

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им.
Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
Решением ученого совета ННГУ
протокол от
« 31 » мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины

Физика анизотропных сред

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы

Физика конденсированного состояния

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород – 2023

1. Место дисциплины «Физика анизотропных сред» в структуре ООП

Дисциплина «Физика анизотропных сред» относится к дисциплинам по выбору вариативной части профессионального цикла основной образовательной программы по направлению 03.03.02 – Физика, бакалаврская программа «Кристаллофизика», изучается на 4 году обучения в 7 семестре. Физика анизотропных сред является неотъемлемой частью дисциплин кристаллография, физика твердого тела и кристаллохимия. В курсе рассматриваются основы тензорного и матричного описания анизотропии свойств. На основе связи внутренней и собственной симметрии тензоров показывается связь числа независимых параметров, описывающих свойства, с точечной симметрией кристалла. На основе тензорного аппарата дается описание различных физических свойств, свойственных анизотропным средам.

Для усвоения данного курса необходимо изучить следующие модули и дисциплины в рамках образовательной программы бакалавра по направлению Физика:

- Кристаллография.
- Общая физика.
- Векторный и тензорный анализ.
- Аналитическая геометрия;
- Матричная алгебра.
- Основы термодинамики.

Цели освоения дисциплины: формирование достаточно полного представления о природе связи физических свойств и симметрии, дать описание их зависимости и влиянии различных внешних воздействий на физические свойства кристаллов.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1. Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	ПК-1. Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин ОПК 1.2 Умеет использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин ОПК 1.3 Иметь навыки	Знать: теоретические модели, используемые в физике анизотропных сред для выявления зависимостей между их составом, строением и свойствами; основные компьютерные базы кристаллоструктурных данных. Уметь: осуществлять поиск и использовать кристаллоструктурную информацию для	Контрольная работа	Экзамен: Контрольные вопросы Задания

	использования специализированных знаний в области физики для освоения профильных физических дисциплин	определения основных особенностей строения кристаллических веществ; объяснить связь физических свойств кристаллов с их структурой Владеть терминологией физической кристаллографии; структурной систематикой кристаллов; стандартными методами описания кристаллических структур; навыками теоретического исследования физических и химических свойств кристаллических твердых тел.		
--	---	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины «Физика анизотропных сред»

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	5
Часов по учебному плану	180
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	2
самостоятельная работа	69
Промежуточная аттестация	экзамен

Содержание дисциплины «Физика анизотропных сред»

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
		7 семестр очное				
Основы тензорного и симметричного описания физических свойств	45	5	14		19	30

анизотропных сред						
Электрические свойства анизотропных сплошных сред	36	3	11		15	25
Механические свойства анизотропных сплошных сред	39	3	14		18	25
Связь электрических и механических свойств анизотропных сред	18	2	9		11	12
Магнитные свойства кристаллов	2	1	-		1	8
Явления переноса в кристаллах	2	1	-		1	8
Термодинамика равновесных сред	2	1	-		1	6
В т.ч.текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация – экзамен						

