

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. Е. Ломоносов

ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛЫ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине для обучающихся по направлениям
11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника,
11.03.03 - Конструирование и технология электронных средств,
11.03.01 - Радиотехника,
11.03.02 - Инфокоммуникационные технологии и системы связи,
11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы
очной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2024

УДК 621.318.1+621.38(075.8)
ББК 32.843я73
Л753

Р е ц е н з е н т:

Н. В. Шевченко – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электронная техника»

Ответственный за выпуск:

Ю. П. Михайлюк – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой
«Электронная техника»

Ломоносов, Сергей Евгеньевич

Л753 Электрорадиоматериалы : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине для обучающихся по направлениям 11.03.04 – Электроника и наноэлектроника, 11.03.03 – Конструирование и технология электронных средств, 11.03.01 – Радиотехника, 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы очной и заочной форм обучения / С.Е. Ломоносов ; Севастопольский государственный университет. – Севастополь : СевГУ, 2024. – 41 с. – Текст : электронный.

Целью методических рекомендаций является оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в изучении дисциплины «Электрорадиоматериалы», в выполнении лабораторных работ по курсу дисциплины, а также получении теоретических и практических навыков в выборе электрорадиоматериалов при разработке и эксплуатации современных радиотехнических и радиоэлектронных устройств.

УДК 621.318.1+621.38(075.8)
ББК 32.843я73

Учебно-методическое пособие утверждено на заседании кафедры «Электронная техника», протокол № 5 от 26 января 2024 года.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	5
1.1. Краткая теория.....	5
1.1.1. Относительная диэлектрическая проницаемость	5
1.1.2. Температурный коэффициент ёмкости.....	6
1.1.3. Электрическая проводимость диэлектрика	7
1.1.4. Пробой диэлектрика.....	8
1.1.5. Диэлектрические потери	8
1.1.6. Угол диэлектрических потерь.....	9
1.2. Цель и содержание работы	9
1.3. Порядок выполнения работы	9
1.3.1. Задание 1.1. Определение температурного коэффициента ёмкости батареи.....	9
1.3.2. Задание 1.2. Определение относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика	10
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДНИКОВ.....	12
2.1. Краткая теория.....	12
2.1.1. Электропроводность материалов	12
2.1.2. Единица измерения удельной электропроводности	12
2.1.3. Электропроводность металлов	13
2.1.4. Деформация проводников	14
2.2. Цель и содержание работы	14
2.3. Порядок выполнения работы	14
2.3.1. Задание 2.1. Расчет диаметра проволоки по сопротивлению.....	14
2.3.2. Задание 2.2. Расчет деформации проволоки	16
2.3.3. Задание 2.3. Расчет расстояния от источника напряжения до места повреждения изоляции	17
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	19
3.1. Краткая теория.....	19
3.1.1. Электропроводность полупроводников.....	19
3.1.2. Основные характеристики и свойства полупроводниковых материалов	19
3.1.3. Основные полупроводниковые материалы	21
3.1.4. Органические полупроводники.	21
3.2. Цель и содержание работы	22
3.3. Порядок выполнения работы	22
3.3.1. Задание 3.1. Определение контактной разности потенциалов проводников при различных температурах.....	22
3.3.2. Задание 3.2. Определение контактной разности потенциалов для различных значений подвижности электронов и дырок.....	23

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ.....	25
4.1. Краткая теория.....	25
4.1.1. Классификация магнитных материалов.....	25
4.1.2. Основные характеристики магнитных материалов.....	26
4.2. Цель и содержание работы.....	27
4.3. Порядок выполнения работы.....	27
4.3.1. Задание 4.1. Выбор материала обмотки.....	27
4.3.2. Задание 4.2. Выбор материала сердечника.....	28
4.3.3. Задание 4.3. Обзор медных проводов с изоляцией.....	29
4.3.4. Задание 4.4. Оценка влияния размагничивающего фактора.....	30
4.3.5. Задание 4.5. Влияние температуры окружающей среды на магнитную проницаемость.....	31
4.3.6. Задание 4.6. Нахождение магнитного потока, индуцируемого в магнитопроводе катушкой.....	32
5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ.....	35
5.1. Краткая теория.....	35
5.1.1. Виды наноматериалов.....	35
5.1.2. Нанотехнологии в атомной энергетике.....	36
5.1.3. Наноразмерные гетероструктуры.....	36
5.1.4. Фуллерены.....	36
5.1.5. Углеродные нанотрубки.....	37
5.2. Цель и содержание работы.....	37
5.3. Порядок выполнения работы.....	38
5.3.1. Задание 5.1 Расчёт давления в сферическом фуллерене.....	38
5.3.2. Задание 5.2 Определение толщины биомембраны.....	38
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	40

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Краткая теория

Электроизоляционные материалы окружают и отделяют друг от друга токоведущие части электрических устройств, элементы схемы или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Изоляция обкладок конденсаторов позволяет получать требуемые значения электрической ёмкости.

Для изоляции применяют газы, жидкости и твёрдые вещества. По химическому составу электроизоляционные материалы подразделяют:

- на органические,
- элементоорганические,
- неорганические.

Твёрдые материалы классифицируют на основе особенностей их строения. Это полимеры и эластомеры (каучуки), волокна (пропитанные), лаки и компаунды, стёкла, кристаллы и плёнки, а также композиции диэлектриков волокнистого и кристаллического строения с аморфным связующим.

Рассмотрим наиболее важные параметры и характеристики диэлектрических материалов, с точки зрения их применения для решения проектных и конструкторских задач в радиоэлектронике [12].

1.1.1. Относительная диэлектрическая проницаемость

Для количественной оценки степени поляризации диэлектрика в электрическом поле используют относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_a (величина безразмерная). По ГОСТ Р 52002-2003 относительная диэлектрическая проницаемость – величина, равная отношению диэлектрической проницаемости вещества к электрической постоянной $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(В·м):

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0}, \quad (1.1)$$

где ϵ_a – это абсолютная диэлектрическая проницаемость, характеризующая диэлектрические свойства вещества

Электрическое смещение – векторная величина, равная геометрической сумме напряжённости электрического поля в рассматриваемой точке, умноженной на электрическую постоянную, и поляризованности в той же точке [6].

С физической точки зрения, относительная диэлектрическая проницаемость характеризует ёмкостную способность (свойство накапливать энергию) диэлектрика и показывает, во сколько раз больше ёмкость данного материала по сравнению с воздухом при одинаковых условиях.

На практике часто используют абсолютную диэлектрическую проницаемость, например, при расчёте ёмкости плоского конденсатора:

$$C = \epsilon_a \frac{S}{d}, \quad (1.2)$$

где S – площадь одной из обкладок конденсатора, м²;

d – расстояние между обкладками, м.

Из формулы видно, что в конденсаторах целесообразно применять материалы с наибольшей относительной диэлектрической проницаемостью. Наоборот, диэлектрическая проницаемость материалов, применяемых для изоляции, должна иметь наименьшее значение, так как её увеличение ведёт к увеличению ёмкости, а значит – к увеличению ёмкостного тока.

1.1.2. Температурный коэффициент ёмкости

Конденсаторы, как и резисторы, являются одним из наиболее массовых элементов электронных цепей. Электрические характеристики, конструкция и область их применения зависят от типа диэлектрика между его обкладками. По виду диэлектрика конденсаторы постоянной ёмкости можно подразделить на пять групп:

- с газообразным диэлектриком (воздушные, газонаполненные, вакуумные);
- с жидким диэлектриком;
- с твёрдым неорганическим диэлектриком (керамические, стеклокерамические, стеклоэмалевые, стеклопленочные, тонкослойные из неорганических плёнок, слюдяные);
- с твёрдым органическим диэлектриком (бумажные, металлобумажные, фторопластовые, полиэтиленфталатные);
- с оксидным диэлектриком (электролитические, оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические), выполняемые с использованием алюминия, титана, ниобия, сплавов тантала и ниобия.

У конденсаторов различают номинальное $C_{\text{ном}}$ и фактическое $C_{\text{ф}}$ значения ёмкости. Номинальная ёмкость указывается на его маркировке в сопроводительной документации; фактическая – это значение ёмкости, измеренное при данной температуре и определённой частоте.

Допускаемое отклонение ёмкости обычно задаётся в процентах:

$$\Delta C_{\text{ном}} = \frac{C_{\text{ф}} - C_{\text{ном}}}{C_{\text{ном}}} 100\%. \quad (1.3)$$

Изменения значения ёмкости в зависимости от температуры характеризуются **температурным коэффициентом ёмкости** (ТКЕ), который иногда обозначают α_C :

$$\alpha_C = \text{ТКЕ} = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT}. \quad (1.4)$$

Этот коэффициент показывает изменение ёмкости при изменении на 1 К температуры окружающей среды. В зависимости от материала диэлектрика ТКЕ может быть положительным, нулевым или отрицательным. Его значение, определённое на конкретной частоте, указывается в маркировке конденсатора с помощью букв и цифр или цветного кода. По допускаемому отклонению ТКЕ от нормированного значения конденсаторы подразделяются на два класса: А и Б. У класса А отклонение в 2,0 - 2,5 раза меньше, чем у класса Б. При необходимости получить определённое значение ТКЕ применяют последовательное, параллельное и смешанное соединения конденсаторов с разными номиналами и разными ТКЕ. При параллельном соединении конденсаторов ТКЕ полученной результирующей ёмкости С находят из уравнения

$$\alpha_c = \frac{c_1}{c} \alpha_{c_1} + \frac{c_2}{c} \alpha_{c_2} + \dots + \frac{c_m}{c} \alpha_{c_m}. \quad (1.5)$$

При последовательном соединении – из уравнения

$$\alpha_c = \frac{c}{c_1} \alpha_{c_1} + \frac{c}{c_2} \alpha_{c_2} + \dots + \frac{c}{c_m} \alpha_{c_m}. \quad (1.6)$$

Подбирая номиналы и **ТКЭ**, а также комбинируя последовательное и параллельное соединения, можно обеспечить нулевой **ТКЭ**, что применяется при создании измерительных конденсаторов.

