

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»  
Институт физики

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Института физики,  
д.ф.-м.н., профессор

С.Б. Вениг

" 7 " \_\_\_\_\_ 20 21 г.

Рабочая программа дисциплины  
**Кристаллография и кристаллофизика**


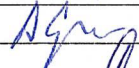

Направление подготовки бакалавриата  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Профиль подготовки бакалавриата  
«Физика и технология твердотельных электронных микро- и наноструктур»

Квалификация (степень) выпускника  
Бакалавр

Форма обучения  
очная

Саратов,  
2021 г.

Статус	ФИО	Подпись	Дата
Преподаватель-разработчик	Названов В.Ф.		05.10.21
Председатель НМК	Скрипаль Ан.В.		05.10.21
Заведующий кафедрой	Скрипаль Ал.В.		05.10.21
Специалист Учебного управления			

## **1. Цели освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины «Кристаллография и кристаллофизика» является формирование у студентов комплекса профессиональных знаний и умений (владений) по физическим свойствам кристаллов, закономерностям физических явлений, связанным с симметрией кристаллов и их атомной структурой.

Задачами освоения дисциплины являются:

- формирование и углубление знаний о симметрии кристаллических многогранников и кристаллических структур;
- формирование умений теоретически исследовать физические свойства кристаллов в зависимости от их симметрии;
- овладение методами описания физических свойств кристаллов с помощью тензоров и матриц;
- формирование знаний об основных экспериментальных методах исследования кристаллических структур и физических свойств кристаллов и практического использования физических эффектов в кристаллах.

## **2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата**

Дисциплина «Кристаллография и кристаллофизика» относится к обязательной части блока 1 «Дисциплины (модули)» основной образовательной программы и изучается студентами очной формы обучения Института физики СГУ, проходящими подготовку по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», в течение 5 учебного семестра. Материал дисциплины опирается на ранее приобретенные студентами знания по физике, математике, химии, термодинамике, теоретическим основам радиоэлектроники и подготавливает студентов к изучению в последующих семестрах таких дисциплин как «Физика полупроводников», «Квантовая теория твёрдого тела», «Материалы электронной техники и наноэлектроники», «Микроэлектроника и наноэлектроника», «Твердотельная электроника», «Квантовая и оптическая электроника», а также ряда дисциплин при продолжении обучения в магистратуре.

### 3. Результаты обучения по дисциплине

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
<p><b>ОПК-1.</b> Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности</p>	<p><b>1.1_Б.ОПК-1.</b> Понимает важность применения фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов.</p> <p><b>2.1_Б.ОПК-1.</b> Аргументированно применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера.</p> <p><b>3.1_Б.ОПК-1.</b> Использует знания физики и математики при решении конкретных задач инженерной деятельности.</p>	<p><u>Знать</u> основные положения, законы и методы естественных наук и математики, используемые в области кристаллографии и кристаллофизики; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел.</p> <p><u>Уметь</u> аргументированно применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера в области кристаллографии и кристаллофизики; теоретически исследовать физические свойства кристаллов в зависимости от их симметрии.</p> <p><u>Владеть</u> знаниями физики и математики, необходимыми при решении конкретных задач в области кристаллографии и кристаллофизики; методами описания физических свойств кристаллов с помощью тензоров и матриц и сведениями о методах экспериментального исследования структуры кристаллов.</p>

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Формы промежуточной аттестации (по семестрам)	
				Лек	Лабораторные	Пр	СРС		
					Общая трудо- емкость	Из них – практиче- ская подго- товка			
1.	Введение	5	1	1					
2.	Симметрия кристаллических многогранников	5	1-3	5			4	4	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы
3.	Симметрия структуры кристаллов	5	4-5	4			4	4	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы
4.	Физические свойства кристаллов и их симметрия	5	6-7	4			4	4	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы
5.	Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами первого ранга	5	8	2			4	4	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы
6.	Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами 2-го ранга	5	9-11	6			4	4	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы
7.	Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами 3-го ранга	5	12-13	4			4	6	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы

8.	Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами 4-го ранга	5	14-15	4			6	6	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы.
9.	Основные методы исследования структуры кристаллов	5	16-17	4			4	8	Проверка выполнения заданий самостоятельной работы. Контрольная работа. Реферат
	<b>Итого:</b>	<b>5</b>		<b>34</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	
	<b>Контроль</b>	<b>5</b>		<b>36</b>					
	<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>5</b>							<b>Экзамен</b>
	<b>Общая трудоемкость дисциплины</b>			<b>144</b>					

### Содержание дисциплины

**1. Введение.** Кристаллография и кристаллофизика, их место в системе наук, изучающих твердые тела. Кристаллы и квазикристаллы. Новое определение кристалла.

#### **Раздел 2. Симметрия кристаллических многогранников.**

Симметрия, периодичность и закономерность структуры - основные характеристики кристаллического состояния вещества.

Элементы симметрии кристаллических многогранников.

Матричное представление симметрических операций. Преобразование осей кристаллофизической системы координат, компонент вектора и координат точки.

Кристаллографические категории, сингонии и системы осей координат.

Точечные группы симметрии кристаллов. Предельные группы симметрии Кюри.

Символы узлов (точек), рядов (направлений) и граней (плоскостей) в кристаллическом многограннике. Индексы Миллера для плоскости.

#### **Раздел 3. Симметрия структуры.**

Структура кристаллов и пространственная решетка. Решетки Браве.

Элементы симметрии кристаллических структур. Пространственные группы симметрии.

Обратная решетка. Основные свойства обратной решетки. Основные формулы структурной кристаллографии.

#### **Раздел 4. Физические свойства идеальных кристаллов и симметрия.**

Основной закон кристаллофизики (принцип Неймана). Принцип суперпозиции симметрий (принцип Кюри).

#### **Раздел 5. Физические свойства кристаллов, описываемые тензором первого ранга.**

Прямой пьезоэлектрический эффект в кристаллах. Ограничения, налагаемые симметрией кристалла. Указательная поверхность пьезоэлектрического эффекта. Обратный пьезоэлектрический эффект. Применение прямого и обратного пьезоэффектов.

## **Раздел 6. Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами второго ранга.**

Прямые и обратные тензоры второго ранга. Основные свойства. Материальные и полевые тензоры второго ранга. Полярные и аксиальные тензоры второго ранга. Примеры. Приведение тензоров к главным осям, методы приведения.

Симметрия полярных тензоров второго ранга. Характеристическая поверхность второго порядка для тензора второго ранга, ее геометрические образы и симметрия. Группы симметрии полярных тензоров второго ранга.

Тензоры диэлектрической проницаемости и непроницаемости кристаллов. Описание распространения света в анизотропных кристаллах с помощью оптических индикатрис.

Тензоры механических напряжений и деформаций как примеры полевых симметричных тензоров второго ранга.

Аксиальные тензоры второго ранга и их симметрия.

К проблеме симметрии тензоров второго ранга. Принцип Онсагера.

## **Раздел 7. Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами третьего ранга.**

Прямой пьезоэлектрический эффект в кристаллах. Симметрия тензора пьезоэлектрических констант.

Пьезоэлектрический эффект в кристаллах кварца. Характеристическая поверхность продольного пьезоэлектрического эффекта в кварце, ее симметрия.

Обратный пьезоэффект в кристаллах, рассмотрение на примере кристаллов кварца. Применение пьезоэффектов.

Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) в кристаллах. Симметричные ограничения эффекта. Примеры рассмотрения, применение. Фоторефрактивный эффект в кристаллах и его применение.

## **Раздел 8. Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами 4-го ранга.**

Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) в кристаллах.

Примеры рассмотрения, применение.

