

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Сердитова Наталья Евгеньевна
Должность: проректор по образовательной деятельности
Дата подписания: 25.08.2025 16:55:17
Уникальный программный ключ:
6cb002877b2a1ea640fdebb0cc541e4e95322d13

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

Утверждаю:

Руководитель ООП



Е.В. Барабанова

«26» июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика нелинейных кристаллов

Закреплена за кафедрой:	Физики конденсированного состояния
Направление подготовки:	03.03.03 Радиоп физика
Направленность (профиль):	Материалы и устройства радиоэлектроники (беспилотные системы, программно-аппаратные комплексы, системы автоматизированного проектирования)
Квалификация:	Бакалавр
Форма обучения:	очная
Семестр:	7

Программу составил(и):

канд. физ.-мат. наук, доц., Большакова Наталья Николаевна

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения дисциплины (модуля):

Углубление знаний по ряду теоретических проблем в области физики сегнетоэлектрических явлений.

Задачи :

- Расширение научного кругозора и эрудиции обучающихся на базе изучения фундаментальных результатов физики нелинейных кристаллов;
- практическое овладение методами теоретического описания и основными теоретическими моделями физики нелинейных кристаллов и основными экспериментальными методиками.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Кристаллография

Физика конденсированного состояния вещества

Физика диэлектриков

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

Нанотехнологии в физике конденсированного состояния

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе:	
самостоятельная работа	65
часов на контроль	27

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

ПК-3.1: Осуществляет анализ радиоматериалов и материалов для создания несущих конструкций радиэлектронных средств

ПК-4.1: Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований

5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	7

6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ

Язык преподавания: русский.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

№	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Сем.	Часов	Примечание
	Раздел 1. 1. Нелинейные параметры порядка: деформация, поляризация, намагниченность				
1.1	Введение. 1.1. Частотная классификация нелинейных эффектов. 1.2. Терминология. 1.3. Реверсивные нелинейные эффекты. 1.4. Эффекты самовоздействия. 1.5. Двухчастотные эффекты при близких частотах.	Лек	7	3	
1.2	Введение. 1.1. Частотная классификация нелинейных эффектов. 1.2. Терминология. 1.3. Реверсивные нелинейные эффекты. 1.4. Эффекты самовоздействия. 1.5. Двухчастотные эффекты при близких частотах.	Пр	7	3	
1.3	Введение. 1.1. Частотная классификация нелинейных эффектов. 1.2. Терминология. 1.3. Реверсивные нелинейные эффекты. 1.4. Эффекты самовоздействия. 1.5. Двухчастотные эффекты при близких частотах.	Ср	7	6	
	Раздел 2. 2. Спонтанная поляризация и динамика решетки нелинейного кристалла				
2.1	2.1. Метод самосогласованного поля. Свободная энергия в методе самосогласованного поля. 2.2. Модель ангармонических осцилляторов. 2.3. Модель типа порядок-беспорядок. 2.4. Соотношение Лиддана- Сакса-Теллера. Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода. 2.5. Экспериментальная проверка концепции "мягкой моды". 2.6. Возможные причины исходной неустойчивости решетки (коллективный эффект Яна-Теллера). 2.7. Понятие о вибронной теории сегнетоэлектричества.	Лек	7	4	

2.2	<p>2.1. Метод самосогласованного поля. Свободная энергия в методе самосогласованного поля.</p> <p>2.2. Модель ангармонических осцилляторов.</p> <p>2.3. Модель типа порядок-беспорядок.</p> <p>2.4. Соотношение Лиддана- Сакса-Теллера. Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода.</p> <p>2.5. Экспериментальная проверка концепции "мягкой моды".</p> <p>2.6. Возможные причины исходной нестабильности решетки (коллективный эффект Яна-Теллера).</p> <p>2.7. Понятие о вибронной теории сегнетоэлектричества.</p>	Пр	7	4	
2.3	<p>2.1. Метод самосогласованного поля. Свободная энергия в методе самосогласованного поля.</p> <p>2.2. Модель ангармонических осцилляторов.</p> <p>2.3. Модель типа порядок-беспорядок.</p> <p>2.4. Соотношение Лиддана- Сакса-Теллера. Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода.</p> <p>2.5. Экспериментальная проверка концепции "мягкой моды".</p> <p>2.6. Возможные причины исходной нестабильности решетки (коллективный эффект Яна-Теллера).</p> <p>2.7. Понятие о вибронной теории сегнетоэлектричества.</p>	Ср	7	6	
	Раздел 3. 3. Исследование мягких мод нелинейных кристаллов методами рассеяния света и нейтронов				
3.1	<p>3.1. Исследование дисперсионных зависимостей нелинейных кристаллов в неполярной и полярной фазах методами рассеяния света и нейтронов. 3.2. Определение собственного вектора мягкой моды и его симметрии.</p> <p>3.3. Диффузное рассеяние нейтронов, рентгеновских лучей и электронов. Флуктуации поляризации.</p>	Лек	7	4	
3.2	<p>3.1. Исследование дисперсионных зависимостей нелинейных кристаллов в неполярной и полярной фазах методами рассеяния света и нейтронов. 3.2. Определение собственного вектора мягкой моды и его симметрии.</p> <p>3.3. Диффузное рассеяние нейтронов, рентгеновских лучей и электронов. Флуктуации поляризации.</p>	Пр	7	2	