1.1.3. Электрическая проводимость диэлектрика

В техническом диэлектрике всегда есть небольшое количество свободных электронов, которые под действием приложенного к диэлектрику не изменяющегося во времени электрического напряжения создают в нём ток утечки. Постоянная составляющая тока утечки диэлектрика называется **сквозным током диэлектрика**.

Сквозной ток способен проходить как по поверхности твёрдого диэлектрика, соприкасающейся с газообразным или жидким диэлектриком (поверхностный сквозной ток диэлектрика), так и через весь его объём (объёмный сквозной ток диэлектрика). В связи с этим, имеют различия два вида электрической проводимости диэлектриков и два вида электрического сопротивления [8].

Объёмная электрическая проводимость диэлектрика – это электрическая проводимость диэлектрика, равная отношению объёмного сквозного тока к приложенному напряжению.

Поверхностная электрическая проводимость диэлектрика – это электрическая проводимость диэлектрика, равная отношению поверхностного сквозного тока к приложенному напряжению.

Для определения поверхностного и объёмного сопротивления диэлектрика используют понятия удельного поверхностного сопротивления диэлектрика и удельного объёмного сопротивления диэлектрика.

Удельное объёмное сопротивление твёрдого диэлектрика ρ_v численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, если ток проходит через две противоположные грани этого куба:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{d}, \quad (1.7)$$

где R_v – объёмное сопротивление диэлектрика;

S – площадь электрода, м²;

d – толщина образца, м.

Удельное поверхностное сопротивление диэлектрика (ρ_s) численно равно сопротивлению участка поверхности твёрдого диэлектрика в форме квадрата при протекании электрического тока между двумя противоположными сторонами этого квадрата (рис. 1.1):

$$\rho_s = R_s \frac{l}{d}, \quad (1.8)$$

где R_s – поверхностное сопротивление диэлектрика, Ом;

l – длина электродов, м;

d – расстояние между электродами, м.

1.1.4. Пробой диэлектрика

Диэлектрики, находясь в электрическом поле, не могут выдерживать неограниченно большое электрическое напряжение. При повышении напряжения до некоторой определённой величины диэлектрик теряет свои электрофизические свойства. Это явление носит название **пробоя диэлектрика**.

Пробивное напряжение ($U_{пр}$) – это минимальное, приложенное к диэлектрику электрическое напряжение, приводящее к его пробую.

Пробивное напряжение при медленном увеличении приложенного к диэлектрику напряжения называется **статическим пробивным напряжением диэлектрика**. Пробивное напряжение при воздействии на диэлектрик импульсов электрического напряжения называется **импульсным пробивным напряжением диэлектрика**. Для определения способности (свойства) диэлектрика противостоять пробую используют **электрическую прочность**.

Электрической прочностью диэлектрика называется минимальная напряжённость однородного электрического поля, приводящая к пробую. Электрическая прочность диэлектрика определяется как отношение пробивного напряжения к толщине диэлектрика:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}, \quad (1.9)$$

где $U_{пр}$ – пробивное напряжение, В;

d – толщина диэлектрика, м.

Для оценки степени соответствия пробивного напряжения выбранного диэлектрика прикладываемому к нему напряжению используют **коэффициент запаса электрической прочности диэлектрика** – это величина, равная отношению пробивного напряжения диэлектрика к номинальному значению электрического напряжения [8].

1.1.5. Диэлектрические потери

Диэлектрики, помещённые в электрическое поле, рассеивают определённую часть энергии. Мощность, выделяющаяся в диэлектрике при воздействии на него электрического поля, называется – **диэлектрическими потерями**.

Выделяют следующие виды диэлектрических потерь:

- диэлектрические потери на электропроводность – это часть диэлектрических потерь, обусловленная сквозным током диэлектрика;
- ионизационные диэлектрические потери – это часть диэлектрических потерь, обусловленная ионизацией диэлектрика в электрическом поле;
- релаксационные диэлектрические потери – это часть диэлектрических потерь, обусловленная релаксационной диэлектрической дисперсией;
- резонансные диэлектрические потери – это часть диэлектрических потерь, обусловленная резонансной диэлектрической дисперсией;
- гистерезисные диэлектрические потери – это часть диэлектрических потерь, обусловленная переориентацией доменов диэлектрика.

Диэлектрическая дисперсия – явление изменения относительной диэлектрической проницаемости при изменении частоты приложенного электрического поля. В зависимости от того, как изменяется относительная диэлектри-

ческая проницаемость выделяют релаксационную и резонансную диэлектрические дисперсии.

Релаксационная диэлектрическая дисперсия – при которой относительная диэлектрическая проницаемость монотонно снижается с ростом частоты.

Резонансная диэлектрическая дисперсия – при которой в частотной характеристике относительной диэлектрической проницаемости имеются как участки понижения, так и участки повышения её значения.

1.1.6. Угол диэлектрических потерь

В качестве характеристики диэлектрических потерь, позволяющей сравнить качество диэлектриков используют понятие **тангенса угла диэлектрических потерь** $\operatorname{tg}\delta$.

Угол диэлектрических потерь – угол между векторами плотностей переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости [16].

Диэлектрические потери зависят от температуры и влажности диэлектрика (с их повышением потери в диэлектрике увеличиваются). для оценки потерь в диэлектрике, также, используют **коэффициент диэлектрических потерь** – это величина, равная произведению относительной диэлектрической проницаемости на тангенс угла диэлектрических потерь.

1.2. Цель и содержание работы

Целью лабораторной работы является расчёт основных параметров диэлектрических материалов.

Лабораторная работа состоит из двух заданий.

- 1) Определение температурного коэффициента ёмкости батареи.
- 2) Определение относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика.

Математические расчеты проводятся в удобной для студента программной среде.

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Задание 1.1. Определение температурного коэффициента ёмкости батареи

Постановка задачи

Батарея состоит из последовательного соединения двух конденсаторов с ёмкостями C_1 и C_2 и температурными коэффициентами α_1 и α_2 соответственно.

Определить температурный коэффициент ёмкости батареи (α_Σ).

Исходные данные к заданию 1.1 приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Исходные данные к выполнению задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_1 , пФ	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
C_2 , пФ	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
α_1 , К ⁻¹	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
α_2 , К ⁻¹	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
C_1 , пФ	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
C_2 , пФ	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
α_1 , К ⁻¹	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
α_2 , К ⁻¹	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C_1 , пФ	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
C_2 , пФ	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
α_1 , К ⁻¹	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
α_2 , К ⁻¹	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$

Порядок выполнения задания 1.1

1) Написать выражение для результирующей ёмкости батареи и рассчитать C_Σ полученное путём последовательного соединения двух конденсаторов ёмкостью C_1 и C_2 .

2) Рассчитать C'_Σ с учетом приращения емкости на 1 К, где

$$\begin{aligned} C'_1 &= C_1 + \alpha_1 C_1, \\ C'_2 &= C_2 + \alpha_2 C_2. \end{aligned} \quad (1.10)$$

3) Используя формулу

$$\alpha_\Sigma = \frac{dC_\Sigma}{C_\Sigma dT}, \quad (1.11)$$

взять производную от C_Σ по T , или иначе

$$\alpha_\Sigma = \frac{\Delta C_\Sigma}{C_\Sigma \Delta T} = \frac{C'_\Sigma - C_\Sigma}{C_\Sigma}. \quad (1.12)$$

1.3.2. Задание 1.2. Определение относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика

Постановка задачи

При повышении температуры окружающей среды до t_1 градусов относительно нормальной ($t_0 = 20^\circ\text{C}$) относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика увеличилась до значения ϵ_2 .

Определить относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_1 при нормальной температуре, если температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости равен ТК ϵ .

Исходные данные к заданию 2.1 приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Исходные данные к выполнению задания 1.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, ^\circ\text{C}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
ε_2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\text{TK}\varepsilon \cdot 10^{-3}$	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_1, ^\circ\text{C}$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
ε_2	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$\text{TK}\varepsilon \cdot 10^{-3}$	4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$t_1, ^\circ\text{C}$	125	130	140	150	200	205	210	215	220	225
ε_2	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$\text{TK}\varepsilon \cdot 10^{-3}$	5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9

Порядок выполнения задания 1.2

1) Написать выражение, связывающие относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика ε_2 с температурой окружающей среды t_1 при заданном значении температурного коэффициента относительной диэлектрической проницаемости $\text{TK}\varepsilon$.

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 [1 + \text{TK}\varepsilon (t_1 - t_0)]. \quad (1.13)$$

- 1) Решить уравнение (1.13) относительно ε_1 .
- 2) Построить график зависимости относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика ε_2 от температуры.
- 3) Сделать выводы.

