля, то есть ферромагнитный материал становится постоянным магнитом. Параллельное расположение спинов соседних атомов называют атомным ферромагнитным порядком, который характеризуется тем, что в отсутствие внешнего поля ферромагнетик находится в состоянии спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, которому соответствует намагниченность технического насыщения.

Объяснения ферромагнитных свойств материалов основаны на предположении, что спонтанная намагниченность обусловлена внутренним молекулярным полем, а внешне такая намагниченность не проявляется потому, что тело разбивается на отдельные макроскопические области — домены, в каждом из которых магнитные моменты атомов располагаются параллельно друг другу, то есть каждый домен находится в состоянии технического насыщения. Направления магнитных моментов всех доменов равновероятны (домены расположены друг относительно друга хаотично), внутри образца

образуются замкнутые магнитные цепочки, и результирующий магнитный момент ферромагнетика в целом оказывается равным нулю.

Форма петли гистерезиса для данного материала зависит от его исходного магнитного состояния, скорости перемагничивания и от максимальных значений напряженности магнитного поля. Для слабых магнитных полей петля гистерезиса имеет вид эллипса. С увеличением H возрастает ширина петли и изменяется ее форма, при этом может быть получено так называемое семейство симметричных петель гистерезиса. Петля гистерезиса, полученная при условии насыщения, называется предельной (рис. 1.24). При дальнейшем увеличении H ширина петли не изменяется и может иметь место лишь незначительный рост ее острых концов — безгистерезисных участков петли (отрезки AB и A'B' на рис. 1.24).

Геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса при различных значениях напряженности переменного магнитного поля называется основной кривой намагничивания (рис. 1.25).

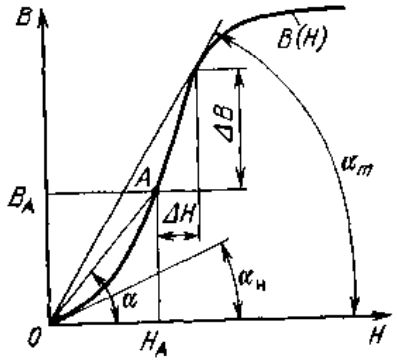


Рис.1.25. Основная кривая намагничивания

Таким образом, кривая намагничивания представляет собой зависимость магнитной индукции B (или намагниченности M) от напряженности магнитного поля H (рис. 1.25). Ход этой зависимости определяется не только свойствами материала и внешними условиями (напряженностью поля, температурой, наличием или отсутствием механических напряжений), но и предшествующим магнитным состоянием. Обычно кривые намагничивания определяют на размагниченных образцах, в которых при отсутствии внешнего поля векторы магнитных моментов доменов расположены равновероятно.

Магнитная проницаемость характеризует способность вещества изменять свою магнитную индукцию B при воздействии магнитного поля H. По основной кривой намагничивания определяется магнитная проницаемость, например, для точки A (рис. 1.25.)

$$\mu = \frac{1}{\mu_0}\frac{B_A}{H_A} = \frac{1}{\mu_0}\frac{m_B}{m_H}tg\alpha \quad ,$$

где α — угол наклона секущей OA к оси абсцисс, m_B и m_H - масштабы по осям B и H соответственно.

Основная кривая намагничивания и соответственно зависимость $\mu(H)$ могут быть разделены на четыре области в соответствии с возможным различием процессов намагничивания при увеличении напряженности намагничивающего поля (рис.1.26).

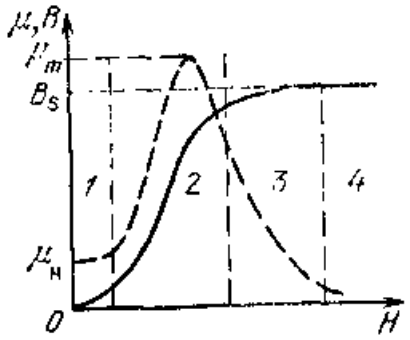


Рис.1.26. Основная кривая намагничивания B(H) и кривая зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля ферромагнитного материала: 1 - область самых слабых полей, 2 - область слабых полей, 3 - область полей средней напряженности, 4 - область сильных полей

Область 1 - область самых слабых полей. Характеризуется обратимым смещением границ доменов в магнитном поле и линейной зависимостью B(H).

Под действием внешнего поля граничные слои между соседними доменами смещаются таким образом, что размеры доменов, намагниченность которых составляет наименьшие углы с направлением поля, а следовательно, энергетически «выгодно» ориентированных но отношению к полю, растут за счет других доменов (рис. 1.27).

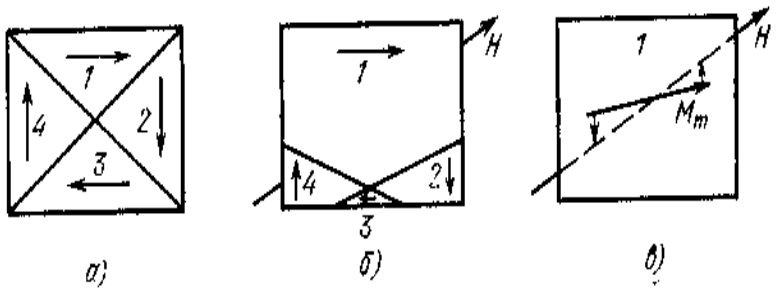


Рис.1.27. Схема процессов, протекающих при намагничивании:

а — исходное состояние при Н = 0, когда в кристалле имеются четыре домена с различно направленными векторами спонтанной намагниченности доменов (указаны стрелками); б — смещение границ доменов при воздействии внешнего магнитного поля (рост объема домена 1, благоприятно ориентированного относительно поля Н); в — вращение вектора намагниченности М при дальнейшем увеличении магнитного поля

При обратимых процессах уменьшение напряженности внешнего ноля приводит к смещению границ в обратном направлении, а при Н = 0 границы занимают свои исходные положения и В = 0. Магнитная проницаемость в этой области называется начальной и имеет постоянное значение

$$\mu_H = \frac{1}{\mu_0} \frac{m_B}{m_H} tg\alpha_H \quad .$$

Область 2 - область необратимого смещения границ доменов. Характеризуется наиболее сильной зависимостью В(Н), а μ проходит через максимум

$$\mu_H = \frac{1}{\mu_0} \frac{m_B}{m_H} tg\alpha_m \quad .$$

При необратимых процессах смещения границ доменов уменьшение напряженности внешнего поля до нуля не возвращает границы доменов в исходное положение, т. е. при Н = 0 В≠0 вследствие остаточной намагниченности.

При смещении границ размеры доменов, энергетически «выгодно» ориентированных по отношению к полю, увеличиваются за счет «невыгодно» ориентированных доменов так, что уже не возвращаются в свое исходное

положение при уменьшении напряженности поля, то есть происходит процесс необратимого смещения границ доменов.

Размеры доменов, их форма и энергия граничных слоев зависят от малейших структурных неоднородностей кристаллической решетки ферромагнетика. Наличие дефектов (атомов примесей, вакансий в узлах решетки, микропор, дислокаций и т. п.) затрудняет процесс намагничивания образца и способствует его необратимости.

Область 3 — область вращения вектора намагниченности. Процесс вращения состоит в повороте вектора намагниченности доменов в направлении поля H (рис. 1.27, в) и характеризуется приближением намагниченности к техническому насыщению, при котором векторы самопроизвольной намагниченности доменов ориентируются параллельно внешнему полю, магнитная индукция B приближается к максимальному значению Bs, и μ уменьшается, приближаясь к единице.

Область 4 — область насыщения. В этой области значения B практически не зависят от H. При дальнейшем повышении напряженности имеет место парапроцесс, который в большинстве случаев дает малый прирост намагниченности, поэтому практически процесс намагничивания считают законченным при достижении технического насыщения.

Парапроцесс — возрастание самопроизвольной намагниченности доменов под действием внешнего магнитного поля. Этот процесс является завершающим этапом намагничивания ферро- и ферримагнетиков, в результате которого намагниченность приближается к намагниченности, которую имел бы ферромагнетик при T = 0 K.

Из изложенного очевидно, что при намагничивании под действием внешнего магнитного поля происходит изменение доменной структуры образца вплоть до ее исчезновения при полях, соответствующих насыщению образца.

1.5.3. Материалы для высоких и сверхвысоких частот. Ферриты

Ферримагнетиками называются вещества, в которых магнитные моменты атомов выстраиваются антипараллельно друг другу, причем величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой (↑↓↑↓↑↓).

К ферримагнетикам относятся ферриты. Наиболее распространенными являются соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов, структурная формула таких соединений $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me - двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu и др.).

Магнитные параметры ферритов (магнитная проницаемость μ , индукция насыщения $B_{нас}$) в постоянных и низкочастотных полях ниже соответствующих параметров металлических магнитных материалов. Зависимость магнитной проницаемости ферритов от напряженности магнитного поля на различных частотах представлена на рис.1.28.

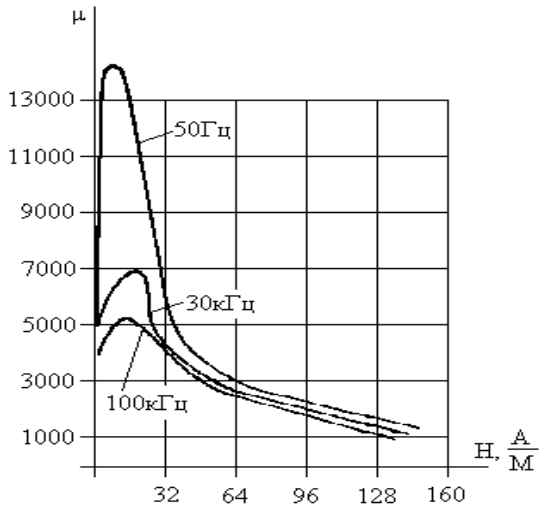


Рис 1.28. Зависимость магнитной проницаемости ферритов от напряженности магнитного поля на различных частотах

Удельное электрическое сопротивление большинства ферритов в 10^6 … 10^{11} раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, что обеспечивает безусловные преимущества ферритов при работе в высокочастотном диапазоне. Вследствие этого вихревые токи в ферритах при воздействии на них переменных магнитных полей очень малы, и ферриты применяются в качестве магнитных материалов при частотах до сотен мегагерц.

Для ферримагнетиков, как и для ферромагнетиков, характерно наличие доменной структуры, и их магнитные свойства тесно связаны со строением кристаллических решеток. Так, препятствиями, мешающими свободному перемещению доменных границ при воздействии на феррит слабого магнитного поля, являются микроскопические поры, примесные включения,

участки с дефектной кристаллической структурой. Устранение этих структурных барьеров позволяет существенно повысить магнитную проницаемость материала.

Большое влияние на значение начальной магнитной проницаемости оказывает размер кристаллических зерен. Марганец-цинковые ферриты с крупнозернистой структурой могут обладать начальной магнитной проницаемостью до 20000. Это значение близко величине начальной магнитной проницаемости для лучших марок пермаллоя.

Инерционность смещения доменных границ, проявляющаяся при высоких частотах, приводит не только к росту магнитных потерь, но и к снижению магнитной проницаемости μ. Частоту $f_{гр}$, при которой начальная магнитная проницаемость уменьшается до 0,7 от ее значения в постоянном магнитном поле, называют граничной.

Марганец-цинковые ферриты имеют сравнительно малое значение удельного электрического сопротивления ($\rho \approx 0{,}01 \ldots 10$ Ом · м) и применяются на частотах до 1 МГц; никель-цинковые ферриты имеют $\rho \approx 10^4$ Ом · м, применяются и как низкочастотные, и как высокочастотные (до 100 МГц).

Вопросы для самопроверки по теме 1.5:

1. Как происходит намагничивание ферромагнетика?
2. Что представляет собой основная кривая намагничивания материала?
3. Как влияет напряженность внешнего магнитного поля на статическую магнитную проницаемость ферромагнетика?
4. Как зависит индукция насыщения ферромагнетика от температуры окружающей среды?
5. Какие свойства ферритов обусловливают их применение в СВЧ-технике?
6. Чем отличаются ферромагнетики от ферримагнетиков?

1.6. Основные конструкционные материалы РЭС

1.6.1. Металлические конструкционные материалы

Материалы, применяемые при производстве изделий электронной и микроэлектронной техники, условно разделяют на две группы: конструкционные материалы и радиоматериалы.

Выбор материала детали конструкции РЭА обусловливается ее назначением, формой и размером, техническими требованиями к конструкции, состоянием исходного материала, видом обработки и типом производства.

В качестве конструкционных в радиоэлектронике и микроэлектронике используются как металлические конструкционные материалы (металлы и сплавы), так и неметаллические (пластмассы, керамика, резины и т.д.).

Для изготовления деталей радиоэлектронной аппаратуры в качестве металлических конструкционных материалов применяют, главным образом алюминий, медь, железо, цинк и сплавы на их основе.

Широкое применение находят в радиоэлектронике стали (сплав железо-углерод с содержанием углерода до 2,14%), особенно в группе стационарной и передвижной аппаратуры, к которым не предъявляются жесткие требования в отношении массы. При этом используются как углеродистые, так и легированные марки сталей. Стали конструкционные углеродистые применяют для деталей, имеющих ответственное назначение: оси, втулки, детали механизмов управления, переключателей. Конструкционные легированные стали применяют для деталей, требующих повышенной прочности.

Замена конструкционных углеродистых сталей титановыми сплавами позволяет снизить массу деталей более чем в 2 раза.

В производстве РЭА большое значение имеет алюминий и его сплавы. Чистый алюминий широко применяется в конденсаторном производстве, он имеет высокую коррозионную стойкость, а его поверхность всегда защищена беспористой плотной пленкой оксида. Для изготовления деталей применяют сплавы алюминия с другими элементами, наиболее распространены сплавы алюминий-медь и алюминий-кремний. Эти сплавы в основном используются для изготовления дополнительных и вспомогательных деталей РЭ: каркасы, стойки, корпуса, шкафы, передние панели, экраны.

Близки по свойствам к алюминиевым сплавам сплавы на основе магния, но они отличаются меньшей плотностью и хорошей обрабатываемостью резанием.

Сплавы меди с цинком называют латунями, а меди с оловом или алюминием - бронзами. Латуни являются незаменимым материалом для многих деталей - наконечников, лепестков, контактов, осей, втулок, крепежных деталей. Бронзы, вследствие высокой их упругости, применяют для изготовления витых и плоских пружин, контактных пружин, лепестков и других деталей.

Свойства многих сплавов чувствительны к действию повышенных температур. Термическая обработка приводит к упрочнению титана, сплавов на основе алюминия, стали. В результате специальной термической обработки сплава высокого сопротивления манганина получают материал, сопротивление которого практически не зависит от температуры и имеет высокую временную стабильность сопротивления.

1.6.2. Неметаллические конструкционные материалы

Неметаллические материалы представляют собой большую группу материалов и широко используются в конструкциях РЭА. В первую очередь к ним относятся пластмассы. Из пластмасс можно изготавливать детали несущих конструкций, детали, выполняющие функции несущих конструкций и диэлектриков, а также детали, к которым предъявляются только высокие диэлектрические требования. К первой группе относят футляры, крышки, каркасы, ручки управления, держатели, планки и т.д. От таких деталей требуются главным образом высокие механические и технологические свойства. Ко второй группе относятся детали, от которых наряду с высокими механическими свойствами требуются и высокие диэлектрические свойства. Из них изготавливают каркасы трансформаторов, изоляционные основания, в частности печатные платы, детали переключателей и электрические разъемы. К третьей группе относятся детали, от которых требуются высокие диэлектрические свойства, например, детали антенных и передающих устройств.

Конструкционные пластмассы без наполнителей - это полиэтилен, поливинилхлорид, полиамиды, полиуретаны, капрон, винипласт, фторопласт. Полиуретаны используют как герметизирующие материалы, а также для

деталей, длительно работающих при высоких температурах или в условиях влажного климата. Для облегчения массы многих измерительных приборов используют корпуса из винипласта или полиуретана. Фторопласт используется как диэлектрическое основание для печатных плат устройств, работающих в высокочастотном и СВЧ –диапазонах.

Применение композиционных пластмасс (пластмасс с наполнителем) в радиоэлектронике в качестве конструкционных материалов очень широко: из них изготавливают корпуса приборов, панели, щитки, штепсельные разъемы. Композиционные пластмассы состоят из связующего вещества (искусственных смол) и наполнителя (каолина, талька, асбестового или стеклянного волокна). Наполнитель улучшает механические характеристики изделия, а в ряде случаев и электрические характеристики диэлектрика. В качестве связующего вещества используют фенолформальдегидные, анилиноформальдегидные, карбамидоформальдегидные, кремнийорганические и другие смолы.

Ряд диэлектрических материалов выполняет конструкционные функции, являясь основой монтажных плат РЭА.

Печатные платы являются типовыми несущими конструкциями современной электронной аппаратуры. Печатная плата представляет собой слоистую структуру, в состав которой входит диэлектрическое основание и печатные проводники (медная фольга). Основания печатных плат изготавливают из слоистых пластиков - композиций, состоящих из волокнистого листового наполнителя – (бумаги, ткани, стеклоткани), пропитанных и склеенных между собой различными полимерными связующими. В настоящее время наиболее широко используется стеклотекстолит, в качестве наполнителя в нем применяется стеклоткань. Стеклотекстолит обладает высокой механической прочностью, теплостойкостью, износоустойчивостью, стабильностью размеров, а также минимальным влагопоглощением, благодаря чему его электрические свойства остаются высокими даже во влажной среде. К слоистым пластикам также относятся гетинакс (наполнитель – прессованная бумага) и текстолит (наполнитель – ткань).

К числу неметаллических конструкционных материалов относятся также стекла, ситаллы и керамика. Установочную керамику применяют для изготовления разного рода изоляторов и конструкционных деталей: опорных, проходных, подвесных, антенных изоляторов радиоустройств, подложек

интегральных микросхем, ламповых панелей, оснований электрических печей, корпусов резисторов.

Установочные ситаллы широко используются в качестве подложек гибридных интегральных схем и дискретных пассивных элементов, например для резистивных сборок.

Вопросы для самопроверки по теме 1.6:

1. Какие материалы применяются для изготовления диэлектрических оснований печатных плат?
2. Какие требования предъявляются к материалам оснований печатных плат, предназначенных для работы в СВЧ-диапазоне?
3. Что представляют собой слоистые пластики, применяемые для изготовления диэлектрических оснований печатных плат?
4. Какие слоистые пластики Вам известны?
5. Какие связующие применяются при изготовлении гетинакса, текстолита и стеклотекстолита?
6. Какие диэлектрические наполнители входят в состав гетинакса, текстолита и стеклотекстолита?