Содержание разделов дисциплины

1. Основы тензорного и симметричного описания физических свойств анизотропных сред.
 - 1.1. Анизотропные сплошные среды. Предельные группы симметрии. Понятие физического свойства. Симметрия кристалла, симметрия воздействия, симметрия физического свойства. Принцип Кюри, принцип Неймана.
 - 1.2. Кристаллографические и кристаллофизические системы координат. Матричное описание ортогональных преобразований. Общее определение тензора II ранга. Преобразования компонент векторов и тензоров при преобразовании системы координат. Тензоры различных рангов. Псевдотензоры.
 - 1.3. Внутренняя симметрия тензоров. Взаимно обратные тензоры. Матричные обозначения. Полевые и материальные тензоры.
 - 1.4. Геометрическая интерпретация тензоров. Указательная поверхность. Величина, характеризующая свойство в данном направлении. Характеристическая поверхность симметричного тензора II ранга и ее свойства. Эллипсоид значений симметричного тензора II ранга. Указательные поверхности для тензоров высших рангов.
 - 1.5. Собственные векторы и собственные значения симметричного тензора II ранга. Приведение симметричного тензора II ранга к главным осям.
 - 1.6. Собственная (внешняя) симметрия полярных и аксиальных тензоров.
2. Электрические свойства анизотропных сплошных сред.
 - 2.1. Пироэлектрический эффект. Указательная поверхность пироэффекта. Электрокалорический эффект.
 - 2.1. Поляризация кристаллов в электрическом поле. Тензоры поляризуемости и диэлектрической проницаемости, их симметрия для кристаллов разных сингоний. Емкость конденсатора с кристаллическим диэлектриком. Плотность энергии электростатического поля в кристалле.
 - 2.2. Сегнетоэлектрические кристаллы. Фазовые переходы I и II рода. Общая характеристика структурных фазовых переходов в кристаллах. Доменное строение сегнетоэлектриков.
3. Механические свойства анизотропных сплошных сред.
 - 3.1. Анизотропия механических характеристик кристаллов. Понятие о твердости и способах ее измерения. Шкала Мооса. Спайность.
 - 3.2. Тензор напряжений. Частные формы тензора напряжений.
 - 3.3. Тензор упругой дилатации. Тензор упругой деформации. Тепловое расширение кристаллов.
 - 3.4. Закон Гука для кристаллов. Тензоры упругой податливости и жесткости, их симметрия. Матричные обозначения тензоров. Энергия деформированного кристалла.

4. Связь электрических и механических свойств анизотропных сред.
 - 4.1. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Пьезотензор и его симметрия. Физический смысл компонент пьезотензора.
 - 4.2. Переход к матрице пьезомодулей. Метод прямой проверки. Указательные поверхности пьезоэффекта. Продольный и поперечный пьезоэффект.
 - 4.3. Электрострикция. Пьезоэлектрические текстуры.
5. Магнитные свойства кристаллов.
 - 5.1. Классификация магнитных веществ. Различные типы магнитных структур в кристаллах. Тензоры намагниченности и магнитной восприимчивости вещества.
 - 5.2. Магнитная симметрия. Доменная структура ферромагнетиков.
 - 5.3. Пьезомагнитный и магнитоэлектрический эффекты.
6. Явления переноса в кристаллах.
 - 6.1. Электропроводность кристаллов.
 - 6.2. Теплопроводность кристаллов.
 - 6.3. Термоэлектрические эффекты.
7. Термодинамика равновесных сред.
 - 7.1. Внутренняя энергия и термодинамический потенциал кристалла.
 - 7.2. Обобщенные термодинамические координаты и силы.
 - 7.3. Матрица термодинамического потенциала. Ее симметрия и вытекающие из этого следствия.

План практических занятий.

1. Матричное представление симметрических операций и классов симметрии (6 часов).
1. Принцип симметрии, симметрия физических явлений и свойств кристаллов (4 часа).
2. Физические свойства кристаллов, описываемые тензором первого ранга (4 часа).
3. Физические свойства кристаллов, описываемые тензором второго ранга (8 часов).
4. Напряжения и деформации в кристаллах, анализ напряженного состояния (6 часов).
5. Пьезоэлектрические свойства кристаллов (4 часа).
6. Упругие свойства кристаллов. Закон Гука (4 часа).

3. Образовательные технологии.

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме и в форме практических занятий, на которых проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий и теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студентов предусматривает выполнение домашних заданий, решение задач, изучение рекомендованной литературы и подготовку к экзамену.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на занятиях и в процессе лекций, активность в обсуждении качественных вопросов.

Для контроля промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины «Физика анизотропных сред» используются нижеприведенные вопросы и задачи.