Лабораторная работа № 2

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДНИКОВ

2.1. Краткая теория

2.1.1. Электропроводность материалов

Электропроводность – это физическая величина, которая описывает, насколько хорошо определённый материал проводит электричество [10].

Существует три различных формульных обозначения удельной электропроводности [12]:

- σ (греч. сигма),
- k (каппа),
- γ (гамма).

Формула электропроводности, также называемой **удельной электропроводностью**, описывается формулой:

$$\sigma = 1/\rho. \quad (2.1)$$

Здесь ρ называется **удельным сопротивлением**.

Электрическое сопротивление R проводника с учетом его параметров следующим образом:

$$R = (\rho \cdot l)/S, \quad (2.2)$$

где ρ – удельное сопротивление,

l – длина проводника,

S – площадь поперечного сечения.

Также полезно знать, что **электрическая проводимость** G проводника выражается следующим образом: $G=1/R$.

Если в верхнюю формулу (2.2.) подставить удельную электропроводность σ и электрическую проводимость G , то получится следующее:

$$1/G = (1/\sigma) (l/S) \quad (2.3).$$

Путем дальнейшего преобразования можно получить выражение:

$$G = \sigma S/l. \quad (2.4)$$

С помощью электропроводности можно также описать важную зависимость между плотностью электрического J тока и напряженностью электрического поля E с помощью выражения:

$$J = \sigma E. \quad (2.5)$$

2.1.2. Единица измерения удельной электропроводности

Единицей удельной электропроводности σ в СИ является [13]:

$$[\sigma]=1 \text{ См/м (Сименс на метр)}.$$

Эти единицы определяются по формуле

$$G = \sigma \cdot S/l. \quad (2.6)$$

Если решить эту формулу в соответствии с σ , то получим

$$\sigma = G \cdot l/S. \quad (2.7)$$

Единица измерения электрической проводимости G задается как:

$$[G]=1/\sigma=1 \text{ См (Сименс, международное обозначение: S)}.$$

Если теперь ввести в формулу все единицы измерения, то получится:

$$[\sigma]=1 \text{ См} \cdot 1 \text{ м} / \text{м}^2 = 1 \text{ См} / \text{м}.$$

В зависимости от количества свободно перемещающихся электронов один материал проводит лучше, чем другой. В принципе, любой материал является проводящим, но в изоляторах, например, протекающий электрический ток ничтожно мал, поэтому здесь мы говорим о непроводниках.

2.1.3. Электропроводность металлов

В металлических связях валентные электроны, т.е. крайние электроны в атоме, свободно подвижны. Они расположены в так называемой полосе проводимости. Находящиеся там электроны образуют так называемый электронный газ. Соответственно, металлы являются сравнительно хорошими проводниками. Если теперь подать электрическое напряжение на металл, валентные электроны медленно движутся к положительному полюсу, потому что он их притягивает [13].

Для большинства веществ уже известны значения удельной электропроводности. Некоторые из них вы можете найти в таблице 2.1. Все значения в этой таблице действительны для комнатной температуры, т.е. 25°C.

Таблица 2.1 - Таблица удельной электропроводности некоторых веществ при температуре 25 °C

Вещество	Удельная электропроводность, См / м
Серебро	$62 \cdot 10^6$
Медь	$58 \cdot 10^6$
Золото	$45,2 \cdot 10^6$
Алюминий	$37,7 \cdot 10^6$
Вольфрам	$19 \cdot 10^6$
Латунь	$15,5 \cdot 10^6$
Железо	$9,93 \cdot 10^6$
Нержавеющая сталь (W№. 1,4301)	$1,36 \cdot 10^6$
Кремний (легирование $<10^{-12}$)	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Морская вода	примерно 5
Водопроводная вода	примерно 0,05
Дистиллированная вода	$5 \cdot 10^{-6}$
Изолятор	обычно $<10^{-8}$

Удельная электропроводность сильно зависит от температуры, поэтому указанные значения применимы только при 25 °C [6]. При повышении температуры вибрация решетки в веществе становится выше. Это нарушает поток электронов, и поэтому электропроводность уменьшается с ростом температуры.

Из таблицы видно, что медь имеет вторую по величине электропроводность, поэтому медные кабели очень часто используются в электротехнике. Серебро обладает еще более высокой проводимостью, но стоит намного дороже меди.

Интересно также сравнение между морской и дистиллированной водой. Здесь электропроводность возникает благодаря растворенным в воде ионам. Морская вода имеет очень высокую долю соли, которая растворяется в воде.

Эти ионы передают электрический ток. В дистиллированной воде нет растворенных ионов, поэтому в ней практически не может протекать электрический ток. Поэтому электропроводность морской воды намного выше, чем дистиллированной.

2.1.4. Деформация проводников

Деформация – это любые изменения структуры, формы, размеров тел [11]. Она происходит под влиянием напряжений – сил, которые действуют на единицу площади сечения заготовок или деталей. Деформация металла обусловлена:

- внешними силами;
- усадкой;
- структурными превращениями;
- внутренними физико-механическими процессами.

Под нагрузкой F следует понимать максимальную силу, действующую вдоль оси проволоки, при которой последняя не проявляет признаков разрушения (уменьшения диаметра). Предельно допустимую нагрузку, при которой проволока еще не разрушается, характеризуют пределом текучести σ_S , который обычно берется из справочника или других источников.

Примеры прилагаемых к телу нагрузок [11]:

- *сжатие* – нагрузка прикладывается соосно по направлению к телу;
- *растяжение* – возникает при продольном от тела приложении нагрузки (соосно или параллельно плоскости, в которой находятся точки крепления тела);
- *изгиб* – нарушение прямолинейности главной оси тела;
- *кручение* – возникает при приложении к телу крутящего момента.

Механизм и виды деформирования изучаются материаловедением, физикой твердого тела, кристаллографией.

2.2. Цель и содержание работы

Целью лабораторной работы является расчёт основных параметров проволоки.

Лабораторная работа состоит из трех заданий.

- 1) Расчет диаметра проволоки по сопротивлению.
- 2) Расчет деформации проволоки.
- 3) Расчет расстояния от источника напряжения до места повреждения изоляции.

Математические расчеты проводятся в удобной для студента программной среде.

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1. Задание 2.1. Расчет диаметра проволоки по сопротивлению

Постановка задачи

К проволоке длиной l , m выдвигается требование по максимальному сопротивлению R , Om .

Определить:

- минимальный диаметр проволоки из латуни Л60;
 - минимальный диаметр проволоки из латуни Л80;
 - минимальный диаметр проволоки из чистой меди.
- Исходные данные представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 - Исходные данные к работе

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, H	34,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39,5	40,5	41,5	42,5	43,5
$\sigma_{S \text{ Л60}}, \text{ МПа}$	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470
$\sigma_{S \text{ Л80}}, \text{ МПа}$	290	293	296	299	302	305	308	311	314	317
$R, \text{ Ом}$	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3
$k_{\text{Л60}}$	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21
$k_{\text{Л80}}$	0,55	0,551	0,552	0,553	0,554	0,555	0,556	0,557	0,558	0,559
$l, \text{ м}$	100	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
F, H	44,5	45,5	46,5	47,5	48,5	49,5	50,5	51,5	52,5	53,5
$\sigma_{S \text{ Л60}}, \text{ МПа}$	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570
$\sigma_{S \text{ Л80}}, \text{ МПа}$	320	323	326	329	332	335	338	341	344	347
$R, \text{ Ом}$	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3
$k_{\text{Л60}}$	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31
$k_{\text{Л80}}$	0,56	0,561	0,562	0,563	0,564	0,565	0,566	0,567	0,568	0,569
$l, \text{ м}$	200	220	230	240	250	260	270	280	290	300
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
F, H	54,5	55,5	56,5	57,5	58,5	59,5	60,5	61,5	62,5	63,5
$\sigma_{S \text{ Л60}}, \text{ МПа}$	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670
$\sigma_{S \text{ Л80}}, \text{ МПа}$	350	353	356	359	362	365	368	371	374	377
$R, \text{ Ом}$	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3
$k_{\text{Л60}}$	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41
$k_{\text{Л80}}$	0,57	0,571	0,572	0,573	0,574	0,575	0,576	0,577	0,578	0,579
$l, \text{ м}$	300	320	330	340	350	360	370	380	390	400

Порядок выполнения задания 2.1

1) Из справочных материалов определяем удельную электропроводность меди σ_m .

2) Относительная электропроводность латуни:

– латуни Л60 – для $k_{\text{Л60}} = \sigma_{60}/\sigma_m$;

– латуни Л80 $k_{\text{Л80}} = \sigma_{80}/\sigma_m$.

Осуществляем расчет σ_{60} и σ_{80} для относительно чистой меди (Л60 и Л80).

3) Находим удельное сопротивление ρ_{60} , ρ_{80} и ρ_m из формулы

$$\sigma = 1/\rho. \quad (2.8)$$

4) Рассчитываем требуемый диаметр по сопротивлению d_{R60} , d_{R80} и $d_{Rм}$ из формулы

$$R = (\rho \cdot l) / S, \quad (2.9)$$

где R – сопротивление отрезка проволоки;

ρ – удельное сопротивление (по справочным данным);

l – длина проводника;

S – площадь сечения.

5) Исходя из требований по сопротивлению определяется диаметр проволоки d_R из расчётного S .

6) Результаты расчёта внести в таблицы 1.3.