Раздел 2. РАДИОКОМПОНЕНТЫ

Более подробная информация по данному разделу содержится в [2], [3] и [5] .

В разделе рассматриваются пять тем:

1. Линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты.
2. Электрические конденсаторы.
3. Резисторы.
4. Пассивные микросборки
5. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки.

При работе с теоретическим материалом после изучения каждой темы следует ответить на вопросы, приведенные в конце ее изложения, после чего выполнить соответствующий тренировочный тест.

После проработки теоретического материала раздела 2 следует решить задачи № 3 и № 4 контрольной работы и выполнить лабораторные работы по указанию преподавателя.

Изучение раздела заканчивается контрольным мероприятием: необходимо ответить на вопросы контрольных тестов №№ 7-11. Максимальное количество баллов, которые Вы можете получить по данному разделу, без учета лабораторных работ, составляет 35 баллов: 20 баллов за тестирование и 15 баллов за решение двух задач контрольной работы.

2.1. Линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты

Основные параметры. Вольт-амперные характеристики линейного и нелинейного элемента при подаче постоянного и переменного напряжений.

Более подробно перечисленные вопросы изложены в учебном пособии, входящем в состав данного учебно-методического комплекса, см. [2], с. 4 … 11.

Вопросы для самопроверки по теме 2.1:

1. Какие компоненты относятся к пассивным?
2. Каково основное назначение пассивных радиокомпонентов?
3. Перечислите основные классификационные признаки электронных компонентов.
4. Что такое нелинейные активные сопротивления?
5. Какой вид имеет ВАХ нелинейного активного элемента?
6. Что такое линейная цепь?
7. Возможно ли использование резистивных нелинейных элементов для усиления электрических сигналов?
8. Каков отклик линейной системы с постоянными параметрами на гармоническое воздействие?
9. Какое значение имеют дискретные радиоэлементы в современном приборостроении?
10. Как, в виде каких элементов реализуются большие значения емкостей в интегральной электронике?
11. Каковы основные преимущества дискретных пассивных компонентов по сравнению с интегральными?

2.2. Электрические конденсаторы

Рассматриваются основные параметры электрических конденсаторов, их типономиналы, модели и эксплуатационные характеристики, а также основные принципы обозначения (маркировки) отечественных и зарубежных конденсаторов.

Более подробно перечисленные вопросы изложены в учебном пособии, входящем в состав данного учебно-методического комплекса, см. [2], с. 12 … 45.

Вопросы для самопроверки по теме 2.2:

1. Какие эксплуатационные параметры конденсаторов постоянной емкости Вам известны ?
2. Какие основные типы диэлектриков используются в конденсаторостроении?
3. Конденсаторы каких типов содержат неорганические диэлектрики?
4. Какие параметры конструкции конденсатора определяют его емкость?
5. Какие параметры конструкции конденсатора определяют его тангенс угла диэлектрических потерь?
6. За счет чего обеспечиваются высокие удельные параметры конденсаторов с оксидным диэлектриком?

2.3. Резисторы

Рассматриваются основные параметры резисторов, их типономиналы, модели и эксплуатационные характеристики, а также основные принципы обозначения (маркировки) отечественных и зарубежных резисторов.

Более подробно перечисленные вопросы изложены в учебном пособии, входящем в состав данного учебно-методического комплекса, см. [2], с. 46… 86, а также в [5], с. 203 … 238.

Вопросы для самопроверки по теме 2.3:

1. Какие эксплуатационные параметры постоянных резисторов Вам известны?
2. Как влияет структура материала варистора на его вольт-амперную характеристику?
3. Какова причина нелинейности вольт-амперной характеристики варистора?
4. Какова природа позисторного эффекта?
5. В чем состоит основное различие параметров позистора и традиционного терморезистора?
6. Каковы преимущества непроволочных резисторов по сравнению с проволочными?

2.4. Пассивные микросборки

Микросборки. Тонкопленочные микросборки. Толстопленочные микросборки. Материалы и технология.

Более подробно перечисленные вопросы изложены в учебном пособии, входящем в состав данного учебно-методического комплекса, см. [2], с. 93 … 103.

Вопросы для самопроверки по теме 2.4:

1. Какие виды технологии используются для изготовления пассивных микросборок?
2. Какова область применения пассивных микросборок?
3. Какими методами осуществляется подгонка толстопленочных резисторов?
4. Какие материалы подложек используются при изготовлении пассивных микросборок?
5. Что представляет собой метод трафаретной печати? В каких технологических процессах этот метод используется?

6. Функции каких электрорадиоэлементов могут быть реализованы в единой микросборке?

2.5. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, линии задержки

Рассматриваются основные параметры катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов и линий задержки. Описаны их типономиналы, модели и эксплуатационные характеристики, а также основные принципы обозначения (маркировки) соответствующих отечественных и зарубежных изделий.

Более подробно перечисленные вопросы изложены в [5], с. 306 … 325.

Вопросы для самопроверки по теме 2.5:

1. Что собой представляют дроссели?
2. Какие существуют типы катушек индуктивности ?
3. От каких факторов зависит индуктивность катушки?
4. Какие основные функции выполняют катушки индуктивности в электрических схемах?
5. Для каких целей применяются в электрических цепях импульсные катушки индуктивности?

Заключение

Современные тенденции развития электронного материаловедения и совершенствования элементной базы электронной техники.

Более подробно перечисленные вопросы изложены в [4] , с. 3… 11.

3.3. Учебное пособие

В состав данного УМК входит учебное пособие [2], в котором подробно излагаются вопросы, составляющие содержание раздела 2 данной дисциплины.

3.4. Глоссарий (краткий словарь основных терминов и положений)

АБСОРБЦИОННЫЙ ТОК – поляризационный ток в диэлектрике, обусловленный замедленными видами поляризации, характерными для многих технических диэлектриков.

АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ – диэлектрики, свойствами которых можно управлять за счет внешних энергетических воздействий.

АКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ – компоненты, способные усиливать, генерировать или преобразовывать входной электрический сигнал, в том числе электронные лампы, транзисторы, интегральные микросхемы и другие полупроводниковые приборы.

АКЦЕПТОРНАЯ ПРИМЕСЬ – вводимая в полупроводник электрически активная примесь химического элемента с валентностью ниже, чем у атомов основы.

АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ – вещества, в которых магнитные моменты атомов стремятся выстроиться антипараллельно друг другу.

БЛИЖНИЙ ПОРЯДОК – закономерное расположение ближайших соседей относительно каждого атома.

ВАКАНСИЯ – вид дефекта кристаллической решетки – незанятые атомами узлы кристаллической решетки.

ВАРИСТОРЫ – полупроводниковые резисторы, сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.

ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – одновременное испускание согласованных по частоте и направлению электромагнитных волн (фотонов) под действием внешнего электромагнитного поля.

ВЫРОЖДЕННОЕ СОСТОЯНИЕ – состояние, при котором средняя энергия электронного газа практически не зависит от температуры.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПАР – процесс одновременного образования пары свободных носителей электрического заряда (электрона и дырки).

ГЕТЕРОПЕРЕХОД – контакт двух полупроводников с различной шириной запрещенной зоны.

ГЕТЕРОСТРУКТУРА – переход, образованный двумя полупроводниковыми материалами, имеющими практически одинаковые постоянные кристаллической решетки и разные ширину запрещенной зоны, сродство к электрону, диэлектрическую проницаемость и другие свойства.

ДИАМАГНЕТИКИ – вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация орбитальных и спиновых магнитных моментов.

ДИСЛОКАЦИЯ – один из видов линейных дефектов кристаллической решетки, который представляет собой смещение атомных плоскостей.

ДИФФУЗИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ – легирование полупроводника с использованием диффузионных процессов.

ДИЭЛЕКТРИКИ – материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Условно к диэлектрикам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho > 10^8$ Ом · м.

ДОНОРНАЯ ПРИМЕСЬ – вводимая в полупроводник электрически активная примесь химического элемента с валентностью выше, чем у атомов основы.

ДЫРКА – положительно заряженная «частица», которая образуется в валентной зоне при переходе электрона в зону проводимости.

ЕМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРА - величина, численно равная заряду q одной из обкладок при разности потенциалов между ними U, равной единице:

$$C = \frac{q}{U}.$$

ЖЕСТКОСТЬ МАТЕРИАЛА – способность сопротивляться деформации.

ЗАПРЕЩЕННАЯ ЗОНА – интервал энергий, которыми не могут обладать электроны.

ЗОННАЯ ТЕОРИЯ – теория валентных электронов, движущихся в усредненном поле кристаллической решетки.

ИОНИСТОРЫ – конденсаторы, емкость которых реализуется без участия диэлектрика. Роль диэлектрика выполняет двойной электрический слой (ДЭС) молекулярной толщины, формируемый на границе двух фаз.

ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ – легирование полупроводника с использованием ионной имплантации.

ИОННЫЕ СУПЕРПРОВОДНИКИ – вещества, обладающие в твердом состоянии высокой ионной проводимостью, сравнимой с проводимостью жидких электролитов.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ РЕЗИСТОРЫ – резисторы, токопроводящий слой которых представляет собой композицию проводящего углерода (сажа или графит) и органического или неорганического связующего.

КОНДЕНСАТОР – устройство, способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды.

КОЭРЦЕТИВНАЯ СИЛА – напряженность магнитного поля, необходимая для уменьшения магнитной индукции до нуля.

КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ ПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА – отношение длины резистивного слоя к его ширине.

КРИСТАЛЛ – твердое тело, имеющее трехмерное периодическое пространственное расположение микрочастиц и приобретающее вследствие этого при определенных условиях роста форму многогранника. Кристалл обладает дальним порядком.

КРИСТАЛЛИТЫ (ЗЕРНА) – совокупность мелких кристаллов с искаженной структурой, не являющихся единичными и образующимися в стесненных условиях.

ЛАЗЕР – источник оптического когерентного излучения, характеризующийся высокой направленностью и большой плотностью энергий.

ЛЕГИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКА – процесс направленного введения примесей в полупроводник с целью получения полупроводников с заданным типом электропроводности.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ – электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. При люминесценции акты возбуждения и излучения света разделены во времени, что определяет достаточно длительное время свечения вещества после прекращения возбуждения.

ЛЮМИНОФОРЫ – вещества, способные люминесцировать.

МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗИСТОРЫ – резисторы, токонесущей частью в которых являются гетерогенные металлодиэлектрические пленки (керметы).

МЕТАЛЛООКСИДНЫЕ РЕЗИСТОРЫ – это резисторы, токонесущая часть которых выполнена на основе окиснометаллических пленок (главным образом, пленок на основе оксида олова SnO_2).

МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ – резисторы, токонесущий слой которых выполнен из сплава или металла (тантала, нихрома и др.).

НОМИНАЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ - емкость, значение которой указано на конденсаторе.

НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ $P_{ном}$ – максимально допустимая мощность, которую резистор может рассеивать в виде тепла в заданных условиях при непрерывной работе в течение всего гарантированного срока службы, сохраняя свои параметры в указанных пределах.

НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА – значение напряжения, при котором конденсатор может работать в заданных условиях в течение гарантированного срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах.

НОМИНАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗИСТОРА - сопротивление, на которое рассчитан резистор и которое указывается на его корпусе.

P-N ПЕРЕХОД – контакт двух областей полупроводника с различным типом проводимости.

ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ (РАДИОДЕТАЛИ) – компоненты, предназначенные для перераспределения электрической энергии: они потребляют или накапливают энергию. К ним относят конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности и коммутирующие элементы.

ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА – типовая несущая конструкция современной радиоэлектронной аппаратуры, состоящая из слоистого диэлектрического основания и печатных проводников.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ (СКИН-ЭФФЕКТ) – явление, связанное с неравномерным распределением электрического тока по сечению проводника на высоких частотах: плотность тока максимальна на поверхности проводника и уменьшается по мере проникновения в глубь проводника.

ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА – средняя скорость носителей в электрическом поле единичной напряженности.

ПОЛИМОРФИЗМ – способность твердого вещества образовывать две и более кристаллические структуры, устойчивые при различных температурах и давлении.

ПОЛИКРИСТАЛЛ – совокупность неориентированных относительно друг друга зерен – кристаллитов.

ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА (ИМПЕДАНС) $\boldsymbol{Z}$ **–** сопротивление конденсатора переменному синусоидальному току определенной частоты, обусловленное наличием у реального конденсатора наряду с реактивным (емкостным) сопротивлением также активного и индуктивного сопротивлений.

ПОЛУПРОВОДНИК N-ТИПА – примесный полупроводник, основными носителями заряда в котором являются электроны.

ПОЛУПРОВОДНИК P-ТИПА – примесный полупроводник, основными носителями заряда в котором являются дырки.

ПОЛУПРОВОДНИКИ – материалы, являющиеся по удельной проводимости промежуточными между проводниковыми и диэлектрическими материалами, отличительным свойством которых является сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей и различных дефектов, а также от внешних воздействий (температуры, освещенности и т.д.). Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материала, а также от условий их эксплуатации может изменяться в пределах $10^{-5} < \rho < 10^{8}$ Ом · м.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКА – процесс смещения связанных электрических зарядов на ограниченное расстояние под действием внешнего электрического поля.

ПОЗИСТОР - терморезистор с положительным температурным коэффициентом сопротивления.

ПРИМЕСНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК – полупроводник, в который введена донорная (элементы 5 группы системы Д. И. Менделеева) или акцепторная (элементы 3 группы) примесь.

ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКА – явление образования в диэлектрике каналов проводимости при воздействии сильного электрического поля и, как следствие, резкого уменьшения сопротивления диэлектрика.

ПРОВОДНИКИ – материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная электропроводность. Их применение в технике обусловлено, в основном, этим свойством, определяющим высокую удельную электрическую проводимость при нормальной температуре. Условно к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5}$ Ом · м.

ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА – способность противостоять разрушению.

РАССТЕКЛОВЫВАНИЕ – переход вещества из метастабильного стеклообразного состояния в более устойчивое кристаллическое состояние.

РЕЗИСТОР – элемент, предназначенный для обеспечения определенного соотношения между током и приложенным напряжением, что позволяет регулировать уровень электрических сигналов, поступающих на различные участки электрической цепи.

РЕКОМБИНАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПАР – процесс, обратный процессу генерации электронно-дырочных пар, при котором электрон и дырка перестают существовать как носители электрического заряда.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ – явление резкого скачкообразного падения сопротивления при температурах, близких к абсолютному нулю. Температуру, при которой происходит переход в сверхпроводящее состояние, называют критической температурой $T_{кр.}$

СВЕТОДИОД (светоизлучающий диод) – полупроводниковый прибор с p-n-переходом, протекание через который электрического тока в прямом направлении вызывает интенсивное некогерентное оптическое излучение.

СИТАЛЛЫ – стеклокристаллические материалы, получаемые путем неполной стимулированной кристаллизации стекол особого состава.

СКВОЗНОЙ ТОК (ТОК СКВОЗНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ) – ток, обусловленный наличием в диэлектрике собственных носителей заряда, а также возможной инжекцией носителей заряда из электродов.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРА ($R_{из}$) – сопротивление конденсатора постоянному току определенного напряжения. Для идеального диэлектрика $R_{из} \rightarrow \infty$; у реальных диэлектриков $R_{из}$ конечно и определяется, главным образом, электроизоляционными свойствами рабочего диэлектрика (его удельным сопротивлением).

СПЛАВЫ – материалы, структура которых представляет собой механическую смесь различных металлов, либо твердый раствор одного металла в другом. В качестве добавок в состав сплавов могут входить и неметаллические составляющие.

СПОНТАННАЯ (САМОПРОИЗВОЛЬНАЯ) ПОЛЯРИЗАЦИЯ – наличие электрического дипольного момента в отсутствие внешнего электрического поля, обусловленное особенностями строения сегнетоэлектриков.

СТАБИЛЬНОСТЬ МАТЕРИАЛА – способность сохранять внутреннее строение и внешнюю форму при изменении условий в процессе длительной эксплуатации.

ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ($\mathbf{tg}\,\delta$) – мера диэлектрических потерь, позволяющая определять мощность, рассеиваемую в диэлектрике.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРА (ТКС) – параметр, характеризующий обратимое изменение сопротивления при изменении его температуры (за счет изменения температуры окружающей среды или электрической нагрузки).

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ – относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на 1 Кельвин (градус).

ТЕРМОПАРА – термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь; при различной температуре контактов в замкнутой цепи возникает термоэлектрический ток.

ТЕРМОРЕЗИСТОР (ТЕРМИСТОР) – полупроводниковый резистор, для которого характерна зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА – свойства, характеризующие поведение материала при обработке. В зависимости от методов обработки (механическая, термическая, химическая, электрохимическая и т. п.) наибольшее значение могут приобретать различные свойства, такие, как твердость, пластичность, способность образовывать

пассивирующее покрытие при окислении, стойкость в химически агрессивных средах, пределы растворимости в материале легирующих примесей.

ТОК УТЕЧКИ – полный ток, протекающий через диэлектрик и представляющий собой сумму абсорбционного тока и сквозного тока.

ТОЧКА КЮРИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА – температура, выше которой исчезают электрические домены и спонтанная поляризация.

УГЛЕРОДИСТЫЕ РЕЗИСТОРЫ – резисторы, в которых используются слои углерода, полученные термическим разложением паров углеводородов (пиролитический углерод).

УГОЛ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ – угол, дополняющий до прямого угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи или угол между вектором полного тока и его реактивной составляющей.

УДЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ – величина, обратная удельному сопротивлению.

УДЕЛЬНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ – сопротивление участка пленки квадратной формы при протекании тока параллельно поверхности.

УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ – относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один Кельвин (градус).

УЛЬТРАФАРФОР – диэлектрический материал с высоким содержанием (порядка 80%) оксида алюминия, рассчитан на работу в области высоких частот.

УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ – обратимое изменение размеров и формы изделия за счет изменения расстояния между атомами.

УРОВЕНЬ ФЕРМИ – максимальное значение энергии, которое может иметь электрон при температуре абсолютного нуля.

ФЕРРИМАГНЕТИКИ – вещества, в которых магнитные моменты атомов выстраиваются антипараллельно друг другу.

ФЕРРИТЫ – ферромагнитные полупроводники, представляющие собой двойные окислы, образованные окисью железа и окислами двухвалентных металлов; обладают высоким электрическим сопротивлением; применяются в магнитных цепях, эксплуатируемых на высоких частотах.

ФЕРРОМАГНЕТИКИ – вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что они выстраиваются параллельно друг другу.

ФОНОНЫ – временные искажения регулярности кристаллической решетки, вызванные тепловым движением атомов.