3.3	3.1. Исследование дисперсионных зависимостей нелинейных кристаллов в неполярной и полярной фазах методами рассеяния света и нейтронов. 3.2. Определение собственного вектора мягкой моды и его симметрии. 3.3. Диффузное рассеяние нейтронов, рентгеновских лучей и электронов. Флуктуации поляризации.	Ср	7	8	
	Раздел 4. 4. Нелинейные оптические эффекты				
4.1	4.1. Генерация второй гармоники. 4.2. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики.	Лек	7	2	
4.2	4.1. Генерация второй гармоники. 4.2. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики.	Пр	7	4	
4.3	4.1. Генерация второй гармоники. 4.2. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики.	Ср	7	8	
	Раздел 5. 5. Сегнетоэластики – механические аналоги сегнетоэлектриков				
5.1	5.1. Термодинамические соотношения для сегнето-эластиков. 5.2. Сегнетоэластические домены и их наблюдение. Процессы переключения в сегнетоэластиках. 5.3. Несобственные сегнетоэлектрики. Термодинамические соотношения для несобственных сегнетоэлектриков и их основные следствия.	Лек	7	3	
5.2	5.1. Термодинамические соотношения для сегнето-эластиков. 5.2. Сегнетоэластические домены и их наблюдение. Процессы переключения в сегнетоэластиках. 5.3. Несобственные сегнетоэлектрики. Термодинамические соотношения для несобственных сегнетоэлектриков и их основные следствия.	Пр	7	3	
5.3	5.1. Термодинамические соотношения для сегнето-эластиков. 5.2. Сегнетоэластические домены и их наблюдение. Процессы переключения в сегнетоэластиках. 5.3. Несобственные сегнетоэлектрики. Термодинамические соотношения для несобственных сегнетоэлектриков и их основные следствия.	Ср	7	7	
	Раздел 6. 6. Сегнетоэлектрики с особым типом упорядочения				

6.1	6.1. Общие представления об антисегнетоэлектриках. Основные представители. 6.2. Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом. Причины размытия фазового перехода. Кинетика перехода. 6.3. Сегнетоэлектрики с магнитным упорядочением. Элементы термодинамической теории сегнетомагнетиков.	Лек	7	2	
6.2	6.1. Общие представления об антисегнетоэлектриках. Основные представители. 6.2. Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом. Причины размытия фазового перехода. Кинетика перехода. 6.3. Сегнетоэлектрики с магнитным упорядочением. Элементы термодинамической теории сегнетомагнетиков.	Пр	7	3	
6.3	6.1. Общие представления об антисегнетоэлектриках. Основные представители. 6.2. Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом. Причины размытия фазового перехода. Кинетика перехода. 6.3. Сегнетоэлектрики с магнитным упорядочением. Элементы термодинамической теории сегнетомагнетиков.	Ср	7	6	
	Раздел 7. 7. Несоразмерная фаза в ферромагнетиках и сегнетоэлектриках				
7.1	7.1. Причины образования несоразмерной фазы с точки зрения динамики решетки. 7.2. Солитоны.	Лек	7	2	
7.2	7.1. Причины образования несоразмерной фазы с точки зрения динамики решетки. 7.2. Солитоны.	Пр	7	3	
7.3	7.1. Причины образования несоразмерной фазы с точки зрения динамики решетки. 7.2. Солитоны.	Ср	7	8	
	Раздел 8. 8. Флексоэлектрический эффект				
8.1	8.1. Нелинейная упругость и затухание звука. Сегнетоупругость. 8.2. Изменение кривизны пленки сегнетоэлектрика при поляризации – новый электромеханический эффект. 8.3. Поляризация сегнетоэлектрической пластины изгибом.	Лек	7	3	