Таблица.1.3 - Результаты расчета диаметра проволоки

Материал	Диаметр проволоки по сопротивлению d_R , м	Диаметр проволоки по пределу текучести d_σ , м	Выбор диаметра, м
Латунь Л60			
Латунь Л80			
Медь			

7) Построить графики зависимости сопротивления провода от его сечения.

8) Сделать выводы.

2.3.2. Задание 2.2. Расчет деформации проволоки

Постановка задачи

Проволока, не претерпевая пластической деформации, должна выдержать нагрузку F , Н. Сопротивление – одного метра этой проволоки должно быть не более R , Ом. Плотность сплава линейно зависит от содержания цинка. Предел текучести для латуни Л60 $\sigma_{S \text{ Л60}}$, Па, для латуни Л80 $\sigma_{S \text{ Л80}}$, Па, для меди σ_{Cu} , 220 МПа.

Определить:

– наименьший диаметр $d_{\min}$ проволоки, изготовленной из латуней Л60, Л80, из чистой меди.

– какая проволока окажется наиболее экономически выгодной.

Исходные данные представлены в таблице 1.2.

Результаты расчетов внести в таблицу 1.3.

Порядок выполнения задания 1.2.

1) Из формулы

$$\sigma_S = \frac{F}{S} \quad (2.10)$$

находим требуемое сечение проволоки S .

2) По формуле

$$S = \pi r^2 \quad (2.11)$$

рассчитываем радиус.

3) Проведя элементарные преобразования определяем наименьший диаметр d_{min} проволоки при котором не претерпевается пластическая деформация (выдерживается требуемая нагрузка).

4) Определить стоимости проволоки и осуществить окончательный выбор материала проволоки при котором удовлетворяются требования по сопротивлению, прочности стоимости. Результаты внести в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Результаты расчета относительной стоимости одного метра проволоки

Материал	Плотность, гр/см ³	Относительная стоимость, 1 см ³	Стоимость одного метра, руб.	Окончательный выбор проволоки, тип
Латунь Л60				
Латунь Л80				
Медь				

5) Построить графики зависимости S от предела текучести вещества.

6) Сделать выводы.

2.3.3. Задание 2.3. Расчет расстояния от источника напряжения до места повреждения изоляции

Постановка задачи

В двухпроводной линии электропередачи, на одном конце которой находится источник постоянного напряжения, а с другой подключена нагрузка с сопротивлением R (50 Ом), повредила изоляция, в результате чего ток в источнике вырос в n_1 раза, а ток в нагрузке упал в n_2 раз.

Определить на каком расстоянии x от источника произошло повреждение изоляции, если удельное сопротивление единицы длины проводящих проводов равно ρ_1 , а длина линии электропередачи равна L .

Исходные данные приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Исходные данные к расчету расстояния до места повреждения изоляции

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n_1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
n_2	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n_1	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
n_2	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
n_1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n_2	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

Порядок выполнения задания 2.3.

1) Нарисовать электрическую схему линии электропередачи с указанием предполагаемого места повреждения изоляции.

2) До повреждения изоляции ток в линии электропередачи рассчитывается по

$$I = \frac{U}{R + 2L\rho_1}. \quad (2.12)$$

Тогда, если изоляция повреждена на расстоянии x от источника напряжения, то

$$\frac{I}{n_2} (R + 2(L - x)\rho_1) = U - n_1 I \cdot 2x\rho_1. \quad (2.13)$$

Удельное сопротивление единицы длины проводов ρ_1 определяется по формуле

$$\rho_1 = (\rho \cdot l) / S \quad (2.14)$$

где ρ – удельное сопротивление материала из которого изготовлен провод (данные из Задания 2.2),

l – длина провода (данные из Задания 2.2), 1 м.

3) Подставляем n_1 и n_2 в выражение для I .

4) Приходим к решению (получение выражения предоставить)

$$x = \frac{(n_2 - 1) \cdot (R + 2 \cdot L \cdot \rho_1)}{2\rho_1 \cdot (n_2 n_1 - 1)}. \quad (2.15)$$

5) Построить графики зависимости x от n_1 и n_2

6) Сделать выводы.

Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Краткая теория

К полупроводникам относятся вещества, занимающие по величине удельной электрической проводимости промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Их удельная электрическая проводимость лежит в пределах от 10^{-8} до 10^5 см/м и в отличие от металлов она возрастает с ростом температуры. Полупроводники представляют собой достаточно многочисленную группу веществ. К ним относятся химические элементы: германий, кремний, бор, углерод, фосфор, сера, мышьяк, селен, серое олово, теллур, йод, некоторые химические соединения и многие органические вещества [2].

3.1.1 Электропроводность полупроводников

У полупроводников между валентной зоной и зоной проводимости имеется запрещённая зона. При температуре абсолютного нуля и в отсутствие внешнего воздействия их валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости свободна от электронов. К полупроводникам условно относят вещества с шириной запрещённой зоны $\Delta W_i = 0,05 - 3,0$ эВ.

Электропроводность в полупроводниках обуславливается электронами. Она называется **электронной электропроводностью** или электропроводностью *n*-типа. В данном случае электроны, создающие ток, принадлежат атомам самого полупроводника, а не атомам примеси, поэтому такую электропроводность называют собственной [5].

Отсутствие в атоме электрона в результате перехода его в зону проводимости получило название дырки (в атоме). Электрический же ток, образующийся при движении дырок, называют дырочным током. Электропроводность, обусловленная этим дырочным током, называется дырочной электропроводностью или электропроводностью *p*-типа.

3.1.2. Основные характеристики и свойства полупроводниковых материалов

Свойства полупроводников характеризуются следующими параметрами:

- ширина запрещённой зоны;
- концентрация носителей тока;
- удельное электрическое сопротивление;
- температурный коэффициент уд. сопротивления;
- подвижность носителей;
- время жизни неосновных носителей;
- фотопроводимость;
- люминесценция;
- термоэлектрические явления; и др. [2].

Ширина запрещённой зоны

Ширина запрещённой зоны у моноатомных полупроводников тем больше, чем меньше период или число оболочек в атоме, т.е. чем сильнее электроны

связаны с ядром. Поэтому можно считать, что она зависит в основном от природы химической связи в твёрдом теле, определяет энергию образования пары носителей: электрон-дырка. С шириной запрещённой зоны однозначно связано сопротивление p - n -перехода при нормальной температуре. Энергия ионизации примеси и ширина запрещённой зоны могут быть найдены из измерений электропроводности или постоянной Холла в зависимости от температуры.

Концентрация носителей заряда

Концентрация носителей заряда в полупроводниках является важной физической величиной, определяющей электропроводность, теплопроводность, термо- э.д.с., фотопроводимость [1].

В невырожденном полупроводнике произведение концентраций свободных электронов и дырок при термодинамическом равновесии есть постоянная величина, равная квадрату собственной концентрации при данной температуре. Физически это означает, что если, например, в полупроводнике n -типа увеличить концентрацию доноров, то возрастёт число электронов, переходящих в единицу времени с примесных уровней в зону проводимости. Соответственно возрастает скорость рекомбинации носителей заряда и уменьшится равновесная концентрация дырок.

Электропроводность полупроводника

Как известно, удельная электропроводность X определяется концентрацией и подвижностью носителей тока:

$$X = qn\mu, \quad (3.1)$$

где q – заряд носителя, К,

n – число носителей в м^3 ,

μ – подвижность в $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Выражение для электропроводности собственного полупроводника имеет вид:

$$X = X_0 e^{-\Delta E_0 / 2 kT}, \quad (3.2)$$

где $X_0 = \text{const}$.

По наклону прямой находим ширину запрещённой зоны. Если примеси и основные атомы решётки полупроводника поставляют носители тока, то общая электропроводность примесного полупроводника будет состоять из суммы отдельных электропроводностей, собственной и примесной:

$$X = X_0 e^{-\Delta E_{0\text{соб}} / 2 kT} + X_{01} e^{-\Delta E_{0\text{пр}} / 2 kT}. \quad (3.3)$$

Поскольку $\Delta E_{0\text{соб}} \gg \Delta E_{0\text{пр}}$, при низких температурах примесная проводимость преобладает над собственной.

Подвижность носителей тока

Подвижность носителей тока является одним из важных параметров полупроводника. Она определяет величину электропроводности, свойства полупроводниковых приборов, такие, как инерционность, частотные характеристики и др. Движение электронов и дырок в условиях действия на них электрического напряжения может быть охарактеризовано скоростями их при данной напряженности электрического поля E в полупроводнике. Скорость, с которой электроны или дырки перемещаются под действием электрического поля, характе-

ризуется их подвижностью, которая определяется как средняя скорость переноса носителей в электрическом поле единичной напряженности. Подвижность дырок существенно меньше подвижности электронов. Причина этого различия – в механизме перемещения свободных электронов и дырок.

3.1.3. Основные полупроводниковые материалы

Полупроводники составляют обширную область материалов, отличающихся друг от друга большим многообразием электрических и физических свойств, а также большим многообразием химического состава, что и определяет различные назначения при их техническом использовании. По химической природе современные полупроводниковые материалы можно распределить на следующие четыре главные группы [1].

1. Кристаллические полупроводниковые материалы, построенные из атомов и молекул одного элемента. Такими материалами являются широко используемые в данное время германий (Ge), кремний (Si), селен (Se), карбид кремния (SiC), а также те одноатомные вещества, которые могут быть введены в основные материалы в качестве активных примесей: фосфор (P), мышьяк (As), бор (B), олово (Sn), индий (In), галлий (Ga).