ФОТОРЕЗИСТОР – приемник оптического излучения, принцип действия которого основан на эффекте фотопроводимости.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА – свойства, определяющие пригодность материала для создания изделий высокого качества.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ – полупроводниковые нелинейные резисторы с симметричной ВАХ (варисторы), имеющие участок отрицательного дифференциального сопротивления.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ – совокупность свободных (коллективизированных) электронов, движение которых подчиняется законам классической статистики.

ЭПИТАКСИЯ – метод ориентированного наращивания одного кристаллического вещества на поверхности другого кристалла, служащего подложкой.

3.5. Технические средства обеспечения дисциплины

При выполнении расчетов по лабораторным работам, а также для построения графических зависимостей рекомендуется пользоваться стандартной программой MathCad.

3.6. Методические указания к выполнению лабораторных работ

3.6.1. Общие указания

Лабораторные работы ставят своей целью ознакомление с основными типами радиоматериалов, в том числе с полупроводниковыми, проводниковыми, диэлектрическими и магнитными материалами, изучение основных физических процессов, определяющих их функциональные свойства, влияние свойств радиоматериалов на эксплуатационные характеристики радиокомпонентов на их основе.

При выполнении лабораторных работ студенты закрепляют полученные теоретические знания дисциплины, находят экспериментальное подтверждение теоретических положений курса, приобретают навыки научных исследований и умение использовать материалы, а также основные электрофизические процессы и явления при разработке, производстве и эксплуатации радиоэлектронных средств.

Для успешного выполнения лабораторных работ студент должен обладать знаниями в области математики, физики, химии, а кроме того, предварительно ознакомиться с теоретическим материалом по теме работы, которую предстоит выполнить.

В процессе выполнения лабораторной работы студенты должны записывать экспериментальные данные и результаты расчета в черновик отчета. После окончания эксперимента, полученные данные предъявляются преподавателю, а затем окончательно оформляется каждым студентом индивидуальный отчет, сопровождаемый краткими выводами, включающими анализ полученных результатов. Знания, самостоятельность, практические навыки, полученные в процессе выполнения лабораторных работ или в производственных условиях по месту работы, оцениваются преподавателем при защите отчета по лабораторным работам.

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

Организация безопасной работы студентов при выполнении лабораторных работ производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.030-81 (2001) «Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление».

Перед выполнением лабораторных работ все студенты проходят инструктаж по технике безопасности, о чем делается запись в соответствующем журнале,

которая подтверждается собственноручными подписями студентов и лица, проводившего инструктаж. В процессе выполнения лабораторной работы при обнаружении неисправностей в лабораторной установке следует немедленно прекратить работу, отключить установку и сообщить об этом преподавателю. Закончив экспериментальные исследования, необходимо отключить напряжение питания установки и привести рабочее место в порядок.

Запрещается находиться в помещении в верхней одежде, оставлять без надзора включенную лабораторную установку, выполнять работу в отсутствие преподавателя или дежурного лаборанта, класть сумки, одежду и другие вещи на столы и лабораторную технику.

3.6.2. Лабораторная работа № 1
Электрические свойства проводниковых материалов

1. Цель работы

Изучение зависимости удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры, определение среднего температурного коэффициента удельного сопротивления исследуемых проводниковых материалов.

2. Основные теоретические положения

Из курса физики известно, что элементарные частицы (в том числе и электроны) обладают свойством корпускулярно-волнового дуализма. Поэтому движение свободных электронов в металле можно рассматривать как распространение плоских электронных волн.

Такая плоская электронная волна в строго периодическом потенциальном поле распространяется без рассеяния энергии (без затухания), то есть идеальная, не содержащая искажений кристаллическая решетка твердого тела не оказывает рассеивающего влияния на поток электронов. Это означает, что в идеальном кристалле при $T \to 0$ К длина свободного пробега электронов равна бесконечности, а сопротивление электрическому току равно 0.

Рассеяние, приводящее к появлению сопротивления, возникает в тех случаях, когда в решетке имеются различного вида нарушения ее строгой периодичности в атомном строении.

В чистых металлах совершенной структуры единственной причиной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, являются тепловые

колебания атомов в узлах кристаллической решетки. Очевидно, что с ростом температуры увеличивается амплитуда тепловых колебаний атомов и связанные с ними флуктуации периодического поля решетки (нарушение периодического поля решетки). А это, в свою очередь усиливает рассеяние электронов и вызывает возрастание удельного сопротивления.

Относительное изменение удельного сопротивления ρ, при изменении температуры на один Кельвин (градус) называют температурным коэффициентом удельного сопротивления

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad . \qquad (1)$$

Положительный знак α_ρ соответствует случаю, когда удельное сопротивление возрастает при повышении температуры.

На практике при расчете α_ρ часто пользуются следующей формулой:

$$\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l \quad , \qquad (2)$$

где α_R - температурный коэффициент сопротивления резистора из данного материала ;

α_l - температурный коэффициент линейного расширения материала.

У чистых металлов $\alpha_\rho >> \alpha_l$, поэтому для них $\alpha_\rho \approx \alpha_R$. Однако для термостабильных металлических сплавов такое приближение оказывается несправедливым.

Причинами рассеяния электронных волн в металле могут быть не только тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки, но и статические дефекты структуры, которые также нарушают периодичность потенциального поля решетки кристалла. Рассеяние на дефектах структуры, к которым, в основном, относятся примесные атомы, не зависит от температуры. Примеси всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнений, либо в виде легирующего элемента в сплавах.

В технике широко применяются металлические сплавы. Распределение атомов разных сортов по узлам кристаллической решетки вызывает значительное нарушение периодического потенциала решетки, что приводит к сильному рассеянию электронов и, следовательно, к значительно большим величинам сопротивления сплавов по сравнению с чистыми металлами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Определение удельного электрического сопротивления металлов и сплавов (T = 20° C)

Измерить сопротивление образцов металлов (меди, никеля), сплавов (константана, манганина, нихрома), экспериментальные данные занести в табл. 1.

Таблица 1

Наименование материала	Сопротивление проводника R, Ом	Длина проводника l, м	Диаметр проводника d, мм	Площадь поперечного сечения S, м^2	ρ, Ом · м
1. Нихром		1,0	0,30		
2. Манганин		1,0	0,14		
3. Константан		1,0	0,11		
4. Медь		1,0	0,23		
5. Никель		1,0	0,28		

3.2. Определение удельного поверхностного сопротивления пленочных резистивных материалов (T= 20 °C)

Измерить сопротивление образцов пленочных резистивных материалов, экспериментальные данные занести в табл. 2.

Таблица 2

Наименование материала	Ширина проводника b, мм	Длина проводника l, мм	Сопротивление R, Ом	Удельное поверхностное сопротивление ρ_s, Ом
6. Сплав на основе хрома ЭРХ4	7,7	8,0		
7. Кермет К50*	0,18	1,2		
8. Кермет К20*	0,23	8,0		
9. Хромосили-цидный сплав РС3001**	0,1	1,0		

* Керметы К-50 и К-20 - материалы на основе микрокомпозиций, состоящих из хрома и монооксида кремния

** Состав сплава РС3001: 30 % хрома, 1 % железа, остальное - кремний

3.3. Определение температурной зависимости сопротивления металлов и сплавов

Для изучения зависимости сопротивления проводников от температуры необходимо включить в сеть термокамеру и провести измерения сопротивления образцов при температурах 20, 40, 50, 60, 70, 80 °С . Полученные данные

занести в табл. 3. Построить отдельно для никеля и сплавов графики зависимости сопротивления от температуры $R = f(T)$.

Таблица 3

Положение переключа-теля	Наименова-ние материала	Температура T, °С	Измеренное сопротивление R, Ом	α_R, 1/°С	α_ρ, 1/°С
1	нихром				
2	манганин				
5	никель				

4. Последовательность расчета

4.1. Вычислив площадь поперечного сечения проволочных проводников S, находят их удельное сопротивление ρ, Ом · м, по формуле

$$\rho = R\frac{S}{l} \quad . \qquad (3)$$

4.2. Для пленочных образцов (табл. 2) удельное поверхностное сопротивление ρ_S, Ом, рассчитывается по формуле

$$\rho_S = R\frac{b}{l} \quad .$$

(4)

4.3. Температурный коэффициент сопротивления проводников α_R, 1/°С, для интервала температур (20÷ 80) °С определяют из выражения

$$\alpha_R = \frac{1}{R_o}\frac{R - R_o}{T - T_o} \quad , \qquad (5)$$

где R_o – значение сопротивления при температуре T_o (T_o = 20 °С);

R – значение сопротивления при температуре T (T = 80 °С).

4.4. Рассчитать температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ по формуле (2). Значения α_l принять равными: для меди – 16,7 · 10^{-6} 1/°С; для никеля – 12,8 · 10^{-6} 1/°С; для манганина и нихрома – 16,4 · 10^{-6} 1/°С.

5. Содержание отчета

1. Цель исследований.

2. Таблицы с результатами определения удельного сопротивления проводников при Т=20 ºС.

3. Таблица с результатами определения сопротивления никеля и сплавов в зависимости от температуры.

4. Графики зависимости $R = f(T)$ (отдельно для металла, отдельно для сплавов).

5. Выводы по работе, объясняющие различное поведение сопротивления металлов и сплавов в зависимости от температуры.

Литература: [1], с. 56 … 90; [4], с. 51 … 146

3.6.3. Лабораторная работа № 2

Электрические свойства диэлектриков

Часть 1

1. Цель работы

Определение величины диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков.

2. Основные теоретические положения

Если представить себе конденсатор, между пластинами которого находится диэлектрик, то емкость такого конденсатора $C_д$ будет превышать емкость конденсатора, между пластинами которого вакуум, в ε раз

$$\varepsilon = C_д / C_о \qquad (1)$$

Величина ε называется относительной диэлектрической проницаемостью материала.

Предположим, что конденсатор емкостью $C_д$ не подключен к источнику тока, и заряды с обкладок не стекают (величина заряда Q имеет постоянное значение), тогда увеличение емкости $C_д$ в ε раз ($C_д = \varepsilon \cdot C_о$) эквивалентно уменьшению в ε раз разности потенциалов между обкладками конденсатора U (так как $C=Q/U$). Следовательно, при введении диэлектрика между обкладками конденсатора электрическое поле внутри него уменьшается, несмотря на постоянство заряда Q на обкладках. Это объясняется тем, что на поверхности диэлектрика индуцируются заряды, противоположные по знаку заряду

прилегающего электрода (рис.1). Именно эти заряды и нейтрализуют часть полного заряда Q на обкладках конденсатора.



Рис. 1. Образование на поверхности диэлектрика зарядов, противоположных по знаку заряда прилегающего электрода

Таким образом, в диэлектрике, помещенном в электрическое поле, происходит пространственное разделение зарядов, то есть возникает электрический момент, процесс образования которого называется поляризацией. Величина ε характеризует при этом способность различных материалов к поляризации в электрическом поле.

Значение емкости конденсатора и накопленный в нем электрический заряд определяется рядом механизмов поляризации: электронной упругой поляризацией, ионной упругой поляризацией, дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной и миграционной поляризацией (подробно о механизмах поляризации диэлектриков см. [2]).

В зависимости от механизмов поляризации, диэлектрики подразделяются на несколько групп:

1. Неполярные диэлектрики обладают только электронной поляризацией и, следовательно, имеют наименьшее значение диэлектрической проницаемости. К ним относятся парафин, сера, полиэтилен, полистирол, фторопласт (ε находится в пределах от 1,8 до 3). Все неполярные материалы характеризуются малыми диэлектрическими потерями в диапазоне радиочастот, высокой электрической прочностью и весьма высоким удельным сопротивлением.

2. Полярные диэлектрики имеют одновременно дипольно-релаксационную и электронную поляризации. Основные представители: кремнийорганические соединения, фенолформальдегидные смолы, эпоксидные

компаунды, капрон, органические стекла, поливинилхлорид (винипласт), см. рис. 2.

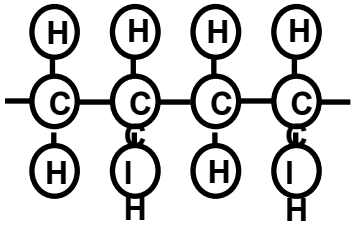


Рис. 2. Строение молекулы поливинилхлорида

У полярных полимеров из-за асимметрии строения молекул сильно выражена дипольно-релаксационная поляризация, поэтому они обладают пониженными электроизоляционными свойствами по сравнению с неполярными диэлектриками, особенно на высоких частотах.

Полярные полимеры, по сравнению с неполярными, характеризуются в несколько раз большим значением ε и заметно меньшим удельным объемным сопротивлением, поэтому они используются в основном как изоляционные и конструкционные материалы в диапазоне низких частот.

К числу сильнополярных диэлектриков относятся гетинакс (получают горячей прессовкой бумаги, пропитанной фенолформальдегидной смолой) и текстолит (стеклотекстолит) (получают прессовкой пропитанной хлопчатобумажной ткани или стеклоткани), так как волокнистая основа и пропитывающее вещество обладают полярными свойствами.

3. Ионные соединения – это твердые неорганические диэлектрики с ионной, электронной, ионно- и электронно-релаксационными механизмами поляризации. К ним относятся кварц, слюда, корунд (Al_2O_3), неорганические стекла, многие виды керамики, рутил (TiO_2). Диэлектрическая проницаемость большинства стекол лежит в диапазоне 4 - 20 (диэлектрическая проницаемость корунда $\varepsilon = 10$, для рутила $\varepsilon = 100 \ldots 120$).

3. Порядок выполнения работы

3.1. Провести измерения емкости условного конденсатора, поместив исследуемые образцы диэлектрических материалов с напыленными электродами в измерительную ячейку.

3.2. Измерить диаметр и толщину исследуемых образцов, данные занести в табл. 1.

Таблица 1

Материал диэлектрика	Текстолит	Гетинакс	Вини-пласт	Эбо-нит	Орг-стекло
Емкость, C, Ф					
Толщина диэлектрика d, м					
Диаметр электрода D, м					
Площадь электрода S, м^2					
Диэлектрическая проницаемость ε					

4. Последовательность расчета

Рассчитать диэлектрической проницаемости ε по формуле емкости плоского конденсатора с однослойным диэлектриком

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \qquad (2)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость материала;

ε_o - диэлектрическая постоянная, равная $8{,}86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

S - площадь электродов (рассчитать по формуле для площади круга);

d - толщина диэлектрика.

5. Содержание отчета по части 1 лабораторной работы

1. Цель исследований.
2. Таблицы с результатами определения диэлектрической проницаемости различных материалов.
3. Выводы о величине полученных значений диэлектрической проницаемости.

Литература: см. стр. 111.

Часть 2

1. Цель работы

Определение удельного объемного и поверхностного сопротивления диэлектриков.

2. Основные теоретические положения

Процессы поляризации в диэлектриках происходят во времени до момента ее установления, что приводит к появлению поляризационных токов. Поляризационные токи, обусловленные установлением упругой электронной и ионной поляризации, настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Поляризационные токи, обусловленные замедленными механизмами поляризации (релаксационной поляризацией), наблюдаемые у многих технических диэлектриков, называют токами абсорбции $\boldsymbol{I_{АБ}}$.

Наличие в технических диэлектриках собственных носителей заряда, а также возможная инжекция из электродов избыточных носителей приводят к возникновению небольших токов сквозной электропроводности (или сквозных токов) $\boldsymbol{I_{СКВ}}$.

Полный ток, протекающий через диэлектрик и представляющий собой сумму абсорбционного и сквозного токов, называется током утечки

$$I_{УТ} = I_{СКВ} + I_{АБ}.$$

На рис. 3 показана зависимость от времени плотности тока конденсатора с диэлектриком, в котором имеются релаксационные механизмы поляризации. Видно, что после завершения процессов поляризации, через диэлектрик протекает только ток $I_{СКВ}$.

У твердых диэлектриков различают объемную и поверхностную электропроводности. Для сравнительной оценки этих величин используют удельное объемное ρ_V и удельное поверхностное сопротивления ρ_S.

В случае плоского образца материала в однородном поле, удельное объемное сопротивление рассчитывают по формуле

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h} \quad , \tag{3}$$

где S - площадь электрода, м^2;

R_V - измеренное объемное сопротивление, Ом;

h - толщина образца (эквивалент расстоянию между электродами).

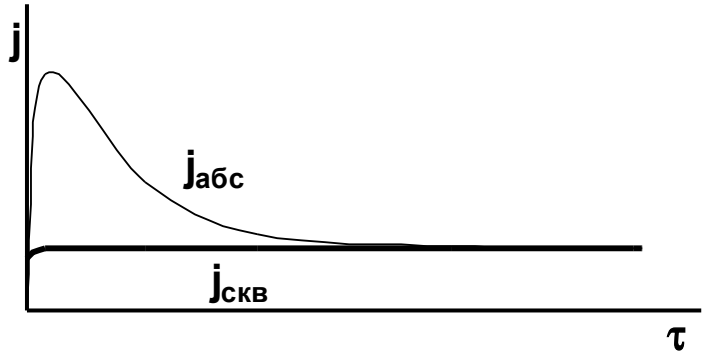


Рис. 3. Зависимость плотности тока от времени в конденсаторе с диэлектриком, с различными механизмами электропроводности (электрическое поле прикладывается мгновенно и постоянно во времени)

Удельное поверхностное сопротивление рассчитывают по формуле

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l} \quad , \tag{4}$$

где R_S - измеренное поверхностное сопротивление, Ом;

d - ширина электродов;

ℓ - расстояние между электродами.

По удельному сопротивлению можно определить удельную объемную проводимость $\gamma_V = 1/\rho_V$ и удельную поверхностную проводимость $\gamma_S = 1/\rho_S$.

У твердых пористых диэлектриков при наличии в них влаги даже в ничтожных количествах значительно увеличивается удельная проводимость. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление. Наиболее заметно снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности у пористых материалов, которые содержат растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой проводимостью. Для уменьшения влагопоглощения пористые изоляционные материалы подвергают пропитке.

Поверхностная электропроводность обусловлена наличием влаги, загрязнениями и различными дефектами поверхности диэлектрика. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную проводимость, которая определяется, в основном, толщиной этого слоя.

Количество влаги, находящейся на поверхности, зависит от относительной влажности окружающей среды, поэтому влажность является

решающим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости γ_S.

Кроме того, удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем ниже полярность вещества и чем чище поверхность диэлектрика. При этом наличие загрязнений мало сказывается на удельной поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков (неполярные диэлектрики, поверхность которых не смачивается водой) и сильно влияет на γ_S гидрофильных диэлектриков (полярные и ионные диэлектрики со смачиваемой поверхностью). Для уменьшения поверхностной проводимости проводят очистку поверхности спиртом, ацетоном и т.п.