Пьезооптический эффект (эффект фотоупругости) в кристаллах. Примеры рассмотрения. Упругие свойства кристаллов, тензорное рассмотрение, применение.

## **Раздел 9. Основные методы исследования структуры кристаллов.**

Дифракция рентгеновских (электронных) лучей в кристаллах. Уравнение Вульфа-Брэгга. Общее интерференционное уравнение Лауэ, его интерпретация с помощью сферы Эвальда. Связь общего интерференционного уравнения Лауэ с уравнением Вульфа - Брэгга.

Условия Лауэ для дифракции рентгеновских (электронных) лучей в кристалле.

Интенсивность дифракционных максимумов. Правила погасаний (непогасаний).

Основные методы рентгеноструктурного анализа. Метод Лауэ. Методы вращения и колебания (качания). Метод порошков (метод Дебая - Шеррера). Другие методы исследования структуры кристаллов. Электронография. Электронная микроскопия. Квазикристаллография.

### **Примерная тематика практических занятий (семинаров)**

1. Элементы симметрии кристаллических многогранников.
2. Матричное представление симметрических операций.
3. Элементы симметрии кристаллических структур.
4. Изучение основных типов кристаллических структур.
5. Основной закон кристаллофизики (принцип Неймана). Примеры.
6. Принцип суперпозиции симметрий (принцип Кюри). Примеры.
7. Прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты и их применение.
8. Приведение тензоров второго ранга к главным осям.
9. Тензоры второго ранга. Электрические свойства кристаллов.
10. Оптические свойства кристаллов (оптические индикатрисы). Влияние внешних воздействий.
11. Пьезоэлектрический эффект в кристаллах. Тензорное описание.
12. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) в кристаллах. Тензорное описание.
13. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) в кристаллах. Тензорное описание.
14. Пьезооптический эффект (эффект фотоупругости) в кристаллах. Тензорное описание.

### **5. Образовательные технологии, применяемые при освоении дисциплины**

В преподавании дисциплины «Кристаллография и кристаллофизика» используются следующие образовательные технологии:

- Исследовательские методы в обучении
- Проблемное обучение

В процессе обучения предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий: адресация аудитории вопросов и коллективный поиск ответов на них в форме дискуссий, встречи с известными специалистами и экспертами.

При проведении практических (семинарских) занятий в активной форме проводится детальный анализ физических свойств кристаллов в зависимости от симметрии последних в соответствии с приведенным выше списком тем (по выбору преподавателя).

## **Условия обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья:**

- предоставление инвалидам по зрению или слабовидящим возможностей использовать крупноформатные наглядные материалы;
- организация коллективных занятий в студенческих группах с целью оказания помощи в получении информации инвалидам и лицам с ограниченными возможностями по здоровью;
- проведение индивидуальных коррекционных консультаций для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья.
- использование индивидуальных графиков обучения
- использование дистанционных образовательных технологий

### **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.**

Самостоятельная внеаудиторная работа студентов по дисциплине проводится в течение всего семестра и заключается в чтении и изучении литературы, подготовке к лекциям, практическим (семинарским) занятиям, в выполнении заданий лектора, работе в библиотеке, в сети Интернет.

Рекомендуется:

- для качественного усвоения материала лекций разбирать вопросы, излагаемые в каждой очередной лекции, до следующей лекции; по некоторым (трудным) деталям консультироваться у лектора, читать соответствующую литературу;
- при подготовке к семинарским занятиям пользоваться рекомендациями преподавателя, ведущего семинары, готовить краткие конспекты по вопросам тем, изучать литературу по теме занятия;
- задания, которые даются лектором во время лекции по отдельным вопросам, должны выполняться в обязательном порядке, качество их выполнения проверять во время экзамена.

#### Перечень заданий самостоятельной работы, предлагаемых студентам в ходе чтения лекций.

1. Точечные группы симметрии. Предельные группы симметрии (группы Кюри).
2. Пространственные группы симметрии. Обратная решетка, ее основные свойства.
3. Принцип суперпозиции симметрий (принцип Кюри).  
Кристаллофизическая система осей координат. Матричное представление симметрических операций.