2. Окисные кристаллические полупроводниковые материалы, т. е. материалы из окислов металлов. Главные из них закись меди (CuO), окись цинка (ZnO), окись кадмия (CdO), двуокись титана (TiO₂), окись никеля (NiO) и др. В эту же группу входят материалы, изготавливаемые на основе титаната бария, стронция, цинка и другие неорганические соединения с различными малыми добавками.

3. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений атомов третьей и пятой групп системы элементов Менделеева, которые можно обозначить общей формулой $A^{III}B^{V}$ где буквы означают атомы, а римские цифры – номера групп. Примерами таких материалов являются антимониды индия (In), галлия (Ga) и алюминия (Al), т. е. соединения сурьмы (Sb) с индием, галлием и алюминием. Они получили наименование интерметаллических соединений.

4. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений серы (S), селена (Se) и теллура (Te) с одной стороны и меди (Cu), кадмия (Cd) и свинца (Pb) с другой. Такие вещества называются сульфидами, селенидами и теллуридами.

5. Тройные соединения: $A^{III}B^{V}B^{V}$ ($CuAlS_2$, $CuInS_2$ и др.); $A^{III}B^{V}B^{V}$ ($CuSbS_2$, $CuAsS_2$ и др.); $A^{III}B^{V}B^{V}$ ($CuFeSe_2$ и др.); $A^{III}B^{V}B^{V}$ ($ZnSiAs_2$, $ZnGeAs_2$); $A^{III}B^{V}B^{V}$ ($PbBiSi_2$) и твердые растворы: $GeSi$, $GaAs_{1-x}P_x$, $In_xAl_{1-x}Sb$ и др.

3.1.4. Органические полупроводники

Антрацен, нафталин, фталоциамин, резорцин, пирен, пирилен, коронен и др. Исследование зависимости органических полупроводников показало, что проводимость некоторых из них изменяется экспоненциально с обратной температурой, как и многих неорганических полупроводников. Органические полупроводники получают кристаллизацией из растворов, хроматографией из

раствора или пара, возгонкой [10,11]. Некоторые электрофизические свойства органических полупроводников приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Электрофизические свойства органических полупроводников

Вещество	Ширина запрещенной зоны	Проводимость вещества, Ом·см	Напряжение фотопроводимости
Нафталин	0,75	$1 \cdot 10^{-5}$	-
Антрацен	0,83	$3 \cdot 10^{-3}$	-
Пирен	1,01	$3 \cdot 10^{-3}$	3,2
Фталоцианин	1,2	10^{-5}	-
Пирилен	0,9	0,1	-
Коронен	1,15	5,0	-

3.2. Цель и содержание работы

Целью лабораторной работы является определение контактной разности потенциалов полупроводников.

Лабораторная работа состоит из двух заданий.

1) Определение контактной разности потенциалов проводников при различных температурах.

2) Определение контактной разности потенциалов для различных значений подвижности электронов и дырок.

Математические расчеты проводятся в удобной для студента программной среде.

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Задание 3.1 Определение контактной разности потенциалов проводников при различных температурах

Постановка задачи

Имеется сплавной германиевый p - n -переход с концентрацией

$$N_d = 10^3 N_a . \quad (3.4)$$

Причем на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом акцепторной примеси.

Определить контактную разность потенциалов при температуре $T=300$ К.

Исходные данные к заданию 3.1 приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Исходные данные к выполнению задания 3.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N_d, \text{см}^{-3} \cdot 10^{17}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$N_a, \text{см}^{-3} \cdot 10^{22}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$n_i, \text{см}^{-3} \cdot 10^{13}$	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$N_d, \text{см}^{-3} \cdot 10^{17}$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
$N_a, \text{см}^{-3} \cdot 10^{22}$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
$n_i, \text{см}^{-3} \cdot 10^{13}$	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4	4,1	4,2	4,3	4,4
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$N_d, \text{см}^{-3} \cdot 10^{17}$	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
$N_a, \text{см}^{-3} \cdot 10^{22}$	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
$n_i, \text{см}^{-3} \cdot 10^{13}$	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,3	5,4

Порядок выполнения задания 3.2

1) Концентрация акцепторных атомов рассчитать по формуле

$$N_a = N / 10^8, \text{ см}^{-3}, \quad (3.5)$$

где N – концентрация атомов германия.

2) Контактную разность потенциалов определить по выражению

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}, \text{ В}, \quad (3.6)$$

где N_d – концентрация атомов доноров,

n_i – концентрация ионизированных атомов,

k – постоянная Больцмана равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К,

e – заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

3) Построить графики зависимости φ_k от N_a , n_i

3.3.2. Задание 3.2. Определение контактной разности потенциалов для различных значений подвижности электронов и дырок

Постановка задачи

Удельное сопротивление p -области германиевого p - n -перехода $\rho_p = 2$ Ом·см, а n -области $\rho_n = 1$ Ом·см.

Определить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при T , К, если подвижность электронов и дырок в германии соответственно равны μ_n , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и μ_p , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Исходные данные к заданию 3.2 приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Исходные данные к выполнению задания 3.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T , К	300	302	304	306	308	310	312	314	316	318
μ_n , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
μ_p , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T , К	320	322	324	326	328	330	332	334	336	338
μ_n , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4
μ_p , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
T , К	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338
μ_n , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49
μ_p , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39

Порядок выполнения задания 3.2

1) Удельное сопротивление p -области полупроводника ρ_p определяется по формуле

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} \approx \frac{1}{N_a e \mu_p}, \quad (3.7)$$

где N_a – концентрация атомов акцепторов,
 e – заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл,
 μ_p – подвижность дырок.

Тогда из (3.7) определяем N_a .

2) По аналогии определить концентрацию атомов доноров N_d из выражения

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} \approx \frac{1}{N_d e \mu_n}. \quad (3.8)$$

3) По (3.6) определить контактную разность потенциалов.

4) Построить графики зависимости контактной разности потенциалов от удельного сопротивления p - и n -областей.

5) Сделать выводы.

Лабораторная работа № 4

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

4.1. Краткая теория

4.1.1. Классификация магнитных материалов

Магнетики – материалы, вступающие во взаимодействие с магнитным полем, выражающееся в его изменении, а также в других физических явлениях – изменении физических размеров, температуры, проводимости, возникновению электрического потенциала и т. д. [14]

Магнитные материалы делят на слабомагнитные и сильномагнитные.

К *слабомагнитным* относят диамагнетики и парамагнетики.

К *сильномагнитным* – ферромагнетики, которые, в свою очередь, могут быть *магнитомягкими* и *магнитотвердыми*. Формально отличие магнитных свойств материалов можно охарактеризовать **относительной магнитной проницаемостью**.

Диамагнетиками называют материалы, атомы (ионы) которых не обладают результирующим магнитным моментом. Внешне диамагнетики проявляют себя тем, что выталкиваются из магнитного поля. К ним относят цинк, медь, золото, ртуть и другие материалы.

Парамагнетиками называют материалы, атомы (ионы) которых обладают результирующим магнитным моментом, не зависящим от внешнего магнитного поля. Внешне парамагнетики проявляют себя тем, что втягиваются в неоднородное магнитное поле. К ним относят алюминий, платину, никель и другие материалы.

Ферромагнетиками называют материалы, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превышать вызвавшее его внешнее магнитное поле.

Любое ферромагнитное тело разбито на **домены** – малые области самопроизвольной (спонтанной) намагниченности. В отсутствие внешнего магнитного поля, направления векторов намагниченности различных доменов не совпадают, и результирующая намагниченность всего тела может быть равна нулю.

Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

К магнитомягким материалам относят [15]:

1. Технически чистое железо (электротехническая низкоуглеродистая сталь).

2. Электротехнические кремнистые стали.

3. Железоникелевые и железокобальтовые сплавы.

К магнитотвердым материалам относят:

1. Литые магнитотвердые материалы на основе сплавов Fe-Ni-Al.

2. Порошковые магнитотвердые материалы, получаемые путем прессования порошков с последующей термообработкой.

3. Магнитотвердые ферриты. Магнитотвердые материалы – это материалы для постоянных магнитов, использующихся в электродвигателях и других

электротехнических устройствах, в которых требуется постоянное магнитное поле.

4.1.2. Основные характеристики магнитных материалов

К основным магнитным характеристикам материалов относятся [16]:

- магнитная восприимчивость,
- магнитная индукция,
- магнитная проницаемость.

Магнитная восприимчивость κ атомов – величина, характеризующая связь намагниченности вещества J с напряженностью магнитного поля H :

$$\kappa = J/H. \quad (4.1)$$

Уравнение (2.1.) не распространяется на ферромагнетики.

Магнитная восприимчивость характеризует способность веществ к намагничиванию под действием магнитного поля. Она определяется, главным образом, содержанием ферромагнитных включений, а также их формой, размером и расположением относительно друг друга.

Магнитная индукция B – среднее результирующее магнитное поле вещества, представляющее собой среднее значение суммарной напряженности микроскопических магнитных полей, созданных отдельными электронами и другими элементарными частицами, Тл:

$$B = \mu_0 (H + J), \quad (4.2)$$

где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Магнитная проницаемость μ – величина, показывающая, во сколько раз увеличивается (уменьшается) магнитная индукция в веществе при воздействии магнитного поля напряженностью H .