3. Порядок выполнения работы

В данной части лабораторной работы используется терраомметр, который предназначен для измерения сопротивления постоянному току в диапазоне от 10 до 10^{14} Ом.

3.1. Измерить поверхностное и объемное сопротивления образцов листового диэлектрического материала с использованием схемы, представленной на рис.4. Данные измерений занести в табл. 2.

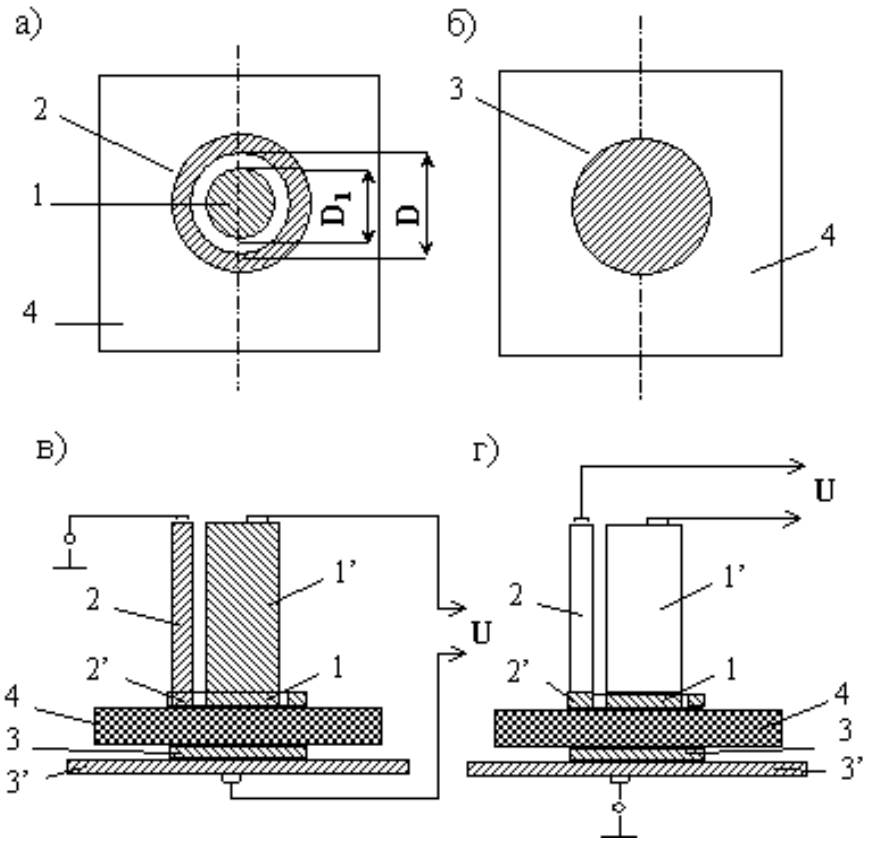


Рис.4. Образец твердого листового электроизоляционного материала с нанесенными на него электродами:
а - вид образца сверху;
б - вид образца снизу;
в, г - включение образца в схему: 1 - верхний, защищенный охранным кольцом электрод с помещенным на него электродом-гирькой 1′; 2 - охранное кольцо с помещенной на него гирькой 2′; 3 - нижний электрод образца, контактирующий с латунной пластинкой 3′; 4 - исследуемый образец

Таблица 2

Материал	D, м	D_1, м	S, м^2	h, м	R_V, Ом	R_S, Ом	ρ_V, Ом·м	ρ_S, Ом

4. Последовательность расчета

4.1. Используя формулу (3), рассчитать удельное объемное сопротивление диэлектрических материалов.

4.2. Удельное поверхностное сопротивление вычислять по формуле:

$$\rho_S = R_S \frac{\pi(D + D_1)}{D - D_1}, \qquad (5)$$

где D - внутренний диаметр охранного кольца, м (рис. 4, а);

D_1- диаметр электрода, окруженного охранным кольцом, м;

5. Содержание отчета

1. Цель исследований.

2. Таблица с результатами измерений емкости образцов и результатами расчета диэлектрической проницаемости материалов.

3. Таблица с результатами измерений объемного и поверхностного сопротивлений и расчетом удельных величин объемной и поверхностной проводимости диэлектриков.

4. Примеры расчетов.

5. Выводы по работе.

Литература: [1], с. 182 … 236, 262 … 289; [3], с. 23 … 42, 57 … 63; [4], с. 301 … 428

3.6.4. Лабораторная работа № 3

Исследование электрических свойств сегнетоэлектриков

1. Цель работы

Выявление качественных особенностей поведения сегнетоэлектриков под воздействием внешних электрического и теплового полей.

2. Основные теоретические положения

Сегнетоэлектриками называют вещества, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, которая существенно изменяется под влиянием внешних воздействий: электрического поля, упругих напряжений, изменения температуры и др.

Спонтанная поляризация, то есть наличие электрического дипольного момента в отсутствии внешнего электрического поля, обусловлена особенностями строения сегнетоэлектриков. В отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрики имеют доменную структуру. Домены представляют собой макроскопические области вещества, обладающие самопроизвольной поляризацией. Направления электрических моментов у разных доменов различны (рис. 1, а), поэтому суммарная поляризованность образца в целом равняется нулю.

Внешнее электрическое поле изменяет направления электрических моментов доменов, что создает эффект очень сильной поляризации (рис.1, б). Именно этим объясняются свойственные сегнегоэлектрическим материалам сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости ε (до сотен тысяч).

Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость электрической индукции (или поляризации) от напряженности электрического поля. Эта зависимость имеет вид петли гистерезиса (рис. 2).

Участок кривой ОА соответствует процессу роста доменов, у которых вектор спонтанной поляризации образует наименьший угол с направлением поля. В точке А наступает состояние технического насыщения, поляризация достигает максимального значения P_{max}, все домены ориентируются по

направлению поля. Кривую ОА называют кривой заряда сегнетоэлектрического конденсатора.

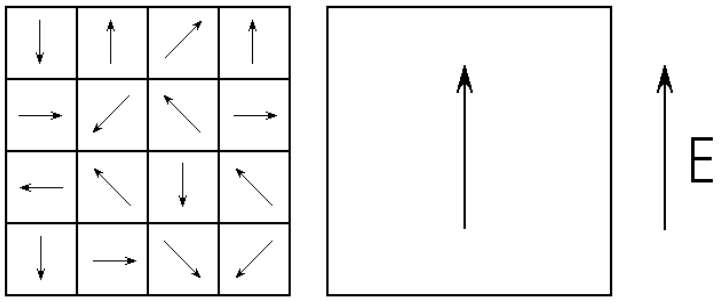


Рис.1. Доменное строение сегнетоэлектрика в отсутствие внешнего электрического поля (а) и при приложении внешнего электрического поля напряженностью Е (б)

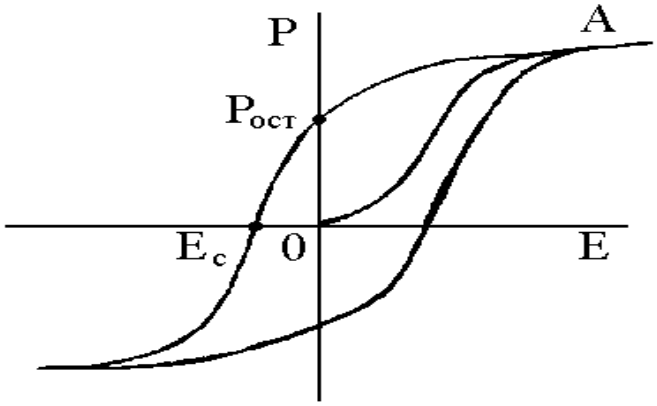


Рис. 2. Основная кривая поляризации сегнетоэлектрика (кривая ОА) и петля диэлектрического гистерезиса

Если в поляризованном до насыщения образце уменьшить напряженность поля до 0, то поляризация в 0 не обратится, а примет некоторое остаточное значение $P_{ост}$ (рис. 2). При воздействии полем противоположной полярности поляризация быстро уменьшается и при некоторой напряженности поля E_c (называемой коэрцитивной силой) обращается в ноль.

Так как наличие гистерезиса - это результат запаздывания поляризации по отношению к внешнему электрическому полю, то площадь, ограниченная

петлей гистерезиса, пропорциональна потерям, связанным с затратами энергии электрического поля на ориентацию доменов.

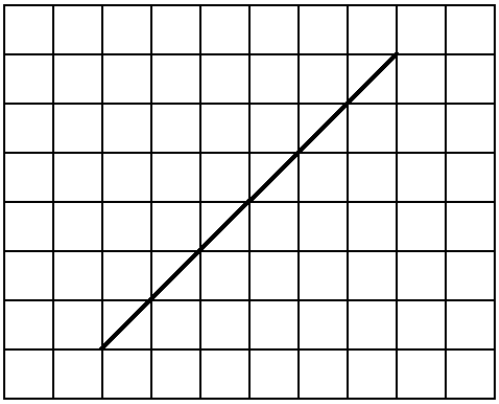
Специфические свойства сегнетоэлектриков проявляются только в определенном интервале температур. При увеличении температуры усиливается тепловое движение и, как следствие, нарушается доменная структура. Таким образом происходит переход из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую. Температура, выше которой спонтанная поляризация исчезает, называется точкой Кюри. В точке Кюри диэлектрическая проницаемость достигает максимума.

В настоящее время известно несколько сотен соединений, обладающих свойствами сегнетоэлектриков, среди них титанат бария $BaTiO_3$, титанат свинца $PbTiO_3$, ниобат калия $KNbO_3$.

Температура перехода в спонтанно поляризованное состояние (точка Кюри) у различных сегнетоэлектриков составляет от нескольких кельвинов (например, у $Pb_2Nb_2O_7$ T_K = 15 К, T_K = 393 К у титаната бария) и до полутора тысяч кельвинов (например, у $LiNbO_3$ T_K = 1483 К).

3. Порядок выполнения работы

3.1. По описанию к лабораторной установке произвести калибровку осциллографа так, чтобы на его экране наблюдалась прямая линия, проходящая через центр экрана, как показано на рис. 3, а.



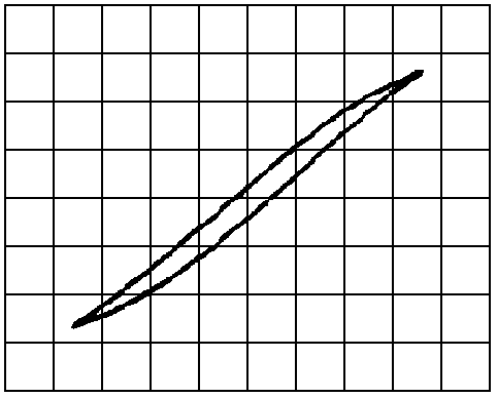


Рис. 3. Изображение на экране осциллографа при калибровке установки (а) и измерении зависимости заряда (индукции) от величины напряженности электрического поля (б)

3.2. Снять зависимость заряда (индукции) конденсатора с сегнетоэлектриком от величины напряженности электрического поля. Для этого определить координаты вершины петли гистерезиса (рис. 3, б). Измерения следует проводить не менее 4-х раз, то есть при 4-х значениях масштаба $R_{M,}$.

3.3. Рассчитать заряд и напряжение по формулам:

$$Q = V_u \cdot C_0 \qquad (1)$$

$$V = V_g \text{ ,} \qquad (2)$$

где V_u - координата вершины петли гистерезиса по вертикали;

V_g - координата вершины петли гистерезиса по горизонтали;

C_0 – емкость эталонного конденсатора.

Результаты измерений занести в табл.1

Таблица 1

V_g , В	V_u , В	E, В/м	Q, Кл	C_{CT}, Ф	ε

3.4. Определить потери в сегнетоэлектрике, для чего при среднем значении $R_м$ зарисовать петлю гистерезиса на кальку, определить ее площадь (в мм^2).

3.5. Снять температурную зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

T, °С	V_g , В	V_u , В	E, В/м	Q, Кл	C_{CT}, Ф	ε

4. Последовательность расчета

4.1. Определить напряженность электрического поля как

$$E = \frac{V_g}{h} \quad , \qquad (3)$$

где h – толщина диэлектрика конденсатора.

4.2. Для каждого значения $R_м$ вычислить статическую емкость по формуле

$$C_{CT} = \frac{Q}{V} \quad . \qquad (4)$$

4.3. Рассчитать диэлектрическую проницаемость, используя соотношение

$$\varepsilon = \frac{C_{CT} \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot S} \quad , \qquad (5)$$

где S - площадь образца, $S = 1$ см^2; $\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-14}$ Ф/см.

4.4. Мощность, рассеиваемую в сегнетоэлектрике, определить как

$$P = K \cdot S_Г \quad , \qquad (6)$$

где $S_Г$ - площадь, ограниченная гистерезисной петлей (мм^2);

K - коэффициент пропорциональности (Вт/мм^2), определяемый как

$$K = \frac{U_1 \cdot q_1}{2} \cdot f \quad , \qquad (7)$$

где U_1 и q_1 – цена деления горизонтальной и вертикальной оси (в В/мм и Кл/мм, соответственно);

f - частота переменного тока (50 Гц).

4.5. Определить тангенс угла диэлектрических потерь по формуле

$$tg\delta = \frac{2P}{2\pi \cdot f \cdot Q_{\max} \cdot V_{\max}} , \qquad (8)$$

где: $Q_{\max}$ - максимальный заряд на обкладках конденсатора;

$V_{\max}$ - амплитуда приложенного напряжения;

$2\pi f$ - круговая частота, с$^{-1}$.

5. Содержание отчета

1. Кратная характеристика исследуемых материалов.

2. Схема измерительной установки.

3. График зависимости заряда (индукции) в сегнетоэлектрике от напряженности электрического поля (петля гистерезиса)**.**

4. Результаты расчета диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика ε при различных напряженностях электрического поля.

5. Результаты вычисления мощности и тангенса угла потерь в сегнетоэлектрике.

6. Таблица с результатами расчета диэлектрической проницаемости при различных температурах.

7. График температурной зависимости диэлектрической проницаемости $\varepsilon = f(T)$. Определение точки Кюри.

8. Краткие выводы.

Литература: [1], с. 182 … 236, 262 … 289; [3], с. 23 … 42, 57 … 63; [4], с. 301 … 428

3.6.5. Лабораторная работа № 4

Исследование свойств ферромагнитных материалов

1. Цель работы

Изучение полевой и частотной зависимости магнитной проницаемости ферромагнитного материала (пермаллоя), определение удельной мощности потерь на перемагничивание в зависимости от напряженности и частоты магнитного поля.

2. Основные теоретические положения

Все вещества по особенностям их поведения в магнитном поле делятся на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферриты.

Ферромагнетики - это вещества, в которых векторы магнитных моментов атомов располагаются параллельно друг другу (↑↑↑↑↑).

Характерной особенностью ферромагнитных материалов является их способность сильно намагничиваться даже в слабых магнитных полях.

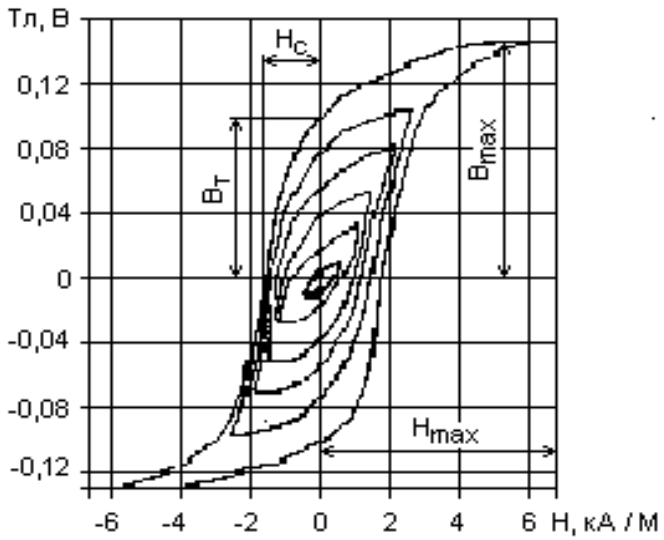


Рис. 1. Гистерезисные петли при различных предельных значениях напряженности внешнего магнитного поля

Для ферромагнетиков характерно также наличие гистерезиса, сущность которого состоит в том, что значение индукции B не однозначно определяется величиной магнитного поля H, а зависит от предыстории образца, то есть от величины и направления магнитного поля, действовавшего на него ранее. Если ферромагнетик намагнитить до состояния насыщения B_s, а затем отключить внешнее поле, то индукция в 0 не обратится, а примет некоторое значение $B_{ост}$, называемое остаточной индукцией. Для того чтобы величина магнитной индукции приняла нулевое значение, необходимо приложить магнитное поле противоположного направления.

Напряженность размагничивающего поля H_c , при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения, обращается в 0, называется коэрцитивной силой. Таким образом, зависимость $B(H)$ при циклическом намагничивании называется петлей гистерезиса (рис.1).

Гистерезис обусловлен необратимостью процессов намагничивания, благодаря чему материал остается намагниченным после снятия магнитного поля (ферромагнитный материал становится постоянным магнитом).

По петле гистерезиса определяются следующие основные параметры магнитных материалов:

- индукция насыщения $B_{\max}$ - максимальная индукция, соответствующая состоянию технического насыщения образца;

- определяемые по площади петли гистерезиса;
- остаточная индукция B_T;
- коэрцитивная сила *Hc;*
- удельные магнитные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания, определяемые по площади петли гистерезиса.

Форма петли гистерезиса зависит от исходного магнитного состояния материала, скорости перемагничивания и от максимальных значений напряженности магнитного поля. Для слабых полей петля гистерезиса имеет вид эллипса (рис.1). С увеличением напряженности магнитного поля возрастает ширина петли и изменяется ее форма, при этом может быть получено семейство симметричных петель гистерезиса (рис.1). Петля гистерезиса, полученная при условии насыщения, называется предельной.

Геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса при различных значениях амплитуды переменного магнитного поля называется основной кривой намагничивания (рис. 2).