Вопросы для контроля

1. Каковы основные постулаты анизотропных сплошных сред.
2. Перечислите предельные группы симметрии.
3. Сформулируйте понятия физического свойства, симметрии воздействия, симметрии физического свойства.
4. Сформулируйте принцип суперпозиции Кюри. Приведите примеры.
5. Сформулируйте принцип Неймана. Приведите примеры.
6. Опишите связь кристаллографических и кристаллофизических систем координат.
7. Введите определение тензора II ранга.
8. Как преобразуются компоненты векторов и тензоров при преобразовании системы координат.
9. Определите понятия тензоров различных рангов, псевдотензоров.
10. Что такое внутренняя симметрия тензоров.
11. Какие различия у полевых и материальных тензоров.
12. Определите величину, характеризующую физическое свойство в данном направлении.
13. Опишите указательную поверхность физического свойства.
14. Введите понятие характеристической поверхности симметричного тензора II ранга, каковы ее свойства.
15. Опишите основные особенности пьезоэлектрического эффекта.
16. Каковы особенности поляризации кристаллов в электрическом поле.
17. Рассчитайте плотность энергии электростатического поля в кристалле.
18. Какие кристаллы называют сегнетоэлектрическими.
19. Что такое шкала Мооса.
20. Каковы частные формы тензора напряжений.
21. Как связаны тензор упругой дилатации и тензор упругой (малой) деформации.
22. Опишите особенности теплового расширения кристаллов.
23. Сформулируйте закон Гука для кристаллов.
24. Какова симметрия тензоров упругой податливости и жесткости.
25. В чем особенности прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта.
26. Что такое матрица пьезомодулей, ее связь с тензором пьезокоэффициентов.
27. Опишите явление электропроводности в кристаллах.
28. Сформулируйте основной подход к описанию термодинамики равновесных сред.

Задачи для контроля

1. Тензор упругой деформации кристалла задается в виде:

$$\begin{bmatrix} 8 & -1 & -1 \\ 1 & 6 & 0 \\ -5 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}.$$

Определить тензор малых деформаций, тензор малых вращений, а также значения главных деформаций.

2. К кристаллу с точечной группой симметрии T приложено однородное электрическое поле вдоль направления: 1) $[100]$; 2) $[110]$; 3) $[111]$; 4) $[hk0]$; 5) $[hkl]$. Найти симметрию кристалла в поле.

3. Кристалл NaCl (O_h) поместили в однородное электрическое поле, вектор напряженности которого совпадает с направлением: 1) оси четвертого порядка; 2) оси третьего порядка; 3) произвольно в плоскости m . Найти симметрию кристалла в поле.

4. Определить симметрию кристалла с точечной группой $O = 432$ в поле одноосного механического растяжения, приложенного вдоль кристаллографического направления: 1) $[100]$; 2) $[110]$; 3) $[111]$; 4) $[hk0]$; 5) $[hkl]$.

5. Определить симметрию кристалла кварца (точечная группа D_3) в поле одноосного механического сжатия, приложенного вдоль направления: 1) оси третьего порядка; 2) оси второго порядка.

6. Пользуясь принципом Неймана, определить возможные точечные группы симметрии кристаллов, в которых может проявляться пьезоэлектрический эффект.

7. В кристаллах каких классов симметрии вектор спонтанной поляризации пьезоэлектрика при изменении температуры может изменять не только свою величину, но и направление?

8. Найти плотность поверхностных зарядов, возникающих на противоположных гранях турмалиновой пластинки при однородном нагревании ее на 30 К, если пластинка вырезана так, что: 1) нормаль к пластинке параллельна оси симметрии 3; 2) угол между нормалью к пластинке и осью 3 составляет 60° ; 3) нормаль к пластинке перпендикулярна к оси 3. (Турмалин, $3m$, $\gamma=1,3$ ед. СГСЭ).

9. Найти величину относительной диэлектрической проницаемости сегнетовой соли в направлениях биссектрис углов между каждой из пар осей симметрии второго порядка.

★ Сегнетова соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
Сегнетоэлектрик имеет две точки Кюри — 18°C и 24°C . Симметрия сегнетофазы 2, симметрия парафазы 222. Вблизи верхней точки Кюри $\gamma_1=200$ ед. СГСЭ.

$$\epsilon_1^t=480 \quad \epsilon_2^t=12 \quad \epsilon_3^t=10 \quad \epsilon_1^r=220 \quad \epsilon_2^r=11 \quad \epsilon_3^r=9,8$$

10. Как следует ориентировать кальцитовую пластинку (CaCO_3 , $\bar{3}m$), чтобы при нагревании она не изменяла своей толщины?