8.2	8.1. Нелинейная упругость и затухание звука. Сегнетоупругость. 8.2. Изменение кривизны пленки сегнетоэлектрика при поляризации – новый электромеханический эффект. 8.3. Поляризация сегнетоэлектрической пластины изгибом.	Пр	7	2	
8.3	8.1. Нелинейная упругость и затухание звука. Сегнетоупругость. 8.2. Изменение кривизны пленки сегнетоэлектрика при поляризации – новый электромеханический эффект. 8.3. Поляризация сегнетоэлектрической пластины изгибом.	Ср	7	8	
	Раздел 9. 9. Ферроики				
9.1	Нелинейные эффекты пересечения: электромеханические, магнитоэлектрические.	Лек	7	3	
9.2	Нелинейные эффекты пересечения: электромеханические, магнитоэлектрические.	Пр	7	2	
9.3	Нелинейные эффекты пересечения: электромеханические, магнитоэлектрические.	Ср	7	8	
	Раздел 10. Экзамен				
10.1		Экзамен	7	27	

Образовательные технологии

классическое изложение

Список образовательных технологий

1	Информационные (цифровые) технологии
2	Активное слушание

8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

Для оценивания результатов обучения в виде владений предлагается рассмотреть следующие темы:

1. Частотная классификация нелинейных эффектов.
2. Терминология.
3. Реверсивные нелинейные эффекты.
4. Эффекты самовоздействия.
5. Двухчастотные эффекты при близких частотах.

Для оценивания результатов обучения в виде умений предлагается продемонстрировать следующие навыки решения типичных примеров:

1. Метод самосогласованного поля.
2. Свободная энергия в методе самосогласованного поля.
3. Модель ангармонических осцилляторов.
4. Модель типа порядок-беспорядок.

5. Соотношение Лиддана- Сакса-Теллера.

6. Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний предлагается ответить на следующие вопросы:

1. Исследование дисперсионных зависимостей нелинейных кристаллов в неполярной и полярной фазах методами рассеяния света и нейтронов.

2. Определение собственного вектора мягкой моды и его симметрии.

3. Диффузное рассеяние нейтронов, рентгеновских лучей и электронов.

Флуктуации поляризации.

4. Генерация второй гармоники.

5. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики

Для оценивания результатов обучения в виде владений предлагается рассмотреть следующие темы:

1. Термодинамические соотношения для сегнетоэластиков.

2. Сегнетоэластические домены и их наблюдение.

3. Процессы переключения в сегнетоэластиках.

Для оценивания результатов обучения в виде умений предлагается продемонстрировать следующие навыки решения типичных примеров:

1. Несобственные сегнетоэлектрики.

2. Термодинамические соотношения для несобственных сегнетоэлектриков и их основные следствия.

3. Общие представления об антисегнетоэлектриках.

4. Основные представители.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний предлагается ответить на следующие вопросы:

1. Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом.

2. Причины размытия фазового перехода.

3. Кинетика перехода.

4. Сегнетоэлектрики с магнитным упорядочением.

8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

Задание:

Выполнить исследование доменной структуры сегнетоэлектрика с помощью методов атомно-силовой микроскопии.

Способ аттестации: получить изображения доменной структуры в формате jpeg

Критерии оценки:

• Имеется полный ответ, на снимках четко видны домены, обучающийся ориентируется в методе и его результате – 3 балла

• Изображение не качественное, не позволяет выделить отдельные домены – 2 балла

• Изображение не получено – 0 баллов

Задание:

Ответ на вопрос:

1. Описать гальваномагнитные эффекты в полупроводниках.

2. Экспериментальная проверка концепции ”мягкой моды”.

3. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики

Способ аттестации: устный

Критерии оценки:

• Ответ отобран из источников, содержание ответа полное -2 балла.

• Ответ изложен недостаточно четко-1 балл.

• Ответ изложен с физическими ошибками – 0 баллов.

8.3. Требования к рейтинг-контролю

Результаты промежуточной аттестации выставляются на основе текущего контроля успеваемости (рейтинг-контроль, баллы за выполненные практические задания суммируются).

Рейтинг 1 (Темы: 1-5)

Рейтинг

Первая контрольная точка. Содержание модуля 1: Раздел 1-5.

30 баллов, из них 10 –текущая работа, 10- посещаемость, 10- контрольная работа. 6-ая неделя.

1. Задача на темы 1-5.

2. Теоретический вопрос

Список вопросов, выносимых в рейтинг-контроль. Первая контрольная точка.

1. Частотная классификация нелинейных эффектов. Терминология.

2. Реверсивные нелинейные эффекты.

3. Эффекты самовоздействия.