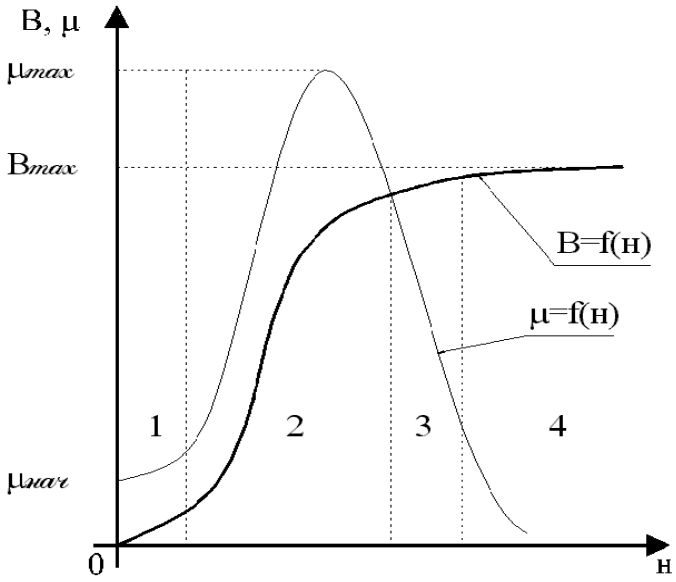


Рис. 2. Основная кривая намагничивания ферромагнетика - *B=f(H)*; зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля - μ=*f(H)*

Возрастание индукции под действием внешнего поля обусловлено двумя основными процессами: смещением доменных границ и поворотом магнитных моментов доменов. Начальному участку кривой *B=f(H)* (рис. 2, участок 1) соответствует упругое смещение доменных границ. При этом происходит

увеличение тех доменов, магнитные моменты которых образуют наименьший угол с вектором напряженности внешнего магнитного поля. После снятия внешнего поля на этом участке доменные границы возвращаются в прежнее положение.

Участок 2 (рис. 2) - смещение границ доменов носит необратимый характер. Кривая намагничивания имеет наибольшую крутизну.

Участок 3 (рис. 2) - векторы магнитных моментов доменов, образующих небольшой угол с вектором напряженности внешнего магнитного поля, постепенно поворачиваются в направлении поля.

Когда все магнитные моменты доменов ориентируются вдоль поля, то наступает состояние технического насыщения намагниченности (участок 4).

По основной кривой намагничивания определяется магнитная проницаемость для любого значения напряженности

$$\mu = \frac{e_m}{\mu_0 \cdot H_m} \quad , \qquad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

В лабораторной работе в качестве исследуемого образца используется сердечник из пермаллоя. Пермаллой представляет собой железоникелевый сплав, имеющий наибольшую магнитную проницаемость в слабых полях в ряду ферромагнитных материалов. У пермаллоев различных марок в ряду низконикелевые – высоконикелевые – суперпермаллои после термической обработки начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$ может находиться в пределах от 10^3 до 10^5, а индукция насыщения падает в этом ряду от 1,5 Тл для низконикелевых марок пермаллоя до 0,7 Тл для суперпермаллоев.

Пермаллои применяются в магнитных элементах радиоэлектронной аппаратуры, работающих в слабых постоянных и переменных полях с частотой до нескольких десятков килогерц.

3. Порядок выполнения работы

Измерения производятся на сердечнике из пермаллоя кольцевой формы с размерами *D* x *d* x *h*, где *D* – наружный диаметр; *d* – внутренний диаметр; *h* – высота сердечника.

3.1. Изучение основной кривой намагничивания

3.1.1. Регулируя величину выходного напряжения генератора, установить одно из требуемых значений напряжения U_R (см. ниже) по горизонтальной оси X осциллографа (вход канала I). Величину напряжения U_c измерить по вертикальной оси Y осциллографа (вход канала 2) между вершинами петли гистерезиса и записать значение в табл. 1. Зарисовать ПГ на кальку.

3.1.2. Аналогичным образом провести измерения для других значений напряжения U_R, каждый раз зарисовывая ПГ на ту же кальку с целью получения семейства петель гистерезиса (рис. 1).

3.1.3. Измерить и записать расстояние между вершинами петли гистерезиса в мм по горизонтали X_0 и по вертикали Y_0 при значении напряжения U_R = 3,0 В.

Таблица 1

U_R, В	U_c, В	H_m, А/м	B_m, Тл	μ	$S_{п.г.}$, мм^2	Э, Дж/кг	P, Вт/кг

Измерения проводятся при следующих значениях U_R: 0,2; 0,6; 1,0; 1,4; 1,8; 2,2; 2,6; 3,0 (В).

3.2. Изучение частотной зависимости потерь в образце

3.2.1. На генераторе установить одно из требуемых значений частоты f (см. ниже). При помощи регулятора установите ПГ так, чтобы размах петли гистерезиса по оси X составлял 3,0 В (U_R = 3,0 В). Зарисовать ПГ на кальку, измерить и записать в табл. 2 значение напряжения U_c.

Таблица 2

f, Гц	U_c, В	B_m, Тл	μ	$S_{п.г}$, мм^2	Э, Дж/кг	P, Вт/кг

3.2.2. Аналогично провести измерения на других частотах f, каждый раз зарисовывая петлю гистерезиса на кальку.

Измерения производить при следующих значениях частоты f: 80; 150; 200; 250; 300; 400; 450; 500; 550; 600 (Гц).

4. Последовательность расчета

Необходимые для расчетов число витков и размеры магнитного сердечника приведены в табл. 3.

4.1. Амплитудное значение напряженности магнитного поля в сердечнике определяется по формуле

$$H_m = \frac{I \cdot W_1}{2\pi \cdot r_{cp}} \quad , \qquad (2)$$

где I - ток в цепи, определяемый как $I = U_R/R_1$ ($R_1 = 18$ Ом);

$2\pi\, r_{cp} = 0{,}5\ \pi\ (d + D)$ - длина магнитной линии, проходящей по среднему радиусу сердечника.

Таблица 3

D, м	d, м	h, м	W_1	W_2
$3 \cdot 10^{-2}$	$1{,}8 \cdot 10^{-2}$	$1{,}1 \cdot 10^{-2}$	100	1400

4.2. Амплитудное значение магнитной индукции определяется как

$$B_m = \frac{R_2 \cdot C_1 \cdot U_c}{W_2 \cdot S} \quad , \qquad (3)$$

где $R_2 = 3 \cdot 10^5$ Ом; $C_1 = 10^{-6}$ Ф;

S – площадь поперечного сечения сердечника $S = \frac{D-d}{2} \cdot h$.

4.3. Магнитная проницаемость вычисляется по формуле (1).

4.4. Энергия Э, поглощенная в единице массы сердечника за один цикл перемагничивания, определяется по формуле

$$Э = \frac{S_{П.Г.} \cdot H_m \cdot B_m}{\rho \cdot X_0 \cdot Y_0} \quad , \qquad (4)$$

где $S_{п.г.}$ – площадь петли гистерезиса в мм^2 (ее можно определить с помощью миллиметровой бумаги);

ρ – плотность исследуемого материала (для пермаллоя $\rho = 8600$ кг/м^3).

4.5. Удельная мощность потерь на перемагничивание, P, вычисляется по формуле

$$P = Э \cdot f \quad . \qquad (5)$$

5. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Схема установки.

3. Результаты изучения основной кривой намагничивания и расчет потерь в образце должны быть оформлены в виде табл. 1 и графиков зависимостей $B_m(H_m)$, $\mu(H_m)$, $P(H_m)$.

4. Результаты изучения частотной зависимости магнитной проницаемости и потерь в образце должны быть оформлены в виде табл. 2 и графиков зависимостей $\mu(f)$, $P(f)$.

5. Краткие выводы.

Литература: [1], с. 296 … 349.

3.6.6. Лабораторная работа № 5

Исследование магнитных свойств ферритов

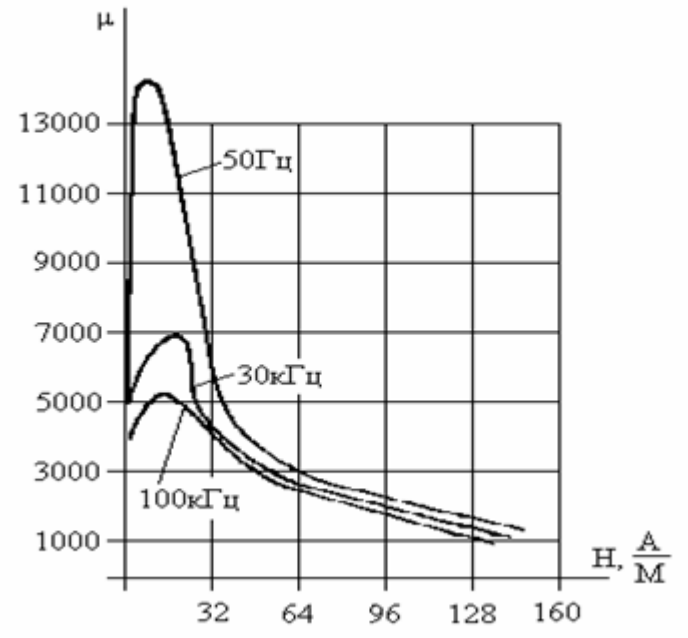


Рис.1. Зависимость магнитной проницаемости ферритов от напряженности магнитного поля на различных частотах

1. Цель работы

Изучение полевой и частотной зависимости магнитной проницаемости марганец-цинковых ферритов.

Основные теоретические положения

Ферримагнетиками называются вещества, в которых магнитные моменты атомов выстраиваются антипараллельно друг другу, причем величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой (↑↓↑↓↑↓).

К ферримагнетикам относятся ферриты. Наиболее распространенными являются соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов, имеющие структурную формулу $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me - двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu и др.).

Магнитные параметры ферритов (магнитная проницаемость μ, индукция насыщения $B_{нас}$) в постоянных и низкочастотных полях ниже соответствующих параметров металлических магнитных материалов. Зависимость магнитной проницаемости ферритов от напряженности магнитного поля на различных частотах представлена на рис.1.

Удельное электрическое сопротивление большинства ферритов в 10^6 - 10^{11} раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, что обеспечивает безусловные преимущества ферритов при работе в высокочастотном диапазоне. Вследствие этого вихревые токи в ферритах при воздействии на них переменных магнитных полей очень малы, и ферриты применяются в качестве магнитных материалов при частотах до сотен мегагерц.

Для ферримагнетиков, как и для ферромагнетиков, характерно наличие доменной структуры, и их магнитные свойства тесно связаны со строением кристаллических решеток. Так, препятствиями, мешающими свободному перемещению доменных границ при воздействии на феррит слабого магнитного поля, являются микроскопические поры, примесные включения, участки с дефектной кристаллической структурой. Устранение этих структурных барьеров позволяет существенно повысить магнитную проницаемость материала.

Большое влияние на значение начальной магнитной проницаемости оказывает размер кристаллических зерен. Марганец-цинковые ферриты с

крупнозернистой структурой могут обладать начальной магнитной проницаемостью до 20000. Это значение близко величине начальной магнитной проницаемости для лучших марок пермаллоя.

Инерционность смещения доменных границ, проявляющаяся при высоких частотах, приводит не только к росту магнитных потерь, но и к снижению магнитной проницаемости μ . Частоту $f_{гр}$, при которой начальная магнитная проницаемость уменьшается до 0,7 от ее значения в постоянном магнитном поле, называют граничной.

Принята следующая маркировка ферритов: первыми цифрами указывается значение начальной магнитной проницаемости $\mu_{нач}$, затем буква, обозначающая частотный диапазон применения (Н - низкочастотные, В - высокочастотные), далее следуют буквы, обозначающие состав: М - марганец-цинковые ферриты ($MnO\text{-}ZnO\text{-}Fe_2O_3$), Н - никель-цинковые ферриты ($NiO\text{-}ZnO\text{-}Fe_2O_3$). Марганец-цинковые ферриты имеют сравнительно малое значение удельного электрического сопротивления (ρ ~0,01 … 10 Ом · м) и применяются на частотах до 1 МГц; никель-цинковые ферриты имеют ρ ~10^4 Ом · м, применяются и как низкочастотные, и как высокочастотные (до 100 МГц).

3. Порядок выполнения работы

Измерения производятся на катушках индуктивности с сердечниками кольцевой формы из феррита марок 1000 НМ, 2000 НМ, 3000 НМ, соответственно, и размерами D x d x h, где D – наружный диаметр, d – внутренний диаметр, h – высота сердечника. Цифра в марках ферритов обозначает величину начальной магнитной проницаемости при низких частотах; первая Н – "низкочастотный"; вторая буква указывает состав феррита: М – в состав входит оксид марганца, Н – оксид никеля.

3.1. Для определения полевой зависимости магнитной проницаемости μ установить на генераторе частоту сигнала 10 кГц. Подключить измеряемый образец (см. табл. 1). Регулируя величину выходного напряжения генератора, установить одно из требуемых значений U_R. Измерить величину входного сигнала $U_{вх}$, полученные экспериментальные данные занести в табл. 1. Аналогичным образом проводить измерения для образца № 2 и № 3.

Измерения проводить при следующих значениях U_R: 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 В.

Таблица 1

Переключатель S1														
положение 6 1000 НМ					положение 5 2000 НМ					положение 4 3000 НМ				
U_R, В	$U_{вх}$, В	H_m, А/м	μ	B_m, Тл	U_R, В	$U_{вх}$, В	H_m, А/м	μ	B_m, Тл	U_R, В	$U_{вх}$, В	H_m, А/м	μ	B_m, Тл

3.2. При изучении частотной зависимости магнитной проницаемости μ измерения производятся при следующих значениях частоты: 100; 150; 200; 400; 600; 800; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 8000; 10000 кГц.

На каждой частоте сигнала следует установить напряжение U_R = 0,015 В и измерить значение входного напряжения $U_{вх}$. Данные занести в табл.2. Аналогичные измерения провести для двух других образцов.

Таблица 2

Переключатель S1								
положение 3 1000НМ, U_R = 0,015 В			положение 2 2000НМ, U_R = 0,015 В			положение 1 3000НМ, U_R = 0,015 В		
f, кГц	$U_{вх}$, В	μ	f, кГц	$U_{вх}$, В	μ	f, кГц	$U_{вх}$, В	μ

4. Последовательность расчета

Необходимые для расчетов размеры исследуемых образцов и число витков W приведены в табл. 3.

Таблица 3

Проводимое исследование μ = f(x)	Марка материала	Размеры образца,	Число витков

		D x d x h мм	обмотки *W*
Полевая зависимость	1000 НМ	10 х 6 х 3	40
$\mu = f(H_m)$	2000 НМ	10 х 6 х 3	40
	3000 НМ	10 х 6 х 3	40
Частотная зависимость	1000 НМ	10 х 6 х 3	20
$\mu = f(f)$	2000 НМ	10 х 6 х 3	20
	3000 НМ	10 х 6 х 3	20

4.1. Определить амплитудное значение напряженности магнитного поля H_m в сердечнике катушки индуктивности

$$H_m = \frac{\sqrt{2}\, I\, W}{2\pi r_{cp}} \quad , \qquad (1)$$

где $I = U_R/R_0$ (R_0 = 51Ом), I – ток в цепи;

длина магнитной линии, проходящей по среднему радиусу сердечника, $2\pi r_{cp}$, определяется по формуле

$$2\pi r_{cp} = \frac{\pi(d+D)}{2} \quad . \qquad (2)$$

4.2. Рассчитать индуктивность исследуемой катушки с использованием соотношения

$$L = \frac{U_L}{2\pi f\, I} \quad , \qquad (3)$$

где U_L – падение напряжения на индуктивности

$$U_L = \sqrt{U_{вх}^2 - U_R^2} \qquad (4)$$

4.3. Рассчитать магнитную проницаемость кольцевого сердечника μ

$$\mu = L\, \frac{2\pi r_{cp}}{\mu_0 W^2 S} \quad , \qquad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

S – площадь поперечного сечения сердечника

$$S = \frac{D-d}{2} h \quad ;$$

4.4. Определить амплитудное значение магнитной индукции

$$B_m = \mu_0\, \mu\, H_m \qquad (4)$$

5. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Результаты определения полевой и частотной зависимостей магнитной проницаемости μ (табл. 1 и 2).

3. Графики зависимостей $\mu = f(H_m)$, $B_m = f(H_m)$, $\mu = f(\lg f)$.

4. Выводы по работе.

Литература: [1], с. 296 … 349.

3.6.7. Лабораторная работа № 6

Исследование свойств нелинейных полупроводниковых сопротивлений (варисторов)

1. Цель работы

1. Исследование вольт-амперной характеристики варистора.

2. Исследование влияния структуры поликристаллического полупроводника на вольт-амперную характеристику варистора.

2. Основные теоретические положения.

Варисторы - это полупроводниковые резисторы, сопротивление которых меняется в зависимости от приложенного напряжения. Основным свойством варисторов, используемым на практике, является нелинейность вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Основой варисторов являются поликристаллические полупроводники (ПП), главным образом - оксид цинка ZnO.

Нелинейность ВАХ обусловлена электронными процессами, протекающими на границе раздела между отдельными кристаллитами (т.е. кристалликами, из которых состоит поликристаллический полупроводник), рис.1.

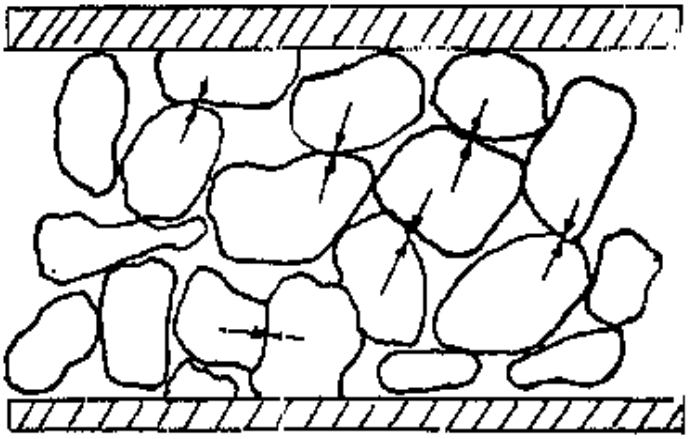


Рис.1. Схематическое изображение микроструктуры поликристаллического полупроводника (штриховкой обозначены электроды)

На границе раздела между кристаллитами существует отрицательный заряд, обусловленный адсорбцией кислородсодержащих ионов. Это приводит к искривлению энергетических зон полупроводников в обоих контактирующих кристаллитах, при этом поверхностные области являются обедненными носителями заряда (электронами) (рис. 2). Таким образом, возникает межкристаллитный потенциальный барьер (МПБ) высотой Φ_o. Для преодоления МПБ, то есть для протекания тока, электронам необходимо затратить энергию, большую, чем Φ_o.