Коэрцитивная сила H_c – значение напряженности магнитного поля, в котором ферромагнитный образец, первоначально намагниченный до насыщения, полностью размагничивается.

Остаточная намагниченность B_r – величина намагниченности, которую ферро- или ферримагнитный материал имеет при напряженности внешнего поля, равной нулю.

Все материалы по величинам магнитных восприимчивости и проницаемости делятся на ферромагнитные ($\mu \geq 1$, $\kappa > 0$), парамагнитные ($\mu > 1$, $\kappa > 0$) и диамагнитные ($\mu < 1$, $\kappa < 0$).

По величине магнитной проницаемости существует деление электротехнических материалов на немагнитные и магнитные.

Размагничивающий фактор N_f

Безразмерная тензорная величина, определяющая значение напряжённости размагничивающего поля, создаваемого однородно намагниченным магнетиком в виде эллипсоида вращения (рис. 4.1) [7].

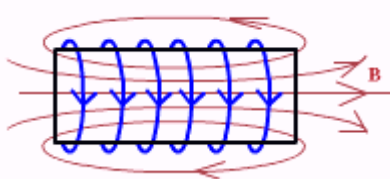


Рисунок 4.1 – Размагничивающее поле

Немагнитные материалы – пара-, диа- и слабоферромагнитные материалы с магнитной проницаемостью менее 1,5. К немагнитным материалам относится большинство металлов и сплавов (в том числе некоторые стали), полимеры, дерево, стекло и т.д.

Магнитные материалы классифицируют по их физической природе и величине коэрцитивной силы.

По физической природе магнитные материалы делят (отраслевое деление) на три группы:

- металлические материалы,
- неметаллические материалы
- магнитодиэлектрики.

4.2. Цель и содержание работы

Целью лабораторной работы является расчёт основных характеристик магнитных материалов.

Лабораторная работа включает шесть задач.

- 1) Выбор материала обмотки.
- 2) Выбор материала сердечника.
- 3) Оценка влияния величины размагничивающего фактора.
- 4) Обзор медных проводов с изоляцией.
- 5) Влияние температуры окружающей среды на магнитную проницаемость.
- 6) Нахождение магнитного потока, индуцируемого в магнитопроводе катушки.

Математические расчеты проводятся в удобной для студента программной среде.

4.3. Порядок выполнения работы

4.3.1. Задание 4.1. Выбор материала обмотки

Постановка задачи

Необходимо определить тип провода, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям потребителя.

Определить:

- тип провода, удовлетворяющий требованиям по пробойному напряжению, массе и габаритам;
- зависимость доли лака от диаметра провода.

Порядок выполнения задания 4.1.

1) Провести обзор материалов пригодных для применения в качестве обмотки, выбрать тот, который обладает наименьшим удельным сопротивлением (Таблица 2.1).

2) Провести обзор проводов из выбранного материала с лаковой изоляцией. Для получения минимальной массы и габаритов применим провод с наименьшей толщиной изоляции и удовлетворяющий пробойному напряжению в зависимости от выбранного Вами эксплуатационного фактора.

3) Определить зависимости толщины слоя лака от диаметра провода.

Из технических условий на провод рассчитаем долю лака по формуле (4.3) для значений диаметра (Таблица 4.1), расчетные данные внести в таблицу 5.1. и построить график зависимости доли лака $D_{л}$ от диаметра провода

$$D_{л} = (D_{п} - D_{ж}) / D_{ж} , \quad (4.3)$$

где $D_{п}$ – диаметр провода с лаком, мм;

$D_{ж}$ – диаметр жилы провода, мм.

Таблица 4.1- Значения диаметров провода с лаком и без него

Диаметр жилы (мм)	Диаметр провода с лаком (мм)	Доля лака
0,02	0,025	
0,03	0,037	
0,04	0,05	
0,06	0,074	
0,08	0,098	
0,09	0,11	
0,14	0,166	
0,16	0,187	
0,2	0,23	
0,3	0,337	
0,38	0,421	
0,45	0,495	
0,6	0,653	
0,71	0,767	
1	1,068	
1,4	1,479	

4) Построить график зависимость (определить тренд) доли лака от диаметра провода.

5) Сделать выводы.

4.3.2. Задание 4.2. Выбор материала сердечника

Постановка задачи

Для изготовления сердечника более всего подходят сплавы с малой коэрцитивной силой, высокой начальной и максимальной магнитной проницаемостью.

Определить среди перечисленных в таблице 4.2 магнитомягких материалов определить наиболее подходящие для изготовления сердечников.

Таблица 4.2 - Магнитомягкие материалы и их параметры

№ п/п	Материал	Магнитная проницаемость ($\mu_{\text{нач}} - \mu_{\text{макс}}$)	Коэрцитивная сила (Нс), Э (1/4 кА/м)	Плотность (с), г/см ³
1.	Сталь Э31	250 - 5500	0,55	7,7
2.	Сталь Э41	300 - 6000	0,45	7,7
3.	Сталь Э42	400 - 7500	0,4	7,7
4.	Сталь Э45	600 - 10000	0,25	7,7
5.	Сталь Э310	1000 - 30000	0,12	7,7
6.	Сплав 79НМ	20000 - 100000	0,03	8,6
7.	Сплав 80НХС	30000 - 120000	0,015	8,6
8.	Сплав 50НХХ	3000 - 30000	0,2	8,6
9.	Сплав 65НП	3000 - 100000	0,1	8,6
10.	Сплав 50НП	2000 - 20000	0,2	8,6
11.	78,5% Ni- пермаллой	10000 - 100000	0,025	8,8
12.	Эл. тех. железо	5000 - 15000	0,36	8,6
13.	Альсифер	117000	0,022	7,9
14.	Пермендюр	400 - 4000	0,05	8,2
15.	Сплав AMAG 200 (нанокрист Fe)	30000 - 600000	0,015	7,3
16.	Супермаллой	30000 - 900000	0,004	8,6

Порядок выполнения задания 4.2

- 1) Выбрать оптимальные материалы для производства сердечника.
- 2) Определить основные эксплуатационные, физические и стоимостные характеристики выбранных материалов и провести сравнительный анализ.

4.3.3. Задание 4.3. Обзор медных проводов с изоляцией**Постановка задачи**

Среди известных и распространённых на рынке типов проводов выбрать тот, что обладает большой наработкой, малой толщиной лака, удовлетворяет пробойному напряжению, выпускается в расширенном диапазоне диаметров.

Определить удельное сопротивление проводника при температуре, отличной от базового уровня.

Порядок выполнения задания 4.3.

- 1) Изменение удельного сопротивления $\Delta\rho$ определяется по формуле

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = \alpha\rho_1\Delta T \quad (4.4)$$

где ρ_1 – удельное сопротивление при температуре, принятой в качестве базового уровня (обычно 20°C),

ρ_2 – удельное сопротивление при расчётной температуре,

ΔT – разность температур,

α – температурный коэффициент удельного сопротивления для данного материала (размерность $^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Тогда удельное сопротивление для расчётной температуры ρ_2 определяется по выражению

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \alpha(T_2 - T_1)) \quad (4.5)$$

где T_1 – температура базового уровня,

T_2 – расчетная температура,

ρ_1 – удельное сопротивление при базовой температуре.

Проведем расчеты для меди. В диапазоне от 0°C до 100°C для меди принят температурный коэффициент удельного сопротивления $0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$.

2) Рассчитать удельное сопротивление меди ρ_2 при $T_2^{\circ}\text{C}$, если удельное сопротивление при температуре 20°C $\rho_1_{20^{\circ}\text{C}} = 1,72 \cdot 10^{-8}$ (см. ЛР 2, задание 1).

Расчётная температура T_2 для вариантов определяется по формуле

$$T_2^{\circ}\text{C} = T_1^{\circ}\text{C} + 2N, \quad (4.6)$$

где N – номер варианта.

3) Представить графически зависимость удельного сопротивления от температуры.

4.3.4. Задание 4.4. Оценка влияния размагничивающего фактора

Постановка задачи

Имеем катушку индуктивности с разомкнутым сердечником (рис. 4.2) которая состоит из катушки диаметром d_k и длиной l_k и сердечника диаметром d_c и длиной сердечника l_c .

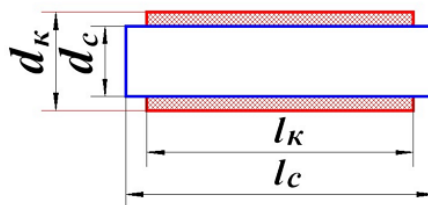


Рисунок 4.2 – Катушка индуктивности с разомкнутым сердечником, где d_k, l_k – диаметр и длина катушки; d_c, l_c – диаметр и длина сердечника

Определить размагничивающий фактор катушки индуктивности N_f для различных соотношений длины и диаметра сердечника.

Порядок выполнения задания 4.4

1) Размагничивающий фактор N_f зависит от размеров сердечника (см. рис 4.2.). Для его определения введём коэффициент λ , зависящий от отно-

шения длины сердечника l_c к его диаметру d_c

$$\lambda = \frac{l_c}{d_c} \quad (4.7)$$

Тогда в интервале $2 \leq \lambda \leq 50$ с точностью 10 % размагничивающий фактор данного сердечника можно определить по следующему выражению

$$N_f = \frac{0,74}{(\lambda + 0,9)^{1,6}} \quad (4.8)$$

Точные значения N_f определяются по формуле

$$N_f = \frac{1}{\lambda^2} (2,72 \lg(\lambda) - 0,69). \quad (4.9)$$

Причем, для расчёта N_f для значений $\lambda \geq 28$ применяются еще более сложные формулы.

