

Документ подписан электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 22.07.2024 16:05:28  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Утверждаю:

Руководитель ООП

Б.Б.Педько

«21»

мая

2024 г.



Рабочая программа дисциплины

## Физика диэлектриков

Закреплена за кафедрой: **Физики конденсированного состояния**

Направление подготовки: **03.03.02 Физика**

Направленность (профиль): **Медицинская физика**

Квалификация: **Бакалавр**

Форма обучения: **очная**

Семестр: **5**

Программу составил(и):

*д-р физ.-мат. наук, проф., Солнышкин Александр Валентинович*

Тверь, 2024

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### Цели освоения дисциплины (модуля):

Описание электрофизических свойств линейных диэлектриков, изучение методов их исследования и механизмов поляризации.

### Задачи:

- 1) Изучить микроскопические механизмы и модели поляризации;
- 2) Освоить методы расчета диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь;
- 3) Рассмотреть методы диэлектрической релаксационной спектроскопии.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В.ДВ.01Б1.В

### Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Математический анализ

Векторный и тензорный анализ

Электродинамика

Физика конденсированного состояния вещества

**Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:**

Преддипломная практика

Научно-исследовательская работа

Физика конденсированного состояния вещества

Физика полупроводников

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

<b>Общая трудоемкость</b>	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
<b>в том числе:</b>	
аудиторные занятия	68
самостоятельная работа	40

## 4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ПК-3.1: Осуществляет анализ данных с применением математических методов и информационных технологий

- Уровень 1 Применение математических методов и информационных технологий
- Уровень 1 Выполнять анализ данных с применением математических методов и информационных технологий
- Уровень 1 Способностью планирования проведения современного физического эксперимента в области физики диэлектриков для биомедицинской практики

УК-1.1: Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие

- Уровень 1 Методы проведения поиска для решения поставленных задач
- Уровень 1 Осуществлять критический анализ и синтез информации для решения поставленных задач
- Уровень 1 Инструментами системного подхода для решения поставленных задач

**5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ**

Виды контроля в семестрах:	
зачеты	5

**6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ**

Язык преподавания: русский.

**7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	Примечание
	Раздел 1. Макроскопические представления о поляризации диэлектриков					
1.1	Процесс поляризации диэлектриков. Вектор поляризации.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.1 Л3.2	
1.2	Классификация диэлектриков. Механизмы поляризации.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.1 Л3.1	
1.3	Поляризация диэлектриков и типы диэлектриков.	Лаб	5	4	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1	
1.4	Процессы и механизмы поляризации линейных диэлектриков	Ср	5	10	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
	Раздел 2. Микроскопические механизмы и модели индуцированной поляризации					
2.1	Особенности деформации (упругой и квазиупругой) поляризации. Электронно-деформационная поляризация.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
2.2	Ионно-деформационная поляризация. Дипольно-деформационная поляризация.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
2.3	Дипольная релаксационная поляризация.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
2.4	Тепловая ионная поляризация	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1	

2.5	Микроскопические механизмы и модели поляризации	Лаб	5	6	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
2.6	Особенности упругой и релаксационной типов поляризации.	Ср	5	10	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
	Раздел 3. Методы расчета диэлектрической проницаемости					
3.1	Макроскопическое электрическое поле внутри диэлектрика	Лек	5	3	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.2	
3.2	Локальное поле в приближении Лорентца. Фактор Лорентца.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
3.3	Диэлектрическая проницаемость неполярных жидкостей и газов. Уравнение Клаузиуса-Мосотти.	Лек	5	3	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
3.4	Поляризация полярных диэлектриков. Модель Онзагера. Тория Кирквуда	Лек	5	4	Л1.2 Л1.1Л2.1 Л3.1	
3.5	Диэлектрическая проницаемость газов. Приближение Лоренца при расчете внутреннего поля.	Лаб	5	6	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
3.6	Поляризация ионных кристаллов. Кристаллы с высокой диэлектрической проницаемостью. Поляризация полярных диэлектриков.	Лаб	5	6	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
3.7	Диэлектрическая проницаемость и ее связь с поляризацией. Поляризуемость.	Ср	5	10	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
	Раздел 4. Диэлектрические потери					
4.1	Тангенс угла диэлектрических потерь	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	

4.2	Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью диэлектриков	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
4.3	Диэлектрические потери при релаксационной поляризации	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
4.4	Комплексная диэлектрическая проницаемость. Соотношения Кронига-Крамерса.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
4.5	Диэлектрические потери при деформационной поляризации.	Лек	5	2	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
4.6	Процесс установления диэлектрической поляризации. Диэлектрические потери в диэлектриках с релаксационной поляризацией. Тангенс угла диэлектрических потерь.	Лаб	5	6	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
4.7	Комплексная диэлектрическая проницаемость, соотношение Крамерса-Кронинга для линейных диэлектриков. Диэлектрические потери неоднородных диэлектриков	Лаб	5	6	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1Л3.1 Л3.2	
4.8	Диэлектрические потери. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Дисперсия диэлектрических характеристик.	Ср	5	10	Л1.2 Л1.1Л2.2 Л2.3 Л2.1	

### Образовательные технологии

Проблемная лекция.  
 Активизация творческой лекции.  
 Практические упражнения и подготовка докладов студентами.  
 Проведение лабораторных работ практикума «Физика диэлектриков».