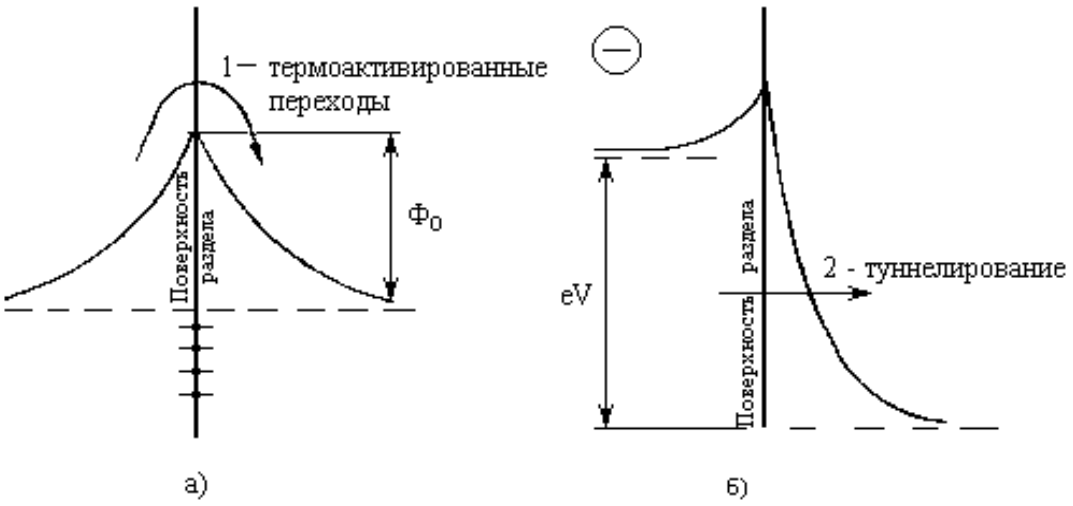


Рис. 2. Энергетические схемы межкристаллитного потенциального барьера в поликристаллическом полупроводнике в отсутствие внешнего напряжения (а) и при приложении напряжения (б) Стрелками обозначены надбарьерные (1) и туннельные электронные переходы (2).

При приложении к поликристаллическому полупроводнику внешнего электрического поля (рис.2 б), высота МПБ Φ_o уменьшается, что приводит к росту тока с увеличением напряжения на первом участке ВАХ (рис. 3). В этой области электроны преодолевают МПБ за счет термоактивированных надбарьерных перескоков (рис. 2, переходы 1).

Электрическая проводимость ПП, обусловленная электронными переходами через МПБ, определяется следующим выражением:

$$\sigma = \frac{1}{N_\delta}\sigma_{кр}\exp\left(-\frac{\Phi_.}{kT}\right), \qquad (1)$$

где $\sigma_{кр}$ – проводимость кристаллита;

N_δ – количество барьеров на пути протекания тока.

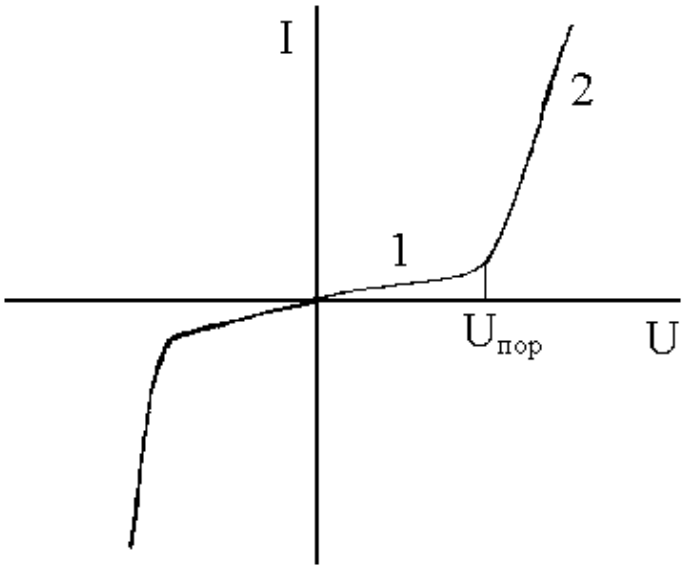


Рис.3. Вольт-амперная характеристика варистора

При приложении достаточно сильного электрического поля, межкристаллитный потенциальный барьер становится настолько узким, что оказываются возможными подбарьерные переходы электронов (рис.2, переходы 2), ВАХ варистора, приведенная на рис. 3, как видно, состоит из двух участков. В допороговой области напряжения U (при $U < U_{пор}$) электронные переходы через МПБ имеют характер классических надбарьерных перескоков, зависимость проводимости (тока) от U имеет вид $ln\sigma \sim U^{1/2}$. Для этой области характерна сильная зависимость тока от температуры.

При достижении порогового напряжения ВАХ резко усиливается, что объясняется переходом к механизму квантово-механического туннелирования электронов сквозь МПБ, который становится для этого достаточно узким. Характерным признаком этого механизма является отсутствие сильной температурной зависимости тока.

Туннельные переходы сквозь барьер приводят к резкому росту тока, обусловленному шунтированием МПБ.

Величина порогового напряжения в расчете на один МПБ в ZnO составляет 2,5–3,5 В.

Вольт-амперной характеристикой варистора можно управлять, изменяя число барьеров на пути протекания тока. Этого можно достичь путем уменьшения или увеличения размеров кристаллитов, тем самым регулируя число МПБ. Например, оксид алюминия, введенный в состав варисторной керамики, позволяет повысить скорость роста кристаллитов и увеличить их размеры, что приводит к уменьшению числа МПБ, следовательно, ВАХ сдвинется влево.

3. Порядок выполнения работы

Исследования проводятся на двух образцах, различающихся толщиной.

3.1. Провести измерения тока, протекающего через образец 1 в зависимости от приложенного напряжения. Напряжение контролировать по вольтметру стенда ЛРС-2 (деление на шкале вольтметра соответствует 10 В). Напряжение поднимать от 10 В с шагом 10 В, определить пороговое значение напряжения (по резкому росту тока). Величина напряжения, приложенного к образцу, не должна превышать 100 В.

3.2. Провести измерения тока в зависимости от напряжения при противоположной полярности приложенного напряжения, для чего повторить все действия в перевернутом, по отношению к начальному положению образца.

3.3. Снять вольт-амперную характеристику образца № 2 , отличающегося от образца № 1 толщиной. Для этого выполнить вышеуказанные действия после замены образца.

4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема измерительной установки.
3. Таблица с результатами измерений величины тока, протекающего через образец №1 в зависимости от приложенного напряжения.
4. График зависимости тока от напряжения для образца № 1. Определение величины порогового напряжения ($U_{пор}$).
5. Таблица с результатами измерений величины тока, протекающего через образец №2 в зависимости от приложенного напряжения.
6. График зависимости тока от напряжения для образца № 2. Определение величины порогового напряжения ($U_{пор}$).
7. Выводы по работе.
8. Литература: [2], с. 4 … 11.

3.6.8. Лабораторная работа № 7

Электрические свойства конденсаторов с оксидным диэлектриком

1. Цель работы

Исследование электрических свойств конденсаторов с оксидным диэлектриком в рабочем диапазоне изменения внешних параметров.

2. Основные теоретические положения

Конденсатором с оксидным диэлектриком называют конденсатор, реализующий емкость в системе металл – оксид – противоэлектрод.

Рабочим диэлектриком таких конденсаторов являются тонкие оксидные слои на поверхности базового металла (анода), получаемые посредством его электрохимического оксидирования. Анодные оксидные пленки (Ta_2O_5, Al_2O_3, Nb_2O_5), толщина которых не превышает 1 мкм, обладают высоким электроизоляционными свойствами (удельное электрическое сопротивление $\rho \geq 10^{14}$ Ом · см; электрическая прочность $E_{пр} = (3 \ldots 6) \cdot 10^{16}$ В/см) и сравнительно высокой диэлектрической проницаемостью (для Ta_2O_5 $\varepsilon = 27$; для Al_2O_3 $\varepsilon = 8 \ldots 10$; для Nb_2O_5 $\varepsilon = 41$ на частоте 1 кГц).

С целью увеличения емкости (заряда) оксидных конденсаторов поверхность металлического анода развивают, что достигается посредством изготовления анода из металлического порошка в форме объемно-пористого

тела методами порошковой металлургии или из металлической фольги, подвергнутой электрохимическому травлению.

Материалом второго электрода конденсаторов этого класса служит электролит (водный раствор серной кислоты у танталовых конденсаторов и электролиты на основе органических спиртов у алюминиевых конденсаторов) или полупроводниковая двуокись марганца (MnO_2). В пленочных оксидных конденсаторах материалом второго электрода, как правило, является пленка алюминия. Такие конденсаторы используются для интегральных микросхем и получают их в процессе единого технологического цикла производства.

В зависимости от материала противоэлектрода конденсаторы делятся на оксидно-электролитические (танталовые типа К52, алюминиевые типа К50), оксидно-полупроводниковые (типа К53) и оксидно-металлические.

Вещество противоэлектрода заполняет поры объемно-пористого тела (травленой фольги), что позволяет в большой степени реализовать в емкости площадь поверхности анода.

Сочетание высоких диэлектрических свойств оксидного диэлектрика в тонких слоях с большей площадью поверхности электрода обеспечивает конденсаторам с оксидным диэлектриком рекордно высокие удельные параметры – емкость (заряд) в расчете на единицу объема.

Другой важный параметр конденсаторов – тангенс угла потерь – составляет у оксидных конденсаторов в области звуковых частот порядка 10^{-2} и обнаруживает рост с увеличением частоты, начиная уже с 10^4 Гц. Это обусловлено вкладом в потери, наряду с диэлектрическими потерями в оксидном слое, рассеяния на сопротивление контакта, которое существенно для этих типов конденсаторов (рис. 1).

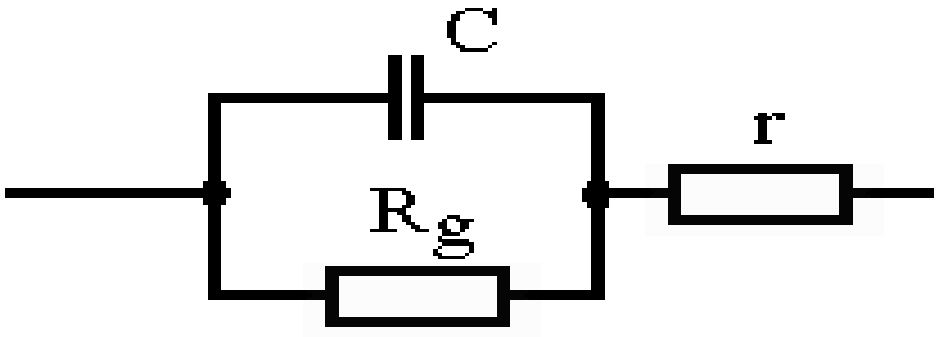


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения конденсатора:
C – емкость; Rg – сопротивление диэлектрика;

r – сопротивление электрода (контакта)

Из представленной на рис. 1 эквивалентной электрической схемы замещения конденсатора видно, что тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора tg $\delta_к$ складывается из тангенса угла потерь оксидного слоя (диэлектрика) tg $\delta_{диэл}$ и тангенса угла потерь на сопротивление электрода (контакта) tg δ_r

$$\text{tg } \delta_к = \text{tg } \delta_{диэл} + \text{tg } \delta_r \qquad (1)$$

Величина составляющей tg δ_r, обусловленной рассеянием на сопротивлении контакта, возрастает пропорционально частоте.

Поскольку оксидные конденсаторы используются, как правило, в цепях фильтрации или защиты электронных схем, важное значение имеет величина тока утечки на постоянном напряжении. Она определяется сопротивлением диэлектрика Rg и инжектирующей способностью материала противоэлектрода.

При приложении к конденсаторной структуре напряжения с полярностью, соответствующей положительному потенциалу на аноде, величина тока утечки определяется, главным образом, удельным сопротивлением оксидного диэлектрика и мала. При противоположной полярности напряжения (отрицательный потенциал на аноде) имеет место инжекция носителей заряда (протонов) из водного раствора кислоты или сорбирующего влагу пористого слоя двуокиси марганца. Избыточная концентрация носителей заряда в диэлектрике приводит к существенному повышению уровня тока, протекающего в конденсаторе при этой полярности.

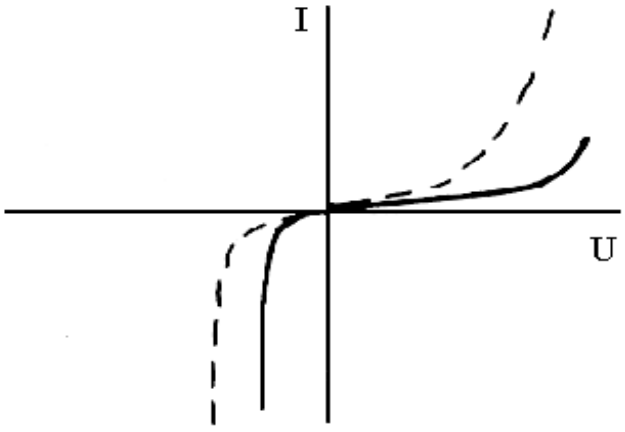


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика электролитического конденсатора (_____) и оксидно-полупроводникового конденсатора (_ _ _ _ _). Большой ток (пропускное направление) протекает в конденсаторе при приложении напряжения, полярности, соответствующей отрицательному потенциалу на аноде.

В результате вольт-амперная характеристика (ВАХ) оксидного конденсатора является асимметричной (подобной ВАХ полупроводниковых диодов) рис. 2, а сами конденсаторы могут использоваться только при одной полярности приложенного напряжения (положительный потенциал на аноде). Полярность оксидных конденсаторов существенно ограничивает область их применения.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Определить эквивалентные последовательные емкость и сопротивление конденсаторной структуры ***Ta – Ta_2O_5*** – электролит (образец № 1) на переменном сигнале частотой 100 Гц.

3.2. Снять вольт-амперную характеристику конденсаторной структуры с оксидным диэлектриком (зависимость величины тока, протекающего через структуру, от приложенного напряжения).

3.3. Снять вольт-амперную характеристику образца №2 (оксидно-полупроводниковый конденсатор).

3.4. Снять температурную зависимость величины тока, протекающего через конденсаторную систему Ta – Ta_2O_5 – электролит, (образец №1).

4. Последовательность расчета

4.1. Произвести расчет эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора

$$r = \frac{R}{2}\left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - \left(\frac{V_2}{V_2}\right)^2 - 1\right] \quad , \qquad (2)$$

где: R – сопротивление резистора (R = 500 Ом);

f – частота переменного сигнала (f = 100 Гц).

4.2. Рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь и эквивалентные параллельные емкость и сопротивление по формуле:

$$\operatorname{tg}\delta = 2\pi \cdot f \cdot r \cdot C \quad .$$

(3)

4.3. Рассчитать эквивалентную параллельную емкость по формулам:

$$C = \left(2\pi f \sqrt{R^2 \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^2 - r^2} \right)^{-1} \qquad (4)$$

$$C_{пар} = \frac{C}{1 + tg^2 \delta} \qquad (5)$$

4.4. Рассчитать эквивалентное параллельное сопротивление по формуле:

$$R_{пар} = r\left(1 + \frac{1}{tg^2 \delta} \right) \qquad (6)$$

4.5.Рассчитать диэлектрическую проницаемость ε оксидной диэлектрической пленки (Ta_2O_5) по формуле

$$\varepsilon = \frac{C\,d}{\varepsilon_0 S} \quad , \qquad (7)$$

где C – емкость конденсатора;

d – толщина диэлектрической пленки, равная $2 \cdot 10^{-5}$ см;

S – площадь электрода (для конденсатора емкостью 68 мкФ $S=6 \cdot 10^2$ см^2, для конденсатора емкостью 33 мкФ $S=3 \cdot 10^2$ см^2); $\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-14}$ Ф/см.

4.6. Рассчитать удельное сопротивление оксидной пленки по формуле

$$\rho = R_{пар} \frac{S}{d} \quad . \qquad (8)$$

5.Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Схема измерительной установки.

3. Результаты расчета эквивалентного последовательного сопротивления и емкости. Результаты расчета тангенса угла диэлектрических потерь и эквивалентных параллельных емкости и сопротивления.

4. Параметры оксидной диэлектрической пленки ($\operatorname{tg}\delta$, ε_0, ρ).

5. Таблица с результатами измерений величины тока, протекающего через образцы № 1 и № 2, в зависимости от приложенного напряжения.

6. Расчет $\rho = f(U)$.

7. Графики зависимости величины тока от приложенного напряжения (вольт-амперные характеристики) образцов № 1 и № 2, совмещенные в одних координатах.

8. Таблица с результатами измерения тока, протекающего через образец №1 при постоянном напряжении, в зависимости от температуры. График зависимости I= *f*(T).

9. Выводы.

Литература: [2], с. 12 … 45.

4. Блок контроля освоения дисциплины

4.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Блок контроля освоения дисциплины включает:

1. Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению.

Контрольная работа состоит из четырех задач. Порядок выбора конкретных вариантов задания указан в разделе «Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению».

2. Блок тестов текущего контроля.

Приводятся тесты текущего контроля по разделам курса. Они предлагаются студентам в качестве тренировочных (репетиционных). После работы с этими тестами можно проверить ответы – они приведены на стр. 158. Завершив работу с тренировочным тестом по разделу, студент должен пройти аналогичный контрольный тест. Задание для контрольного тестирования студент получает у преподавателя, либо на учебном сайте СЗТУ. Время выполнения и число попыток ответа для контрольного теста ограничены.

3. Блок итогового контроля.

Изучение дисциплины заканчивается сдачей зачета. Необходимым условием допуска к зачету является выполнение контрольной работы и цикла лабораторных работ, предусмотренных учебным планом. Вопросы для подготовки к сдаче зачета приведены в данном блоке.

4.2. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ

Контрольная работа состоит из четырех задач, условия которых приведены ниже. Конкретный вариант задания выбирается студентом по двум последним цифрам шифра. Описание каждой из задач сдержит также методические указания по ее решению.

ЗАДАЧА № 1

Для расчета предлагаются два образца полупроводникового материала: собственный полупроводник и примесный полупроводник на его основе. Собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике при комнатной температуре равна n_i; подвижность электронов - μ_n; подвижность дырок - μ_p, удельное сопротивление примесного полупроводника равно ρ.

Определить:

- отношение полного тока, протекающего через полупроводник I, к току, обусловленному электронной составляющей I_n, а также к току, обусловленному дырочной составляющей I_p, в собственном полупроводнике;
- концентрацию электронов и дырок в примесном полупроводнике;
- отношение полного тока, протекающего через полупроводник, к току, обусловленному электронной составляющей, а также к току, обусловленному дырочной составляющей, в примесном полупроводнике.