- 2) Справочные данные определяются из таблицы 4.3.
- 3) Построить на одном графике зависимости N_f в интервале $2 \leq \lambda \leq 100$ расчетные и справочные.
- 4) Сделать выводы.

Таблица 4.3. - Значения размагничивающего фактора для цилиндрического образца с различным отношением длины к диаметру (L/d)

l_c/d_c	N_f
10	0,0203
20	0,00715
25	0,005
30	0,00366
40	0,002182
50	0,001457
60	0,001043
80	0,0006528
100	0,000414

4.3.5. Задание 4.5. Влияние температуры окружающей среды на магнитную проницаемость

Постановка задачи

При повышении температуры окружающей среды до t_1 начальная магнитная проницаемость феррита марки 200НН повысилась до значения $\mu_{н1}$.

Определить начальную магнитную проницаемость $\mu_{н0}$ при нормальной ($t_0 = 20, ^\circ\text{C}$) температуре, если температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости равен $TK\mu$.

Исходные данные к заданию 4.5 приведены в таблице 4.4.

Таблица 5.4 - d_c Исходные данные к заданию 4.5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\mu_{н1}$	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204
$t_1^\circ\text{C}$	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$TK_\mu 10^{-3}$	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\mu_{н1}$	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214
$t_1^\circ\text{C}$	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68
$TK_\mu 10^{-3}$	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\mu_{н1}$	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
$t_1^\circ\text{C}$	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88
$TK_\mu 10^{-3}$	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0

Порядок выполнения задания

1) Путём несложных математических преобразований из выражения

$$\mu_{н1} = \mu_{н0} [1 + TK_\mu (t_1 - t_0)] \quad (4.10)$$

определить начальную магнитную проницаемость $\mu_{н0}$.

2) Определить графически зависимость магнитной проницаемости от температуры окружающей среды.

3) Сделать выводы.

4.3.6 Задание 4.6. Нахождение магнитного потока, индуцируемого в магнитопроводе катушкой

Постановка задачи

В магнитной цепи по обмотке с числом витков ω протекает ток I , А. Относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода μ .

Определить

1) Напряженности участков цепи длиной l_1 , l_2 и l_3 , м.

2) Магнитный поток Φ в ветви l_1 магнитной цепи, если ее сечение $S=3,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Исходные данные к заданию приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Исходные данные к заданию 4.6

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ω	300	302	304	306	308	310	312	314	316	318
I , А	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
μ	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
l_1	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
l_2	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
l_3	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ω	320	322	324	326	328	330	332	334	336	338
I , А	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
μ	810	820	830	840	850	860	870	880	890	900
l_1	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
l_2	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39
l_3	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49

Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ω	340	342	344	346	348	350	352	354	356	358
I, A	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
μ	910	920	930	940	950	960	970	980	990	1000
l_1	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39
l_2	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49
l_3	0,5	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59

Порядок выполнения задания 4.6.

1) Для нахождения магнитного потока, индуцируемого в магнитопроводе катушкой, воспользоваться аналогией между магнитными и электрическими цепями. Считая, аналогом напряжения питания магнитодвижущую силу $I\omega$, а тока – поток Φ , можно записать

$$I\omega = \Phi R_\mu \quad 4.11$$

где R_μ – полное магнитное сопротивление эквивалентно параллельному соединению сопротивлений $R_{\mu 2}$ и $R_{\mu 3}$, последовательно подключенных к сопротивлению $R_{\mu 1}$ (рис. 4.3).

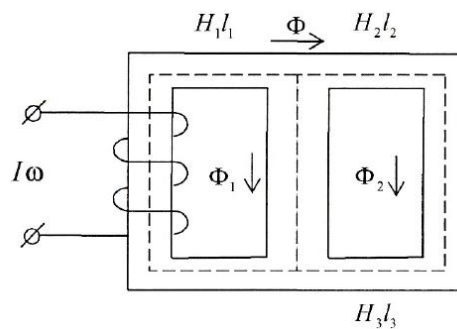


Рисунок 4.3 – Разветвленная магнитная цепь

2) Тогда, согласно классической теории,

$$R_\mu = R_{\mu 1} + \frac{R_{\mu 2} R_{\mu 3}}{R_{\mu 2} + R_{\mu 3}} \quad (4.12)$$

3) При одинаковом сечении участков магнитопровода их сопротивления пропорциональны длинам. Учитывая заданные в условии значения l_1 , l_2 и l_3 можно записать

$$R_{\mu 1} = l_1 \frac{1}{\mu \mu_0 S}, R_{\mu 2} = l_2 \frac{1}{\mu \mu_0 S}, R_{\mu 3} = l_3 \frac{1}{\mu \mu_0 S}, \quad (4.13)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

4) С учётом (5.12) получим

$$R_\mu = \frac{1}{\mu \mu_0 S} \left(l_1 + \frac{l_2 - l_3}{l_2 + l_3} \right). \quad (4.14)$$

5) При этом магнитный поток исходя из 5.11

$$\Phi = \Phi_1 = \frac{I\omega}{R_\mu}. \quad (4.15)$$

6) Магнитная индукция и напряженность магнитного поля на участке l_1 соответственно равны:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S}; H_1 = \frac{B_1}{\mu \mu_0}. \quad (4.16)$$

7) Напряженности на участках l_2 , и l_3 обратно пропорциональны их сопротивлениям:

$$H_2 = H_1 \frac{R_{\mu 2}}{R_{\mu}}, H_3 = H_1 \frac{R_{\mu 3}}{R_{\mu}}. \quad (4.17)$$

8) Сделать выводы относительно проведённых расчётов.

Лабораторная работа № 5

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

5.1. Краткая теория

За последние два десятилетия нанотехнологии стали стратегическим индустриальным направлением. К материалам в наносостоянии проявляется огромный интерес в связи с реальной возможностью практической реализации их уникальных свойств в разнообразных областях науки и техники.

Нанотехнология – область науки и техники, занимающаяся изучением свойств объектов и разработкой устройств с базовыми структурными элементами размерами в несколько десятков нанометров ($1\text{ нм}=10^{-9}\text{ м}$).

Применительно к индустрии наносистем границы геометрического фактора формально определены от единиц до 100 нм. Однако система получает приставку «нано» не потому, что ее размер становится меньше 100 нм, а вследствие того, что ее свойства начинают зависеть от размера [3].

5.1.1. Виды наноматериалов

Наноматериалы конструкционного и функционального класса.

Основные материалы данного класса – это металлические, керамические, полимерные и композиционные. Для получения наноматериалов в консолидированном виде в основном используется четыре метода:

- порошковая металлургия (компактирование нанопорошков),
- кристаллизация из аморфного состояния,
- интенсивная пластическая деформация,
- различные методы нанесения наноструктурных покрытий.

В последнее время все более широкое применение находят керамические материалы в наноструктурном состоянии. В широком смысле к керамическим материалам относят класс материалов, получаемых спеканием дисперсных порошков, достаточно тугоплавких и хрупких в обычных условиях веществ различной физико-химической природы: оксиды, нитриды, карбиды, бориды, силициды и др.

Керамические материалы иногда делят на две группы: **конструкционную** и **функциональную**. К первой группе относят материалы, используемые для создания механически стойких конструкций и изделий. Ко второй - керамику со специфическими электрическими, магнитными, оптическими и др. свойствами.

К конструкционным и функциональным наноматериалам можно отнести и многослойные композиты с наноразмерными величинами отдельных слоёв [9]. Подобные нанокомпозиты получают различными физико-химическими методами осаждения, толщина слоёв в которых изменяется от нескольких до десятков нанометров.

Одно из новых направлений использования наноматериалов – это водородная энергетика, в частности, получение, накопление и хранение водорода. С этой целью разрабатывается ряд новых наноматериалов для решения задачи каталитического преобразования углеводородов в водородосодержащее топливо.

5.1.2. Нанотехнологии в атомной энергетике

Одним из условий повышения эффективности работы АЭС является увеличение глубины выгорания ядерного топлива. Опыт показывает, что одним из условий обеспечения глубоких выгораний топлива является создание крупнокристаллических структур ядерного топлива с контролируемой пористостью. Крупнокристаллические структуры ядерного топлива удерживают газообразные и летучие продукты деления, препятствуют транспорту осколков деления по границам зёрен, в результате чего существенно снижается повреждаемость оболочки тепловыделяющего элемента [4].

Наномембраны, нанофильтры.

Металлические объемные нанофильтры перспективны для использования в системах водоподготовки и очистки теплоносителя реакторов АЭС. Наномембраны, нанофильтры, нанокатализаторы используются в технологиях обращения с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), в системах водоподготовки и очистки теплоносителей, дожигания радиолитического водорода и др. целей.

Наноструктурные сверхпроводники.

Разработка сверхпроводящих материалов является, по-видимому, единственным примером реализованной в промышленных масштабах разработки, изначальной целью которой явилось получение объемных наноструктурированных материалов [16,17]. В результате перехода к нанометрическим структурам удалось в несколько раз увеличить токонесущую способность сверхпроводников, что позволило создать мощные магнитные системы и сэкономить при этом до 30 % электроэнергии. Мощные магнитные поля, удерживающие плазму в термоядерных реакторах, создаются сверхпроводящими системами.