#### Список образовательных технологий

1	Активное слушание
2	Занятия с применением затрудняющих условий

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### 8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

Оценочные средства для текущего контроля успеваемости представлены в виде следующих разделов, включающих основные понятия изучаемого курса:

### 1 раздел

2. Различные механизмы поляризации диэлектриков.
3. Ионно-деформационная поляризация.
4. Полярные и неполярные молекулы.
5. Дипольно-деформационная поляризация
6. Особенности деформационной (упругой и квазиупругой) поляризации.
7. Ионно-релаксационная поляризация.
8. Дипольно-релаксационная поляризация.
9. Электронно-деформационная поляризация.

### 2 раздел

1. Макроскопическое электрическое поле.
2. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Соотношение Крамерса-Кронинга для линейных диэлектриков.
3. Диэлектрическая проницаемость в неполярных жидкостях и газах. Уравнение Клаузиуса-Мосотти.
4. Диэлектрические потери при деформационной поляризации.
5. Поляризация полярных диэлектриков. Модель Кирквуда.
6. Тангенс угла диэлектрических потерь. Схемы замещения.
7. Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью диэлектриков.
8. Поляризация полярных диэлектриков. Модель Онзагера.
9. Локальное поле в приближении Лоренца.
10. Уравнение Дебая.
11. Диэлектрические потери при релаксационной поляризации.
12. Тангенс угла диэлектрических потерь. Схемы замещения.

### 3 раздел

1. Потери, обусловленные электропроводностью диэлектриков.
2. Тепловой пробой. Теория Вагнера. Три вида теплового пробоя.
3. Потери при релаксационной поляризации.
4. Электрический пробой. Теория Роговского. Теория Иоффе.
5. Потери при деформационной поляризации.
6. Электропроводность щелочно-галоидных кристаллов.
7. Релаксационный диэлектрический спектр. Диаграмма Коула-Коула.
8. Термоэлектреты.
9. Размытие релаксационного спектра. Диаграммы Коула-Коула для набора времен релаксации.
10. Фотоэлектреты.

## **8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации**

- Макроскопические представления о поляризации диэлектриков.  
Различные механизмы поляризации диэлектриков.  
Диэлектрическая проницаемость.  
Энергетические соотношения для поляризованного диэлектрика.  
Микроскопические механизмы и модели поляризации.  
Особенности деформационной поляризации.  
Электронно-деформационная поляризация.  
Ионно-деформационная поляризация.  
Обобщенная модель деформационной поляризации.  
Особенности тепловой (релаксационной) поляризации.  
Дипольно-релаксационная поляризация.  
Электронно-релаксационная поляризация.  
Методы расчета диэлектрической проницаемости.  
Диэлектрическая проницаемость газов.

Приближение Лоренца при расчете внутреннего поля.  
Поляризация ионных кристаллов.  
Кристаллы с высокой диэлектрической проницаемостью.  
Поляризация полярных диэлектриков.  
Макроскопические представления о диэлектрических потерях.  
Процесс установления диэлектрической поляризации.  
Диэлектрические потери в диэлектриках с релаксационной поляризацией.  
Тангенс угла диэлектрических потерь.  
Комплексная диэлектрическая проницаемость.  
Соотношение Крамерса-Кронинга для линейных диэлектриков.  
Диэлектрические потери неоднородных диэлектриков.  
Различные механизмы потерь в диэлектриках.  
Потери, обусловленные электропроводностью диэлектриков.  
Потери при релаксационной поляризации.  
Потери при деформационной поляризации.  
Диэлектрические потери в окрестности дисперсии.  
Релаксационный диэлектрический спектр.  
Размытие спектра.  
Релаксационные потери при различных временах релаксации.  
Диаграмма Коула-Коула.  
Резонансный диэлектрический спектр.  
Размытие спектра.  
Пробой твердых диэлектриков.  
Тепловой пробой.  
Теория Вагнера.  
Три вида теплового пробоя.  
Электрический пробой.  
Теория Роговского.  
Теория Иоффе.  
Квантовая теория электрического пробоя.  
Пробой электронного происхождения.  
Электрический пробой в “толстом слое”.  
Стадии пробоя твердых диэлектриков.  
Электропроводность щелочно-галогенидных кристаллов  
Электреты.