4. Двухчастотные эффекты при близких частотах.

5. Метод самосогласованного поля. Свободная энергия в методе самосогласованного поля.

6. Модель ангармонических осцилляторов.

7. Модель типа порядок-беспорядок.

8. Соотношение Лиддана- Сакса-Теллера. Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода. 9. Экспериментальная проверка концепции "мягкой моды".

10. Возможные причины исходной нестабильности решетки (коллективный эффект Яна-Теллера).

11. Понятие о вибронной теории сегнетоэлектричества.

12. Исследование дисперсионных зависимостей нелинейных кристаллов в неполярной и полярной фазах методами рассеяния света и нейтронов.

13. Определение собственного вектора мягкой моды и его симметрии.

14. Диффузное рассеяние нейтронов, рентгеновских лучей и электронов. Флуктуации поляризации.

15. Генерация второй гармоники.

16. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики

17. Термодинамические соотношения для сегнетоэластиков.

18. Сегнетоэластические домены и их наблюдение. Процессы переключения в сегнетоэластиках.

19. Несобственные сегнетоэлектрики. Термодинамические соотношения для несобственных сегнетоэлектриков и их основные следствия.

Рейтинг 2 (Темы 6-9)

Вторая контрольная точка. Содержание модуля 2: Раздел 6-9.

30 баллов, из них 10 –текущая работа, 10- посещаемость, 10- контрольная работа. 10-ая неделя

1. Задача на темы 6-9

2. Теоретический вопрос

Список вопросов, выносимых в рейтинг контроль. Вторая контрольная точка

1. Общие представления об антисегнетоэлектриках. Основные представители.

2. Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом. Причины размытия фазового перехода. Кинетика перехода.

3. Сегнетоэлектрики с магнитным упорядочением. Элементы термодинамической теории сегнетомагнетиков.

4. Причины образования несоответствующей фазы с точки зрения динамики решетки.
 5. Солитоны.
 6. Нелинейная упругость и затухание звука. Сегнетоупругость.
 7. Изменение кривизны пленки сегнетоэлектрика при поляризации - новый электромеханический эффект. 8.3. Поляризация сегнетоэлектрической пластины изгибом.
 8. Нелинейные эффекты пересечения: электромеханические, магнитоэлектрические.
- Критерии:
 работа у доски на семинарском занятии - 3 балла,
 правильный ответ на один вопрос контрольной работы - 5 баллов.
 доклад на семинаре или написанный реферат (текущая работа) - 10 баллов.

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

Рекомендуемая литература

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет"

Э1	ЭБС «ИНФРА-М»: http://www.znaniium.com
Э2	ЭБС «Университетская библиотека ОН-ЛАЙН»: http://www.biblioclub.ru
Э3	ЭБС «ЛАНЬ»: http://e.lanbook.com
Э4	Сервер информационно-методического обеспечения учебного процесса ТвГУ: http://edc.tversu.ru

Перечень программного обеспечения

1	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
2	Adobe Acrobat Reader
3	Google Chrome
4	WinDjView
5	OpenOffice
6	Foxit Reader

Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	ЭБС «ZNANIUM.COM»
2	ЭБС «ЮРАИТ»
3	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
4	ЭБС IPRbooks
5	ЭБС «Лань»
6	ЭБС BOOK.ru
7	ЭБС ТвГУ

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
---------	--------------

3-35	комплект учебной мебели, экран настенный, переносной ноутбук, проекторы
3-4а	компьютеры, проектор, экран, переносной ноутбук, сумка для ноутбука, коммутатор, видеокамеры

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

- 1) Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов:
Самостоятельная работа студентов предполагает:
- обязательное выполнение домашних заданий, предусмотренных лекционными и лабораторными занятиями;
 - углубленное изучение литературы и решение задач по пройденным темам и по вопросам, дополнительно указанным преподавателем;
 - использование материалов рабочей программы для систематизации знаний и подготовке к занятиям и контрольным работам
- Темы для самостоятельного изучения (возможные темы для рефератов).
1. Когерентное рассеяние нейтронов псевдоспиновыми волнами
 2. Исследование мягких сегнетоэлектрических мод кристаллов титаната свинца ($PbTiO_3$)
 3. Мягкие моды в ниобате лития ($LiNbO_3$) и танталате лития ($LiTaO_3$)
 4. Нейтронные исследования кристаллов титогипофосфата олова ($Sn_2P_2S_6$).
 5. Затухание мягкого фонона и центральная мода (центральный пик)
 6. Рэлеевское рассеяние (центральный пик) в кристаллах $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$.