Методические указания

1. Исходные данные для конкретных вариантов задачи 1 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

	Предпоследняя цифра шифра					
	1 и 9	2 и 8	3 и 7	4 и 6	5	0
Полупроводниковый материал	n-Si	p-Si	n-Ge	p-Ge	n-GaAs	p-GaAs
μ_n, м^2/(В·с)	0,14		0,39		0,95	
μ_p, м^2/(В·с)	0,05		0,19		0,045	
n_i, м$^{-3}$	$1{,}0\cdot10^{16}$		$2{,}5\cdot10^{19}$		$6{,}6\cdot10^{12}$	

Таблица 2

	Полупроводниковый материал					
	n-Si	p-Si	n-Ge	p-Ge	n-GaAs	p-GaAs
Последняя цифра шифра	удельное сопротивление ρ, Ом·м					
1	$5{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}0\cdot10^{0}$	$1{,}0\cdot10^{-1}$	$3{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}0\cdot10^{0}$
2	$1{,}0\cdot10^{-1}$	$3{,}0\cdot10^{-1}$	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$7{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$5{,}0\cdot10^{-1}$
3	$4{,}5\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-1}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$	$1{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-1}$
4	$6{,}0\cdot10^{-3}$	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-3}$	$4{,}0\cdot10^{-3}$	$3{,}0\cdot10^{-3}$	$2{,}0\cdot10^{-2}$
5	$9{,}0\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-3}$	$4{,}0\cdot10^{-4}$	$6{,}0\cdot10^{-4}$	$4{,}0\cdot10^{-5}$	$6{,}0\cdot10^{-4}$
6	$3{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$	$3{,}0\cdot10^{-4}$
7	$2{,}0\cdot10^{-4}$	$6{,}0\cdot10^{-4}$	$7{,}0\cdot10^{-5}$	$1{,}0\cdot10^{-4}$	$4{,}0\cdot10^{-6}$	$8{,}0\cdot10^{-5}$
8	$6{,}0\cdot10^{-5}$	$1{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$	$3{,}0\cdot10^{-5}$	$2{,}0\cdot10^{-6}$	$4{,}0\cdot10^{-5}$
9	$8{,}0\cdot10^{-6}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$	$3{,}0\cdot10^{-6}$	$5{,}0\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^{-6}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$
0	$3{,}0\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^{-6}$	$7{,}0\cdot10^{-7}$	$1{,}0\cdot10^{-6}$	$9{,}0\cdot10^{-7}$	$4{,}0\cdot10^{-6}$

2. Поскольку в полупроводнике электрический ток переносится носителями заряда двух типов (электронами и дырками), полный ток представляет собой сумму двух токов: тока, обусловленного электронами (электронная составляющая) и тока, обусловленного дырками (дырочная составляющая):

$$I = I_n + I_p \,. \qquad (1)$$

3. Тогда отношение полного тока, протекающего через полупроводник, к току, обусловленному электронной составляющей, можно записать как

$$\frac{I}{I_n} = ١ + \frac{I_p}{I_n}, \qquad (2)$$

или, заменяя отношение токов отношением соответствующих электропроводностей

$$\frac{I}{I_n} = ١ + \frac{\gamma_p}{\gamma_n} \quad , \tag{3}$$

где γ_n и γ_p - вклад электронной и дырочной составляющей в электропроводность, соответственно.

4. Применительно к собственному полупроводнику, где концентрации электронов и дырок равны ($n_i = p_i$) с учетом соотношения $\gamma = e \cdot n \cdot \mu$, получим:

$$\frac{I}{I_n} = ١ + \frac{e\, p_i\, \mu_p}{e\, n_i\, \mu_n} = ١ + \frac{\mu_p}{\mu_n} \tag{4}$$

$$\frac{I}{I_p} = ١ + \frac{e\, n_i\, \mu_n}{e\, p_i\, \mu_p} = ١ + \frac{\mu_n}{\mu_p} \tag{5}$$

5. Для примесных полупроводников, в которых концентрации электронов и дырок отличаются на несколько порядков, вкладом неосновных носителей в электропроводность можно пренебречь. Тогда для полупроводника n-типа

$$\gamma = \frac{١}{\rho} = \gamma_n + \gamma_p \approx \gamma_n = e\, n_n \mu_n \quad , \tag{6}$$

откуда $n_n \approx \frac{١}{e\, \mu_n\, \rho}$, а для полупроводника p-типа $p_p \approx \frac{١}{e\, \mu_p\, \rho}$.

6. Концентрации неосновных носителей заряда: дырок в материале n-типа (p_n) и электронов в материале p-типа (n_p) рассчитываются из соотношений:

$$p_n = \frac{n_i^{٢}}{n_n} \tag{7}$$

$$n_p = \frac{n_i^{٢}}{p_p} \tag{8}$$

7. Применительно к примесному полупроводнику n-типа искомые соотношения токов принимают вид:

$$\frac{I}{I_n} = ١ + \frac{e\, p_n\, \mu_p}{e\, n_n \mu_n} = ١ + \frac{p_n\, \mu_p}{n_n\, \mu_n} \tag{9}$$

$$\frac{I}{I_p} = ١ + \frac{n_n \mu_n}{p_n \mu_p}, \tag{10}$$

а для полупроводника p-типа

$$\frac{I}{I_p} = 1 + \frac{e n_p \mu_n}{e p_p \mu_p} = 1 + \frac{n_p \mu_n}{p_p \mu_p} \qquad (11)$$

$$\frac{I}{I_n} = 1 + \frac{p_p \mu_p}{n_p \mu_n} \qquad (12)$$

ЗАДАЧА № 2

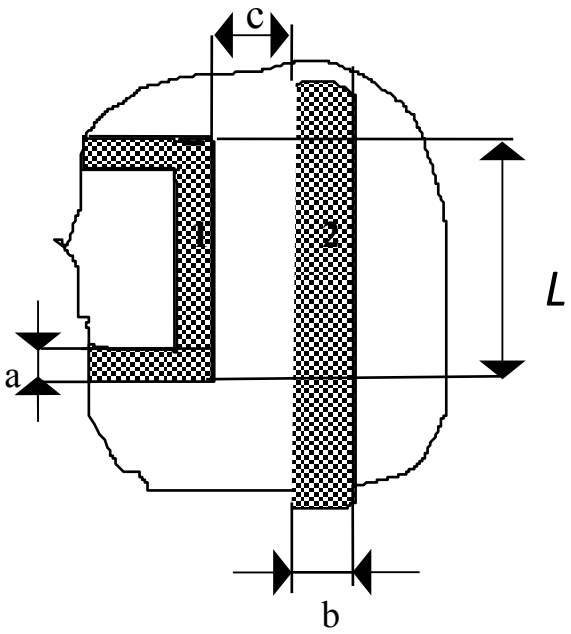


Рис. 1. Фрагмент топологии печатной платы к задаче № 2

Для печатной платы, фрагмент топологии которой приведен на рис. 1, определить:

- сопротивление изоляции между проводниками 1 и 2;
- максимальную величину тока $I_{1\,max}$, который может быть пропущен по проводнику 1, если проводники имеют толщину δ, а допустимая плотность тока на прямолинейных участках проводников равна $j_{доп.}$;
- падение напряжения ΔU и выделяющуюся мощность ΔP на участке проводника 2 длиной L при прохождении по нему максимального по величине допустимого тока.

Методические указания

1. Исходные данные для конкретных вариантов задачи 2 приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

	Предпоследняя цифра шифра	
	1, 2, 3, 4, 5	6, 7, 8, 9, 0
Материал основания печатной платы	гетинакс	стеклотекстолит
Удельное поверхностное сопротивление ρ_s, Ом	10^8	10^9

Таблица 4

	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Материал проводников	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
Толщина проводников δ, мкм	10	20	30	40	50	30	30	40	30	50
Линейные размеры проводников, мм:										
a	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0
b	2,0	2,5	3,0	2,0	2,5	3,0	2,0	2,5	3,0	2,0
c	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0
L	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10
Допустимая плотность тока $j_{доп}$, А/мм^2	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10

2. Сопротивление изоляции $R_{из}$ между проводниками 1 и 2 рассчитывается по формуле

$$R_{из} = \rho_S \cdot \frac{c}{L},$$

где ρ_S - удельное поверхностное сопротивление материала печатной платы;

c, L - линейные размеры проводящего рисунка печатной платы, (рис. 1).

3. Максимальная величина тока, который может быть пропущен по проводнику 1, определяется из соотношения

$$I_{1\max} = J_{доп} \cdot S_1,$$

где S_1 - площадь поперечного сечения проводника 1:

$$S_1 = a \cdot \delta \quad .$$

4. Падение напряжения ΔU и выделяющаяся мощность ΔP на участке проводника 2 длиной L при прохождении по нему максимального по величине допустимого тока рассчитываются с использованием формул:

$$\Delta U = I_{2\max} \cdot R,$$

$$\Delta P = \Delta U \cdot I_{2\max},$$

где $I_{2\max}$ - максимальная величина тока, который может быть пропущен по проводнику 2 (рассчитывается аналогично $I_{1\max}$);

R - сопротивление участка проводника 2 длиной L:

$$R = \frac{\rho_{мет} \cdot L}{S_2};$$

S_2 - площадь поперечного сечения проводника 2:

$$S_2 = b \cdot \delta;$$

$\rho_{мет}$ - удельное сопротивление материала проводника:

$\rho_{алюминия}$ = 0,028 ом · мм^2/м;

$\rho_{меди}$ = 0,0175 ом · мм^2/м.

ЗАДАЧА № 3

Для плоского конденсатора с зарядом Q, имеющего металлические обкладки площадью S, расположенные на расстоянии d друг от друга и разделенные слоем материала с диэлектрической проницаемостью ε, определить:

- емкость;
- удельную емкость;
- разность потенциалов между обкладками;
- напряженность электрического поля в диэлектрике;
- энергию, запасенную в конденсаторе;
- плотность запасенной в конденсаторе энергии.

Методические указания

1. Исходные данные для конкретных вариантов задачи 3 приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Последняя цифра шифра	Материал диэлектрика	Диэлектрическая проницаемость	Толщина диэлектрика, мкм
1	Политетрафторэтилен	2	1000
2	Окись алюминия	10	0,2
3	Керамика на основе титаната циркония	40	100
4	Поликарбонат	3	10
5	Пятиокись ниобия	41	0,05
6	Керамика на основе титаната бария	9000	10
7	Ультрафарфор	8,2	6
8	Керамика на основе ниобата свинца	30000	3
9	Слюда	7	1000
0	Пятиокись тантала	27	0,01

Таблица 6

	Предпоследняя цифра шифра				
	1 и 2	3 и 4	5 и 6	7 и 8	9 и 0
Площадь электродов,м^2	$1{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-5}$	$1{,}0\cdot10^{-6}$	$4{,}0\cdot10^{-8}$	$1{,}0\cdot10^{-10}$
Материал диэлектрика	Заряд конденсатора, Кл				
Политетрафторэтилен	$1{,}8\cdot10^{-8}$	$4{,}4\cdot10^{-11}$	$1{,}7\cdot10^{-12}$	$7{,}0\cdot10^{-14}$	$1{,}8\cdot10^{-16}$
Окись алюминия	$4{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$	$4{,}4\cdot10^{-8}$	$1{,}8\cdot10^{-9}$	$4{,}4\cdot10^{-12}$
Керамика на основе титаната циркония	$3{,}5\cdot10^{-6}$	$8{,}8\cdot10^{-9}$	$3{,}5\cdot10^{-10}$	$1{,}4\cdot10^{-11}$	$3{,}5\cdot10^{-14}$
Поликарбонат	$2{,}6\cdot10^{-6}$	$6{,}6\cdot10^{-9}$	$2{,}6\cdot10^{-10}$	$1{,}1\cdot10^{-11}$	$2{,}6\cdot10^{-14}$
Пятиокись ниобия	$7{,}3\cdot10^{-3}$	$1{,}8\cdot10^{-5}$	$7{,}3\cdot10^{-7}$	$2{,}9\cdot10^{-8}$	$7{,}3\cdot10^{-11}$
Керамика на основе титаната бария	$8{,}0\cdot10^{-3}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$	$8{,}0\cdot10^{-7}$	$3{,}2\cdot10^{-8}$	$8{,}0\cdot10^{-11}$
Ультрафарфор	$1{,}2\cdot10^{-5}$	$3{,}0\cdot10^{-8}$	$1{,}2\cdot10^{-9}$	$4{,}8\cdot10^{-11}$	$1{,}2\cdot10^{-13}$
Керамика на основе ниобата свинца	$8{,}9\cdot10^{-2}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$8{,}9\cdot10^{-6}$	$3{,}5\cdot10^{-7}$	$8{,}9\cdot10^{-10}$
Слюда	$6{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}6\cdot10^{-10}$	$6{,}2\cdot10^{-12}$	$2{,}5\cdot10^{-13}$	$6{,}2\cdot10^{-16}$
Пятиокись тантала	$2{,}4\cdot10^{-2}$	$6{,}0\cdot10^{-5}$	$2{,}4\cdot10^{-6}$	$9{,}6\cdot10^{-8}$	$2{,}4\cdot10^{-10}$

1. Емкость конденсатора $\boldsymbol{C}$ определяется по формуле емкости для плоского конденсатора с однослойным диэлектриком

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

где $\boldsymbol{\varepsilon_0}$ – диэлектрическая постоянная вакуума ($\boldsymbol{\varepsilon_0} = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м).

2. Удельная емкость конденсатора и плотность запасенной в конденсаторе энергии определяются в расчете на единицу активного объема диэлектрика $V_{диэл}$:

$$V_{диэл} = S \cdot d .$$

4. Разность потенциалов между обкладками конденсатора U рассчитывается с использованием формулы, соответствующей физическому определению электрической емкости

$$C = \frac{Q}{U},$$

где Q - заряд конденсатора.

5. Напряженность электрического поля в диэлектрике конденсатора E определяется как разность потенциалов между его обкладками, отнесенная к толщине диэлектрика

$$E = \frac{U}{d}.$$

6. Запасенная в конденсаторе энергия W определяется исходя из заряда конденсатора и напряжения между его обкладками

$$W = \frac{Q \cdot U}{2}.$$

ЗАДАЧА № 4

Определить максимальное напряжение, которое можно приложить при температуре T_1 к миниатюрному резистору сопротивлением $R_{ном} \pm \Delta R$, работающему на частоте f = 50 Гц, если допустимая мощность рассеяния резистора равна P, температурный коэффициент сопротивления резистора α_R, а постоянное предельное напряжение, выше которого происходит поверхностный пробой, равно $U_{пр}$.

Методические указания

1. Исходные данные для конкретных вариантов задачи 4 приведены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

	Предпоследняя цифра шифра				
	1 и 2	3 и 4	5 и 6	7 и 8	9 и 0
T_0, °C	20	20	20	20	20
T_1, °C	120	100	85	150	160
P, мВт	125	62,5	250	12,5	25

Таблица 8

Последняя цифра шифра	$R_{ном}$, Ом	ΔR, %	α_R, $10_{-6}/{}_oC$	$U_{пр}$, В
1	100	±5	+200	50
2	120	±10	+200	100
3	$2 \cdot 10^3$	±20	+50	50
4	$5{,}1 \cdot 10^3$	±5	-100	100
5	$1{,}8 \cdot 10^4$	±10	-500	50
6	$3{,}0 \cdot 10^5$	±20	-500	100
7	$7{,}2 \cdot 10^5$	±10	-1500	50
8	$1{,}0 \cdot 10^6$	±20	-1500	100
9	$2{,}0 \cdot 10^6$	±10	-2000	50
0	$4{,}8 \cdot 10^6$	±20	-2000	100

2. Чтобы ответить на поставленный в задаче вопрос, необходимо определить максимальное рабочее напряжение, выше которого наступает тепловой пробой резистора, и сравнить полученную величину с предельным напряжением, выше которого происходит поверхностный пробой.

3. Максимальное рабочее напряжение, выше которого наступает тепловой пробой резистора, определяется из соотношения

$$U_{тепл} = \sqrt{P_{доп} \cdot R_{\min}} \quad ,$$

где $R_{\min}$ - минимальное значение, которое может принимать сопротивление резистора.

3. Для определения значения $R_{\min}$ следует сравнить минимальное значение сопротивления резистора при комнатной температуре $R_{T_0}^{\min}$ и при температуре T_1 - $R_{T_1}^{\min}$:

$$R_{T_1}^{\min} = R_{ном} - \Delta R \quad ,$$

$$R_{T_1}^{\min} = R_{T_2}^{\min}\left(1 + \alpha_R\left(T_1 - T_2\right)\right)$$

и выбрать минимальное из них.

4.3. ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ

Текущий контроль уровня знаний осуществляется с использованием тестирования. Тест по каждой теме дисциплины содержит 5 вопросов. Для подготовки к тестированию студентам предлагаются тренировочные тесты.

ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТЫ

Тест № 1 (по теме 1.1)

1. К материалами, для которых характерен ковалентный тип химической связи, относятся

a – поликристаллы;

b – все вещества в твердом состоянии;

c – металлы;

d – полупроводники.

2. Отличие реальных кристаллов от идеальных состоит в

a – более сложной структуре;

b – меньших размерах;

c – наличии дефектов;

d – отсутствии дефектов.

3.Энергетический спектр электронов в твердом теле

a – имеет зонную структуру;

b – отсутствует;

c – непрерывен;

d – дискретен.

4. Дефекты типа «вакансия» в реальных кристаллах относятся к

a – точечным дефектам;

b – объемным дефектам;

c – дефектам поверхности;

d – линейным дефектам.

5. Классификация материалов электронной техники основана на таких понятиях, как

a – состав – структура – свойства;

b – состав – агрегатное состояние;

c – способ получения – свойства;

d – структура – состав.

Тест № 2 (по теме 1.2)

1. Основными носителями заряда в полупроводнике p-типа являются

a – электроны и дырки;

b – ионы примеси;

c – дырки;

d – электроны.

2. В собственных полупроводниках свободные носители заряда образуются за счет

a – генерации электронно-дырочных пар;

b – рекомбинации электронно-дырочных пар;

c – ионизации атомов примеси;

d – ионизации атомов основы.

3. Основным материалом современной полупроводниковой микроэлектроники является

a – германий;

b – кремний;

c – арсенид галлия;

d – фосфид индия.

4 . Для введения примеси в полупроводник применяют

a – фотолитографию;

b – диффузионное или ионное легирование;

c – вакуумное напыление.

5. Неосновные носители заряда в полупроводнике n-типа

a – электронейтральны;

b – заряжены отрицательно;

c – заряжены положительно;

d – заряжены отрицательно или электронейтральны.

Тест № 3 (по теме 1.3)

1. К проводникам относят материалы с удельной электропроводностью

a – выше, чем 10^6 $Ом^{-1}$ $см^{-1}$;

b – 10^3…10^4 $Ом^{-1}$ $см^{-1}$;

c – выше, чем 10^3 $Ом^{-1}$ $см^{-1}$;

d – выше, чем 10^8 $Ом^{-1}$ $см^{-1}$.

2. Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры является

a – экспоненциальной;

b – параболической;

c – линейной;

d – гиперболической.

3.Удельное сопротивление большинства металлов при понижении температуры:

a – стремится к бесконечной величине;

b – падает и стремится к некоторому остаточному значению;

c – падает до 0;

d – существенно не изменяется.

4. Металлический тип химической связи обусловлен

a – взаимным притяжением электронного газа и положительно заряженных ионов металла;

b – притяжением противоположно заряженных ионов;

c – обобществлением электронов, принадлежащих двум соседним атомам;

d – обобществлением электронов, принадлежащих четырем соседним атомам.

5. Основными компонентами резистивных силицидных сплавов являются

a – кремний, золото;

b – олово, железо;

c – кремний, алюминий;

d – кремний, хром, железо.

Тест № 4 (по теме 1.4)

1. Механизмом спонтанной поляризации обладают:

a – сегнетоэлектрики;

b – пироэлектрики;

c – пьезоэлектрики;

d – органические диэлектрики.

2. Тангенс угла диэлектрических потерь является мерой

a – потерь энергии в диэлектрике за счет наличия остаточной электропроводности;

b – теплоемкости диэлектрика;

c – теплопроводности диэлектрика;

d – электропроводности диэлектрика.

3. Эффект спонтанной поляризации был впервые обнаружен на образце, изготовленном из

a – бериллиевой керамики;

b – титаната бария;

c – титаната стронция;

d – сегнетовой соли.

4. В качестве материала оснований печатных плат используются

a – слоистые пластики;

b – керамика;

c – легкоплавкие стекла;

d – ситаллы.

5. Тепловой пробой в диэлектрике возникает, если

a – количество тепловой энергии, выделяемой за счет диэлектрических потерь, превышает рассеиваемое;

b – количество тепловой энергии, выделяемой за счет диэлектрических потерь, равно рассеиваемому;

c – диэлектрик находится в постоянном электрическом поле;

d – диэлектрик находится в среде с повышенной влажностью.

Тест № 5 (по теме 1.5)

1. Если атомные магнитные моменты в веществе ориентированы параллельно друг другу, то оно является

a – ферромагнетиком;

b – парамагнетиком;

c – парамагнетиком или ферромагнетиком;

d –парамагнетиком или антиферромагнетиком.

2. Для конкретного магнитного материала форма петли гистерезиса не зависит от

a – объема образца;

b – скорости перемагничивания;

c – исходного магнитного состояния материала;

d – максимального значения напряженности магнитного поля.

3. Под коэрцетивной силой магнитного материала понимают

a – напряженность магнитного поля, соответствующую обратимому смещению границ доменов;

b – силу воздействия магнитного поля на домены;

c – напряженность магнитного поля, необходимую для уменьшения магнитной индукции до нуля;

d – напряженность магнитного поля, соответствующую максимальной магнитной энергии.

4. При температурах выше точки Кюри ферромагнетик превращается в

a –парамагнетик;

b – ферримагнетик;

c – антиферромагнетик.

5. Ферриты являются магнитными материалами, относящимися к

a – ферро- либо диамагнетикам;

b – ферромагнетикам;

c – диамагнетикам;

d – ферримагнетикам.

Тест № 6 (по теме 1.6)

1. Термореактивные материалы относятся к:

a – пространственным полимерам;

b– линейным полимерам;

c – объемным полимерам;

d – низкомолекулярным соединениям.

2. Ультрафарфор является

a – низкочастотным диэлектриком;

b – высокочастотным диэлектриком;

c – высокочастотной стеклокерамикой;

d – низкочастотной стеклокерамикой.

3. Электроизоляционные материалы представляют собой

a – условно активные диэлектрики;

b – активные диэлектрики;

c – пассивные диэлектрики;

d – пассивные, либо активные диэлектрики.

4. Если полимер при комнатной температуре находится в стеклообразном состоянии, то

a – температура его стеклования ниже комнатной;

b – температура его стеклования выше комнатной;

c – это кристаллический полимер;

d – это рекристаллизованный полимер.

5. Роль окисных пигментов в рецептуре эмалевых покрытий состоит в

a – повышении коррозионной стойкости и электрической прочности;

b – окрашивании в требуемый цвет;

c – повышении герметизирующих свойств;

d – улучшении кроющей способности.

Тест № 7 (по теме 2.1)

1. Вольт-амперная характеристика является параметром радиокомпонента, устанавливающим связь между

a – емкостью и напряжением;

b – током и поляризацией;

c –напряжением и током;

d – током и сопротивлением.

2. Элемент (L, C, R), параметры которого не изменяются с изменением тока или напряжения, называется

a – линейным;

b – пропорциональным;

c – активным;

d – многофункциональным.

3. Если на вход линейного элемента поступает одновременно несколько напряжений, то общий ток

a – равен сумме токов, обусловленных каждым из напряжений;

b – определяется наибольшим из приложенных напряжений;

c – определяется наименьшим из приложенных напряжений.

4. Математической моделью, описывающей зависимость тока, протекающего через постоянный резистор, от напряжения, является

a – закон Кирхгофа;

b – закон Ома;

c – полином второй степени;

d – полином третьей степени.

5. Компоненты, способные усиливать, генерировать или преобразовывать входной электрический сигнал, относятся к

a – активным;

b – пассивным;

c – активным, либо пассивным.

Тест № 8 (по теме 2.2)

1. Емкость конденсатора измеряется в

a – омах;

b – вольтах;

c – фарадах;

d – ваттах.

2. К числу основных характеристик конденсатора относится

a – температурный коэффициент сопротивления;

b – тангенс угла диэлектрических потерь;

c – коэффициент усиления;

d – коэффициент поглощения.

3. Недостатком оксидных конденсаторов является

a – узкий диапазон реализуемых значений емкости;

b – большие габариты;

c – низкая термостабильность;

d – значительная величина тока утечки.

4. В конструкции оксидных конденсаторов для повышения емкости применяются

a – объемно-пористые аноды;

b – цилиндрические вывода;

c – обкладки из драгоценных металлов;

d – редкоземельные металлы и сплавы.

5. Конденсаторы на основе титаната бария являются

a – высокочастотными;

b - низкочастотными;

c – не имеют частотных ограничений в применении.

Тест № 9 (по теме 2.3)

1. Для изготовления толстопленочных резисторов применяют

a – легкоплавкие стекла;

b – стеклоэмали;

c – специальные пасты;

d – металлическую фольгу.

2. Пленочный резистор с сопротивлением 2 кОм и коэффициентом формы 20 изготавливают из пленки с R_s, равным

a – 100 Ом;

b – 1 кОм;

c – 40 кОм;

d – 10 Ом.

3. К преимуществам тонкопленочных резисторов по сравнению с толстопленочными относится

a – возможность использования более дешевого оборудования;

b – более высокая адгезия слоев;

c – более высокие значения рассеиваемой мощности;

d – более высокая точность реализуемых значений сопротивления.

4. К основным элементам конструкции любого резистора относятся:

a – токонесущая часть, выполненная из резистивного материала, и основание;

b – обкладки и контактные площадки;

c – пластмассовый корпус и вывода;

d – сердечник и защитное покрытие.

5. Под коэффициентом формы пленочного резистора понимают

a – отношение длины резистивного слоя к его ширине;

b – отношение ширины резистивного слоя к его длине;

c – отношение квадрата длины резистивного слоя к ширине резистора;

d – сумму длины и ширины резистора.

Тест № 10 (по теме 2.4)

1. Пассивные микросборки – это разновидность интегральных микросхем, в которых

a – используются конденсаторы только в чиповом исполнении;

b – активные элементы отсутствуют, а функции пассивных ЭРЭ выполняют интегральные пленочные элементы или чиповые дискретные компоненты;

c – основанием служит пластина из полупроводникового материала;

d – содержится не более пяти пассивных элементов или компонентов.

2. Переход от дискретных пассивных компонентов к их микросборкам позволяет

a – улучшить тепловой режим эксплуатации аппаратуры;

b – снизить затраты на проектирование изделий;

c – повысить надежность аппаратуры;

d – отказаться от использования драгоценных металлов.

3. Существенным преимуществом пассивных микросборок является

a – широкая номенклатура;

b – отсутствие в составе активных компонентов;

c – негорючесть;

d – однородность характеристик входящих в их состав однотипных элементов.

4. Пассивные микросборки могут изготавливаться:

a – только по тонкопленочной технологии;

b – только по толстопленочной технологии;

c – как по тонко- , так и по толстопленочной технологии.

5. Для формирования элементов толстопленочных микросборок используется

a – трафаретная печать с последующим вжиганием нанесенных слоев;

b – газофазное осаждение;

c – вакуумное напыление с последующей фотолитографией;

d – электрохимическое осаждение.

Тест № 11 (по теме 2.5)

1. У катушек индуктивности сопротивление переменному току

a – не зависит от частоты;

b – возрастает пропорционально частоте;

c – уменьшается с ростом частоты ;

d – с ростом частоты стремится к нулю.

2. Основой для обмотки соленоида служит

a – цилиндрический каркас из диэлектрического материала;

b – тороидальный сердечник с прямоугольным сечением;

c – печатная плата;

d – магнитный сердечник с круглым или прямоугольным сечением.

3. Значение добротности катушек индуктивности находится в пределах

a – от 300 до 10000;

b – от 20 до 1000;

c – от 8000 до 10000;

d – от 1 до 100.

4. При использовании в магнитопроводах магнитомягких сталей и сплавов (с малым удельным сопротивлением) для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник собирают из

a – пластин высоколегированных сталей ;

b – ферритовых стержней;

c – тонких листов ферромагнетика, покрытых слоем изоляции;

d – листов редкоземельных металлов и сплавов на их основе.

5. Магнитопроводы из магнитомягких сталей, сплавов или ферритов, образующих замкнутую магнитную цепь, используют в трансформаторах с целью

a – увеличения индуктивной связи между обмотками;

b – снижения массогабаритных показателей;

c – повышения надежности трансформаторов;

d – повышения технологичности трансформаторов.

ПРАВИЛЬНЫЕ ОТВЕТЫ НА ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТЫ

№ теста	Раздел	Тема	Номера вопросов				
			1	2	3	4	5
			Правильные ответы				

1	1	1.1	d	c	a	a	a
2		1.2	c	a	b	b	c
3		1.3	d	c	b	a	d
4		1.4	a	a	d	a	a
5		1.5	a	a	c	a	d
6		1.6	a	a	c	a	b
7	2	2.1	c	a	a	b	a
8		2.2	c	b	d	a	b
9		2.3	c	a	d	a	a
10		2.4	b	c	d	c	a
11		2.5	b	a,d	b	c	a

4.4. ИТОГОВЫЙ КОНТРОЛЬ

Вопросы для подготовки к зачету

1. Классификация материалов РЭА по области их применения: материалы элементной базы, электротехнические, конструкционные. Основные подходы при выборе материала конструкции.
2. Какие материалы используются для изготовления резисторов по толстопленочной технологии ?
3. Особенности металлической химической связи и зонная структура металлов. Физические причины высокой электропроводности металлов. Зависимость электропроводности металлов и сплавов от температуры.
4. Механизм спонтанной поляризации. Сегнетоэлектрики. Особенности строения сегнетоэлектриков и их основные свойства.
5. Механические свойства металлов и сплавов. Закон Гука, деформация. Предел прочности, предел текучести. Твердость материала.
6. Основные требования к диэлектрическим материалам керамических конденсаторов в зависимости от диапазона рабочих температур и частот.
7. С какой целью в эмалевые покрытия вводятся пигменты ?
8. Магнитотвердые материалы. Основные представители. Свойства. Применение в РЭА.

9. Электропроводность диэлектриков в постоянном электрическом поле. Удельное объемное и поверхностное сопротивление. Ток утечки.
10. Какие недостатки и ограничения в применении присущи стеклам как конструкционным материалам ?
11. Сплавы конструкционного назначения на основе железа (стали). Углеродистая сталь, легированная сталь, стали особого назначения. Их механические и технологические свойства.
12. Виды керамики, используемой в производстве РЭА.
13. Рассчитать электрическую прочность печатной платы из стеклотекстолита толщиной 0,5 мм, если напряжение пробоя составляет 15 кВ.
14. Сплавы на основе титана. Преимущества применения титановых сплавов в РЭА.
15. На каких преимуществах кремния основано его широкое применение в микроэлектронике ?
16. Алюминий и его сплавы. Классификация алюминиевых сплавов по технологическим свойствам.
17. С какой целью проводится легирование полупроводников?
18. Полупроводники на основе соединений типа $A^{III}B^{V}$. Их основные свойства, преимущества и ограничения практического применения.
19. Проводниковые материалы. Температурная зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов.
20. По каким параметрам выбирается материал диэлектрического основания печатной платы для работы в высокочастотном и СВЧ-диапазонах ?
21. Материалы высокой проводимости (медь, алюминий). Их электрические свойства и применение.
22. Перечислите материалы, используемые в качестве подложек гибридных интегральных схем и обоснуйте выбор материала подложки ГИС для СВЧ-диапазона.
23. Какие диэлектрические материалы используются в качестве рабочих диэлектриков керамических конденсаторов?
24. Сплавы высокого электросопротивления: манганин, константан, нихром.

25. Органические диэлектрики конденсаторных структур.
26. Выберите из предложенного ряда материалов изоляционный материал для эксплуатации в условиях ухудшенного теплоотвода: полиимид, полиэтилен, фторопласт, керамика.
27. Виды поляризации диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость. Влияние внешних факторов (температуры и частоты) на величину и характер изменения диэлектрической проницаемости.
28. Основные недостатки и достоинства алюминия как материала металлизации интегральных схем.
29. Диэлектрические потери. Тангенс угла диэлектрических потерь. Материалы с малыми и повышенными диэлектрическими потерями.
30. Проблема совместимости материалов. По какому параметру определяется способность стекла к соединению с другими материалами при сварке?
31. Какие процессы происходят на электрическом контакте медь – алюминий? Что является катализатором этих процессов и каковы меры защиты таких контактов?
32. Металлопленочные материалы резисторов интегральных схем.
33. Термопластичные и термореактивные полимеры. Особенности строения. Свойства и применение.
34. Каким образом рассчитывается толщина изоляции, если известно рабочее напряжение и электрическая прочность диэлектрика?
35. Пробой диэлектриков. Виды и механизмы пробоя: электрический пробой, тепловой и электрохимический пробой. Электрическая прочность диэлектрика.
36. Технологические свойства стекол и их применение в электронной технике.
37. Как соотносятся величины удельного сопротивления и температурного коэффициента удельного сопротивления металлов и сплавов?
38. Ненаполненные пластмассы – термопласты. Механические и технологические свойства. Основные представители.

39. Материалы диэлектрических оснований печатных плат. Основные требования к материалам, критерии оценки качества печатных плат.
40. Какие цели достигаются при легировании полупроводников?
41. Пластмассы с наполнителями. Их механические и технологические свойства. Основные представители. Материалы диэлектрических оснований печатных плат.
42. Что такое стеклокерамика и какие ее свойства находят практическое применение в РЭС.
43. Керамика. Исходные материалы для получения. Виды конструкционной керамики. Применение в РЭС.
44. Основные требования, предъявляемые к резистивным материалам.
45. Обоснуйте выбор материала печатной платы для ее эксплуатации в условиях сильных вибрационных нагрузок.
46. Качественные особенности полупроводников с точки зрения зонной теории. Собственные и примесные полупроводники.
47. Рутиловая керамика. Какие свойства рутиловой керамики позволяют использовать ее в качестве диэлектрика конденсаторов высокочастотного диапазона?
48. Материалы подложек тонкопленочных гибридных интегральных схем.
49. Неорганические полупроводники с кристаллической структурой: германий, кремний. Особенности строения, легирующие примеси, электрические свойства и область применения.
50. Какие факторы влияют на емкость конденсатора и определяют напряжение пробоя конденсаторного диэлектрика?
51. Собственные и примесные полупроводники. Зависимость их свойств от состава, структуры и внешних факторов. Температурная зависимость электропроводности примесных полупроводников.
52. Какой электрический параметр диэлектрика является основным при выборе материалов печатных плат для различных частотных диапазонов?
53. Определите понятие температурного коэффициента удельного сопротивления.
54. Что собой представляют дроссели?

55. Какие типы катушек индуктивности существуют?

56. От каких факторов зависит индуктивность катушки?

57. Какие основные функции выполняют катушки индуктивности в электрических схемах?

58. Для каких целей применяются в электрических цепях импульсные катушки индуктивности?

Содержание

1. Информация о дисциплине 3

1.1. Предисловие 3

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы 4

1.2.1. Содержание дисциплины по ГОС 4

1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы 5

1.2.3. Перечень видов практических занятий и контроля 5

2. Рабочие учебные материалы. 6

2.1. Рабочая программа 6

2.2. Тематический план дисциплины 11

2.2.1. Тематический план дисциплины для студентов очно-заочной формы обучения. 11

2.2.2. Тематический план дисциплины для студентов заочной формы обучения. 12

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты» 13

2.4. Временной график изучения дисциплины при использовании информационно-коммуникационных технологий 14

2.5. Практический блок. 15

2.5.1. Лабораторный практикум. 15
2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний 16
3. Информационные ресурсы дисциплины 17
3.1. Библиографический список 17
3.2. Опорный конспект 18
Введение 18
Раздел 1. Радиоматериалы 19
1.1. Классификация радиоматериалов 20
1.2. Полупроводниковые материалы. 25
1.3. Проводниковые материалы 39
1.4. Диэлектрические материалы 52
1.5. Радиоматериалы с магнитными свойствами 65
1.6. Основные конструкционные материалы РЭС. 79
Раздел 2. Радиокомпоненты . . . . . .
82
2.1. Линейные и нелинейные пассивные радиокомпоненты. 83
2.2. Электрические конденсаторы. 84
2.3. Резисторы 84
2.4. Пассивные микросборки 85
2.5. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы,
линии задержки 86
Заключение 86
3.3. Учебное пособие 86
3.4. Глоссарий (краткий словарь терминов) 87
3.5. Технические средства обеспечения дисциплины. 96
3.6. Методические указания к выполнению лабораторных работ 97
4. Блок контроля освоения дисциплины 136
4.1. Общие указания 136
4.2. Задание на контрольную работу и методические указания
к ее выполнению 136

4.3. Текущий контроль 147
4.4. Итоговый контроль 159

Адер Анна Ильинична
Денисова Ольга Витальевна
Ханин Самуил Давидович

Радиоматериалы и радиокомпоненты

Учебно-методический комплекс

Редактор Т.В. Шабанова