### 8.3. Требования к рейтинг-контролю

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие типы контроля:

- тестирование;
- индивидуальное собеседование,
- письменные ответы на вопросы.

Тестовые задания охватывают содержание всего пройденного материала.

Индивидуальное собеседование, письменная работа проводятся по разработанным вопросам по отдельному учебному элементу программы (дисциплине).

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие типы контроля:

– практические контрольные задания, включающие одну или несколько задач (вопросов) в виде краткой формулировки действий (комплекса действий), которые следует выполнить, или описание результата, который нужно получить.

По сложности практические контрольные задания разделяются на простые и комплексные задания.

Простые практические контрольные задания предполагают решение в одно или два действия. К ним можно отнести: простые ситуационные задачи с коротким ответом или простым действием; несложные задания по выполнению конкретных действий. Простые задания применяются для оценки умений. Комплексные задания требуют многоходовых

решений как в типичной, так и в нестандартной ситуациях. Это задания в открытой форме, требующие поэтапного решения и развернутого ответа, в т.ч. задания на индивидуальное или коллективное выполнение проектов, на выполнение практических действий или лабораторных работ. Комплексные практические задания применяются для оценки владений.

Типы практических контрольных заданий:

- задания на установление правильной последовательности, взаимосвязанности действий, выяснения влияния различных факторов на результаты выполнения задания;
- установление последовательности (описать алгоритм выполнения действия),
- нахождение ошибок в последовательности (определить правильный вариант последовательности действий);
- указать возможное влияние факторов на последствия реализации умения и т.д.
- задания на принятие решения в нестандартной ситуации (ситуации выбора, многоальтернативности решений, проблемной ситуации);
- задания на оценку последствий принятых решений;
- задания на оценку эффективности выполнения действия.

Модуль 1

Выполнение лабораторных работ, подготовка и защита отчетов, ответы на теоретические вопросы - 40 баллов

Модуль 2

Выполнение лабораторных работ, подготовка и защита отчетов, ответы на теоретические вопросы - 40 баллов

зачет - 20 баллов

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 9.1. Рекомендуемая литература

#### 9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Иванов, Физика диэлектриков, Тверь, 2000, ISBN: , URL: <a href="http://texts.lib.tversu.ru/texts2/03378ucheb.pdf">http://texts.lib.tversu.ru/texts2/03378ucheb.pdf</a>
Л1.2	Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Раевский И.П., Физика активных диэлектриков, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2009, ISBN: 978-5-9275-0636-1, URL: <a href="https://znanium.com/catalog/document?id=10659">https://znanium.com/catalog/document?id=10659</a>

#### 9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Томилин, Томилина, Бахтина, Физическое материаловедение. Ч. 1. Пассивные диэлектрики, Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012, ISBN: 978-5-7638-2510-7, URL: <a href="https://znanium.com/catalog/document?id=79444">https://znanium.com/catalog/document?id=79444</a>
Л2.2	Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П., Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники., Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-507-44648-3, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/238514">https://e.lanbook.com/book/238514</a>

Л2.3	Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П., Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники, Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-8114-2002-5, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/212243">https://e.lanbook.com/book/212243</a>
------	---

### 9.1.3. Методические разработки

Шифр	Литература
ЛЗ.1	Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П., Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники, Санкт-Петербург: Лань, 2021, ISBN: 978-5-8114-2002-5, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/168894">https://e.lanbook.com/book/168894</a>
ЛЗ.2	Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П., Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики, Санкт-Петербург: Лань, 2021, ISBN: 978-5-8114-2003-2, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/168852">https://e.lanbook.com/book/168852</a>

### 9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Adobe Acrobat Reader
2	Google Chrome
3	Mathcad 15 M010
4	Origin 8.1 Sr2

### 9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	Архивы журналов издательства Nature
2	Архивы журналов издательства The Institute of Physics
3	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
4	ЭБС «Лань»
5	БД Web of Science
6	БД Scopus
7	Журналы издательства Taylor&Francis
8	Журналы American Institute of Physics (AIP)

## 10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-35	комплект учебной мебели, экран настенный, переносной ноутбук, проекторы
3-45	комплект учебной мебели, компьютеры, сканер, компьютерный измерительный комплекс, микроскоп, осциллограф, принтер, генератор сигналов специальной

## 11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Посещение лекций и занятий лабораторного практикума.
2. Изучение учебно-методических материалов согласно разделам рабочей программы.
3. Изучение теоретической части и выполнение лабораторных работ по дисциплине "Физика диэлектриков".
4. Защита результатов, полученных при выполнении лабораторных работ.

**5. Проверка знаний согласно материалам, представленным в фонде оценочных средств.**