11. Найти величину удельного сопротивления кристалла в направлении $(1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$ относительно системы координат, в которой удельная проводимость (в $10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$) этого кристалла описывается тензором вида:

$$\begin{bmatrix} 25 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & -3\sqrt{3} \\ 0 & -3\sqrt{3} & 13 \end{bmatrix}.$$

12. При упругой деформации тела каждая его точка испытывает малые смещения:

$$u_1=(8x_1+3x_2-5x_3) \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

$$u_2=(7x_1+3x_2+4x_3) \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

$$u_3=(x_1-8x_2+x_3) \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Определить тензор малых деформаций и малых вращений. Найти объемное расширение тела при деформации.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (в приложении)

Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования

(ПК-1) Способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин

Индикаторы компетенции	ОЦЕНКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными незначительными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме. Объем без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом.	При решении стандартных задач не продемонстрированы	Имеется минимальный набор навыков для	Продemonстрированы базовые навыки при решении	Продemonстрированы базовые навыки при решении	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных	Продemonстрированы творческие

	Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	рированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	решения стандартных задач с некоторыми недочетами	стандартных задач с некоторыми недочетами	стандартных задач без ошибок и недочетов.	х задач без ошибок и недочетов.	подход к решению нестандартных задач
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.1 Описание шкал оценивания

Критерии оценок экзамена:

Оценка *отлично* – исчерпывающее владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, твердое знание основных положений дисциплины, умение применять концептуальный аппарат при анализе актуальных проблем. Логически последовательные, содержательные, конкретные ответы на все вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, свободное владение источниками. Практическая часть курса успешно выполнена.

Оценка *хорошо* – достаточно полные знания программного материала, правильное понимание сути вопросов, знание определений, умение формулировать тезисы и аргументы. Ответы последовательные и в целом правильные, хотя допускаются неточности, поверхностное знакомство с отдельными теориями и фактами, достаточно формальное отношение к рекомендованным для подготовки материалам. Практическая часть курса успешно выполнена.

Оценка *удовлетворительно* – фрагментарные знания, расплывчатые представления о предмете. Ответ содержит как правильные утверждения, так и ошибки, возможно, грубые. Испытуемый плохо ориентируется в учебном материале, не может устранить неточности в своем ответе даже после наводящих вопросов. Практическая часть курса успешно выполнена.

Оценка *неудовлетворительно* – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией. Практическая часть курса не выполнена или выполнена не в полном объеме.

6.2 Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по модулю, характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование,
- письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

- установление последовательности (описать алгоритм выполнения действия),
- указать возможное влияние факторов на последствия реализации умения и т.д.
- отчет

6.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции. (В приложении)

6.4 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания. (В приложении)

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Физика анизотропных сред»

а) основная литература:

1. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука. 1979. 639 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=99234&DB=1> (6 экз)
2. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука. 1975. 680 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=473219&DB=1> (14 экз)
3. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Задачник по кристаллофизике. М.: Наука. 1972. 192 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=99232&DB=1> (11 экз)
4. Переломова Н. В., Тагиева М. М. - Задачник по кристаллофизике. - М.: Наука, 1982. - 287 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=99231&DB=1> (4 экз)

б) дополнительная литература:

1. Васильев Д.М. Физическая кристаллография. М.: Металлургия. 1972. 279 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=99223&DB=1> (16 экз)
2. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. М.: ИЛ, 1960. Электронная физико-математическая библиотека EqWorld (djvu). <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/solidstate.htm>
3. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. М.: Мир, 1967. - 385 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=97358&DB=1> (5 экз)
4. 1. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фаддеев М.А. Основы кристаллографии. М.: Физматлит, 2004, 500 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=59410&DB=1> (25 экз)
5. 2. Задачи по кристаллографии. Головачев В. П., Сафьянов Ю. Н., Чупрунов Е. В., Фаддеев М. А., Хохлов А. Ф. М.: Физматлит, 2003. - 208 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=59115&DB=1> (195 экз)

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

<http://phys.unn.ru/library.asp?contenttype=Library>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Физика анизотропных сред»

помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Автор: доцент каф. КЭФ, к.ф.-м.н. Овсечина Т.И.

Рецензент (ы): _____

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., профессор Чупрунов Е.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от _____ года, протокол № _____