

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

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 6 от 31.05.2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Физика анизотропных сред

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

03.03.02 - Физика

---

Направленность образовательной программы

Медицинская физика

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.1.ДВ.02.02.02 Физика анизотропных сред относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

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	ИД ПК-1: Демонстрация способности использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	ИД ПК-1: 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 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.	Контрольная работа	Экзамен: Контрольные вопросы Задачи

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>4</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>32</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>42</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>Экзамен</b>

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	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 (практические занятия/ лабора торные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Основы тензорного и симметричного описания физических свойств анизотропных сред	32	8	12	20	12
Электрические свойства анизотропных сплошных сред	24	6	8	14	10
Механические свойства анизотропных сплошных сред	26	8	8	16	10
Связь электрических и механических свойств анизотропных сред	12	4	4	8	4
Магнитные свойства кристаллов	4	2		2	2
Явления переноса в кристаллах	4	2		2	2
Термодинамика равновесных сред	4	2		2	2
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	32	32	66	42

#### Содержание разделов и тем 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.

2.2. 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.

2.3. 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 дисторсии. 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.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Для обеспечения самостоятельной работы обучающихся используются:

- электронный курс "Физика анизотропных сред" (<https://e-learning.unn.ru/course/view.php?id=3890>).

Иные учебно-методические материалы: Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение

конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также

дополнительной литературы, выполнение практических заданий,

отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку к промежуточной аттестации.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольная работа) для оценки сформированности компетенции ПК-1:**

1. В каком направлении нужно приложить однородное электрическое поле к кристаллу сфалерита (точечная группа  $T_d$ ), чтобы его симметрия понизилась до:

1) гексагональной; 2) ромбической; 3) моноклинной; 4) триклинной?

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

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

4. 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).

#### **Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольная работа)**

<b>Оценка</b>	<b>Критерии оценивания</b>
зачтено	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания, успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем
не зачтено	полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, невыполнение практических заданий, выданных преподавателем

### **5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации**

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<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 несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	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 несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше

		предусмотренного программой
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-1

- 1.Анизотропные сплошные среды.
- 2.Принцип суперпозиции Кюри, принцип Неймана.
- 3.Понятие физического свойства. Симметрия кристалла, симметрия воздействия, симметрия физического свойства.
- 4.Кристаллографические и кристаллофизические системы координат.
- 5.Величина, характеризующая свойство в данном направлении.
- 6.Собственная (внешняя) симметрия полярных и аксиальных тензоров.
- 7.Поляризация кристаллов в электрическом поле. Тензоры поляризуемости и диэлектрической проницаемости, их симметрия для кристаллов разных сингоний.
- 8.Пироэлектрический эффект. Указательная поверхность пироэффекта.
- 9.Тензор упругой дисторсии. Тензор упругой деформации.
- 10.Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Пьезотензор и его симметрия. Физический смысл компонент пьезотензора.
- 11.Теплопроводность кристаллов.
- 12.Различные типы магнитных структур в кристаллах. Тензоры намагниченности и магнитной восприимчивости вещества.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

#### Задача 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.

#### Задача 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.

#### Задача 3

В каком направлении нужно приложить однородное электрическое поле к кристаллу сфалерита (точечная группа  $T_d$ ), чтобы его симметрия понизилась до:



1) гексагональной; 2) ромбической; 3) моноклинной; 4) триклинной?

#### Задача 4

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

#### Задача 5

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

#### Задача 6

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  $60^\circ$ ; 3) нормаль к пластинке перпендикулярна к оси 3. (Турмалин,  $3m$ ,  $\gamma=1,3$  ед. СГСЭ).

#### Задача 7

Как следует ориентировать кальцитовую пластинку ( $\text{CaCO}_3$ ,  $m$ ), чтобы при нагревании она не изменяла своей толщины?

#### Задача 8

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:

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

#### Задача 9

При упругой деформации кристаллического образца, имеющего форму куба размером  $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$ , его точки испытывают следующие смещения:

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

$$u_2 = (7x_1 - 13x_2 + 4x_3) \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

$$u_3 = (9x_1 - 2x_2 + 4x_3) \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Найти изменение углов между ребрами куба и изменение его объема при деформации.

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой

Оценка	Критерии оценивания
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Сиротин Юрий Исакович. Основы кристаллофизики : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 639 с. : ил. - 1.80., 7 экз.
2. Сиротин Юрий Исакович. Основы кристаллофизики. - М. : Наука, 1975. - 680 с. - 2.81., 16 экз.
3. Переломова Наталья Владиславовна. Задачник по кристаллофизике : [для вузов] / под ред. М. П. Шаскольской. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1982. - 287 с. : ил. - 0.80., 4 экз.
4. Переломова Наталья Владиславовна. Задачник по кристаллофизике : [для вузов] / под ред. М. П. Шаскольской. - М. : Наука, 1972. - 192 с. : с черт. - 0.33., 12 экз.

Дополнительная литература:

1. Васильев Дмитрий Михайлович. Физическая кристаллография : учеб. пособие для металлург. специальностей вузов. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Металлургия, 1981. - 248 с. : ил. - 0.70., 5 экз.
2. Васильев Дмитрий Михайлович. Физическая кристаллография : [учеб. пособие для вузов]. - М. : Металлургия, 1972. - 279 с., 1 отд. л. табл. : ил. - 0.60., 19 экз.
3. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / пер. с англ. Л. А. Шувалова. - 2-е изд. - М. : Мир, 1967. - 385 с. : черт. - 1.70., 5 экз.
4. Чупрунов Евгений Владимирович. Основы кристаллографии : учеб. для студентов вузов, обучающихся по физ. и хим. специальностям. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с. - ISBN 5-94052-060-1 : 160.00., 1 экз.
5. Чупрунов Евгений Владимирович. Кристаллография : учеб. для студентов вузов, обучающихся по физ. и хим. специальностям. - М. : Физматлит, 2000. - 496 с. - В надзаг.: Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997 - 2000 годы. -

ISBN 5-94052-020-0 : 70.00., 74 экз.

6. Задачи по кристаллографии : учеб. пособие для вузов по физ. и хим. специальностям / [под ред. Е. В. Чупрунова, А. Ф. Хохлова]. - М. : Физматлит, 2003. - 208 с. - ISBN 5-94052-066-3 : 44.00., 196 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ <http://www.lib.unn.ru/>

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

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

Автор(ы): Овсецина Татьяна Ивановна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Чупрунов Евгений Владимирович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.