5.1.3. Наноразмерные гетероструктуры

Полупроводниковые гетероструктуры являются основой многочисленных исследований фундаментальных физических свойств, а также разнообразных приборных приложений [3]. **Гетероструктура** – полупроводниковая структура, образуемая в результате контакта двух полупроводников разных по химическому составу и физическим свойствам. Основной элемент гетероструктуры – **гетеропереход**, представляющий собой контакт двух химически различных материалов, при котором кристаллическая решётка одного материала без нарушения периодичности переходит в решётку другого материала. На гетеропереходе происходит скачкообразное изменение свойств материала: эффективной массы, ширины запрещённой зоны, положения краёв валентной зоны и зоны проводимости, упругих и фоновых характеристик и т.д.

5.1.4. Фуллерены

Огромный интерес к фуллеренам обусловлен не только получением новых фундаментальных знаний о веществе, но и открывающимися возможностями их практического применения.

В настоящее время понятие «фуллерены» применяется к широкому классу многоатомных молекул углерода с общей формулой C_n (n – четное), имеющих форму замкнутого полого многогранника. Фуллерены являются четвертой

аллотропной формой углерода (первые три - алмаз, графит и карбин). Наиболее известные фуллерены - C₆₀ и C₇₀. Молекула C₆₀ – самая симметричная из всех известных до сих пор. Она состоит из шестидесяти атомов углерода, расположенных на сферической поверхности с диаметром ~1 нм (рис. 5.1) [9].

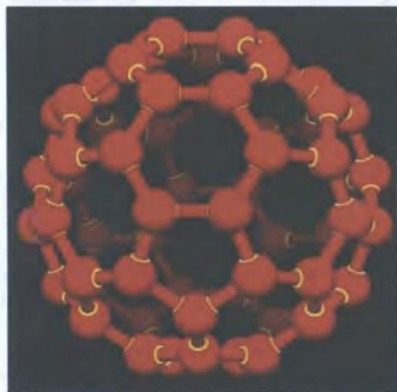


Рисунок 5.1 – Молекула фуллерена C₆₀

5.1.5. Углеродные нанотрубки

Углеродные нанотрубки (УНТ) – это протяжённые структуры в виде полого цилиндра, состоящие из одного или нескольких свёрнутых в трубку графитовых слоев с гексагональной организацией углеродных атомов. Диаметр УНТ колеблется от одного до нескольких десятков нанометров, а длина измеряется десятками микрон и постоянно увеличивается по мере усовершенствования технологии их получения. Из-за малых поперечных размеров подобные образования получили название нанотрубок. Концы нанотрубок часто имеют сужения в виде полусферической головки (рис. 5.2), которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена. УНТ по своей структуре занимают промежуточное положение между графитом и фуллеренами, но многие их свойства не имеют ничего общего ни с графитом, ни с фуллеренами [9].

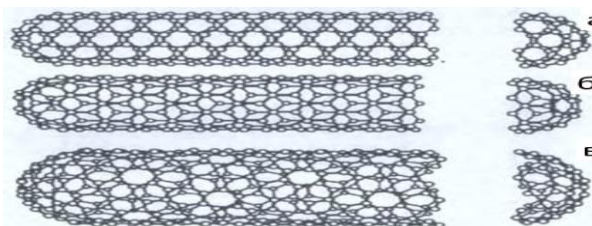


Рисунок 5.2 – Примеры возможных структур нанотрубок, зависящих от способа сворачивания графитового листа:
а - кресельная структура; б - зигзагообразная структура;
в - хиральная структура

5.2. Цель и содержание работы

Целью лабораторной работы является расчёт параметров наноматериалов. Лабораторная работа включает две задачи.

- 1) Расчёт давления в сферическом фуллерене.
- 2) Определение толщины биомембраны.

Математические расчеты проводятся в удобной для студента программной среде.

5.3. Порядок выполнения работы

5.3.1. Задание 5.1 Расчёт давления в сферическом фуллерене

Постановка задачи

Имеем некоторый сферический фуллерон радиусом $r = 1,5$ нм, содержащем во внутренней полости n атомов гелия.

Определить давление (в атм.) в фуллероне при температуре T .

Исходные данные к заданию 5.1 приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Исходные данные к выполнению задания 5.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T, K	290	292	294	296	298	300	302	304	306	308
$r, \text{нм}$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
n	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T, K	310	312	314	316	318	320	322	324	326	328
$r, \text{нм}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
n	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
T, K	310	312	314	316	318	320	322	324	326	328
$r, \text{нм}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
n	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40

Порядок выполнения задания 5.1.

1) Записать уравнение Менделеева - Клапейрона

$$pV = \nu RT, \quad (5.1)$$

где $R = 8,314$, Дж/(моль·К), молярная газовая постоянная, определяет работу, которую совершает 1 моль газа при изобарном нагревании его на 1 К.

2) Рассчитать V – объем сферы фуллерена

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3, \quad (5.2)$$

где n – количество гелия,

$N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, постоянная Авогадро.

3) Рассчитать ν – количество молей газа

$$\nu = \frac{n}{N_a}. \quad (5.3)$$

По формуле (5.1) рассчитать давление в фуллере.

5.3.2. Задание 5.2 Определение толщины биомембраны

Постановка задачи

Найдена экспериментально удалённая электрическая ёмкость некоторой биомембраны составляет $C_{уд}$ мкФ/см².

Определить толщину мембраны, если диэлектрическая проницаемость составляющих ее липидов равна ϵ .

Исходные данные к заданию 5.2 приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Исходные данные к выполнению заданию 5.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_{уд}$ мкФ/см ²	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4
ε	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C_{уд}$ мкФ/см ²	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5
ε	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$C_{уд}$ мкФ/см ²	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,6
ε	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8

Порядок выполнения задания 5.2

1) Удельная емкость – это электроемкость, приходящаяся на единицу площади

$$C_{уд} = \frac{C}{S}, \quad (5.4)$$

где C – емкость плоского конденсатора,

S – площадь мембраны.

Определить площадь мембраны.

2) Записать выражение для емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} = C_{уд} S, \quad (5.5)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума,

ε – проницаемость липидов,

d – толщина мембраны.

Определить d .

3) Графически определить зависимость ёмкости мембраны от ее толщины.

4) Сделать выводы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анчугова А. Ф. Полупроводниковые приборы : учебное пособие / А. Ф. Анчугова, А. Н. Сущикова. – Набережные Челны : Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института (филиала) К(П)ФУ, 2014.- 60 с.
2. Классификация механических нагрузок // Инфопедия для углубления знаний. – URL: <https://infopedia.su/28x11a2f.html> (дата обращения: 25.01.2023).
3. Ковтунг В. П. Наноматериалы: технологии и материаловедение : обзор / Ковтунг В. П., Веревкин А. А. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2010. – 73 с.
4. Наноматериалы и нанотехнологии / Е. И. Пряхин, С. А. Вологжанина, А. П. Петкова, О. Ю. Ганзуленко ; под ред.: Пряхин Е. И. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 372 с. – ISBN 978-5-507-46915-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/323648> (дата обращения: 13.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Нефёдцев, Е. В. Радиоматериалы и радиокомпоненты : учебное пособие / Е. В. Нефёдцев, Н. И. Кузбных, М. Г. Кистенёва. – Москва : ТУСУР, 2022. – 268 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/313538> (дата обращения: 13.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
6. Общая физика : электричество и магнетизм : пособие для студентов специальностей 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» / А. К. Есман [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – 299 с.
7. Пасынков В. В. Материалы электронной техники : учеб. для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики», «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы / В. Б. Пасынков, В. С. Сорокин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1986. – 366 с.
8. Петрова Л. Г. Электротехнические материалы : учебное пособие / Петрова Л. Г., Потапов М. А., Чудина О. В. – М. : МАДИ (ГТУ), 2008. – 198 с.
9. Рыбалкина М. Н. Нанотехнологии для всех. Большое в малом / М. Н. Рыбалкина ; Nanotechnology News Network. – Москва : Мапоейпоозу Мешу Метогк, 2007. - 436 с.
10. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники : учебник. Том 2. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. - М. : Лань, 2016. - 384 с.
11. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 448 с. – ISBN 978-5-8114-2003-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/212135> (дата обращения: 13.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник. Том 1 / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. - М. : Лань, 2015. – 448 с.

13. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3 / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергоиздат, 1988. – 728 с.

14. Тикадзуми, Сосин Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми ; пер. с яп. А. И. Леонова ; под ред. Р. В. Писарева. Москва : Мир, 1987. – 420 с.: ил. 22 см.

15. Трушкин А. Н. Химия и электрорадиоматериалы : учеб. пособие /А. Н. Трушкин ; Севастопольский национальный университет. – Севастополь : СевНТУ, 2013. – 203 с.

16. Электрорадиоматериалы : учеб. пособие для студентов втузов / Б. М. Таресв, Н. В. Коротков, В. М. Петров, А. А. Преображенский ; под ред. Б. М. Тареева. – М. : Высш. шк., 1978. – 336 с.

Учебное издание

Ломоносов Сергей Евгеньевич

ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛЫ

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ*

В авторской редакции

Изд. № 17/2024. Объем 2,75 п.л. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,695.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»