

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич
Должность: врио ректора
Дата подписания: 12.07.2024 11:20:03
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 нелинейных кристаллов

Закреплена за кафедрой: **Физики конденсированного состояния**

Направление подготовки: **03.03.03 Радиофизика**

Направленность (профиль): **Материалы и устройства радиоэлектроники (беспилотные системы, программно-аппаратные)**

Квалификация: **Бакалавр**

Форма обучения: **очная**

Семестр: **7**

Программу составил(и):

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

Тверь, 2024

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:	
аудиторные занятия	52
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)

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
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.	Лаб	7	3	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 2. 2. Спонтанная поляризация и динамика решетки нелинейного кристалла					

2.1	<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. 2.4. Соотношение Лиддана-Сакса-Теллера.</p> <p>Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода. 2.5. Экспериментальная проверка концепции "мягкой моды".</p> <p>2.6. Возможные причины исходной неустойчивости решетки (коллективный эффект Яна-Теллера).</p> <p>2.7. Понятие о вибронной теории сегнетоэлектричества.</p>	Лек	7	4	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
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. 2.4. Соотношение Лиддана-Сакса-Теллера.</p> <p>Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода. 2.5. Экспериментальная проверка концепции "мягкой моды".</p> <p>2.6. Возможные причины исходной неустойчивости решетки (коллективный эффект Яна-Теллера).</p> <p>2.7. Понятие о вибронной теории сегнетоэлектричества.</p>	Лаб	7	4	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	

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. 2.4. Соотношение Лиддана-Сакса-Теллера.</p> <p>Сегнетоэлектрические фазовые переходы с точки зрения динамики кристаллической решетки. Мягкая мода. 2.5. Экспериментальная проверка концепции "мягкой моды".</p> <p>2.6. Возможные причины исходной неустойчивости решетки (коллективный эффект Яна-Теллера).</p> <p>2.7. Понятие о вибронной теории сегнетоэлектричества.</p>	Ср	7	6	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
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>	Лаб	7	2	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	

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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 4. 4. Нелинейные оптические эффекты					
4.1	4.1. Генерация второй гармоники. 4.2. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики.	Лек	7	2	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
4.2	4.1. Генерация второй гармоники. 4.2. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики.	Лаб	7	4	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
4.3	4.1. Генерация второй гармоники. 4.2. Сегнетоэлектрические кристаллы - материалы нелинейной оптики.	Ср	7	8	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	

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.	Лаб	7	3	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
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.	Лаб	7	3	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	

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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
7.2	7.1. Причины образования несоразмерной фазы с точки зрения динамики решетки. 7.2. Солитоны.	Лаб	7	3	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
7.3	7.1. Причины образования несоразмерной фазы с точки зрения динамики решетки. 7.2. Солитоны.	Ср	7	8	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
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.	Лаб	7	2	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	

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	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 9. Ферроики					
9.1	Нелинейные эффекты пересечения: электромеханические, магнитоэлектрические.	Лек	7	3	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
9.2	Нелинейные эффекты пересечения: электромеханические, магнитоэлектрические.	Лаб	7	2	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
9.3	Нелинейные эффекты пересечения: электромеханические, магнитоэлектрические.	Ср	7	8	Л1.1Л2.1 Э1 Э2 Э3 Э4	
	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 несоизмерной 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)

9.1. Рекомендуемая литература

9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Нестеров, Панич А.Е., Технология синтеза порошков сегнетоэлектрических фаз, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2010, ISBN: 978-5-9275-0721-4, URL: https://znanium.com/catalog/document?id=20581

9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Алешкевич В. А., Электромагнетизм, Москва: Физматлит, 2014, ISBN: 978-5-9221-1555-1, URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275299

9.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет"

Э1	ЭБС «ИНФРА-М»: http://www.znanium.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

9.3.1 Перечень программного обеспечения

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

9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

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

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, видеочамеры

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 титогиподифосфата олова ($Sn_2P_2S_6$).
 5. Затухание мягкого фонона и центральная мода (центральный пик)
 6. Рэлеевское рассеяние (центральный пик) в кристаллах $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$.