4. Пьезоэлектрические кристаллы. Их применение.

5. Прямые и обратные тензоры 2-го ранга. Полярные и аксиальные тензоры.

Материальные и полевые тензоры. Тензоры механических напряжений и деформаций.

6. Симметрия тензора пьезоэлектрических констант. Продольный пьезоэффект в кварце. Линейный электрооптический эффект (эффект Погкельса) в кристаллах и его применение.

7. Пьезооптический эффект в кристаллах.

Упругие свойства кристаллов. Тензоры упругих модулей, влияние симметрии на них.

8. Основные методы исследования структуры кристаллов.

Интенсивность дифракционных максимумов. Структурная амплитуда. Правила погасаний (непогасаний). Электронография. Нейтронография. Электронная микроскопия.

В ходе освоения дисциплины в часы практических занятий студенты выполняют контрольную работу.

При подготовке к контрольной работе необходимо использовать пройденный материал и соответствующую учебно-методическую литературу.

#### Контрольная работа.

Вариант А.

1. Принцип Неймана в кристаллофизике, примеры.

2. Пьезоэлектрический эффект в кристаллах, симметрийные ограничения эффекта.

Вариант Б.

3. Принцип суперпозиции симметрий в кристаллофизике (принцип Неймана). Примеры.

4. Пьезоэлектрический эффект в кристаллах, симметрийные ограничения эффекта.

При выполнении контрольной работы студент должен продемонстрировать знания по основным положениям пройденных тем.

Результаты выполнения контрольной работы учитываются при проведении промежуточной аттестации студентов.

Кроме того, при реализации программы данной дисциплины студентам предлагается выполнить реферат. Темы рефератов, предлагаемых студентам, соответствуют содержанию дисциплины «Кристаллография и кристаллофизика».

#### Примерный перечень предлагаемых тем рефератов:

-Жидкие кристаллы и их применение в электронике.

- Электрооптические свойства жидких кристаллов.
- Квазикристаллы, основные свойства, применение.
- Фотонные кристаллы, свойства, применение.

Рефераты выполняются под руководством преподавателя и должны содержать элементы литературного обзора по теме, анализа в соответствии с конкретной спецификой выбранной темы. Рефераты следует выполнять в течение всего семестра с периодическим обсуждением результатов с преподавателем.

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена (5-й семестр).

### **Вопросы для проведения промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

1. Элементы симметрии кристаллических многогранников. Точечные группы симметрии. Предельные группы Кюри.
2. Символы узлов (точек), рядов (направлений) и граней (плоскостей) в кристаллическом многограннике. Индексы Миллера для плоскости.
3. Структура кристаллов и кристаллическая решетка. Типы ячеек Бравэ.
4. Элементы симметрии кристаллических структур. Пространственные группы симметрии.
5. Обратная решетка, её значение для кристаллографии и физики твердого тела.
6. Физические свойства идеальных кристаллов и их симметрия. Принцип Неймана, примеры.
7. Физические свойства кристаллов и их симметрия. Принцип суперпозиции симметрий (принцип Кюри), примеры.
8. Прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты в кристаллах. Ограничения, налагаемые симметрией кристалла. Применение эффектов.
9. Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами 2-го ранга. Материальные и полевые тензоры 2-го ранга. Приведение тензоров к главным осям, методы приведения.
10. Тензоры диэлектрической проницаемости и непроницаемости кристаллов. Описание распространения света в кристаллах с помощью оптических индикатрис.
11. Тензоры механических напряжений и деформаций как примеры полевых симметричных тензоров 2-го ранга.
12. Прямой пьезоэлектрический эффект в кристаллах, его симметричные ограничения, применение.
13. Обратный пьезоэлектрический эффект в кристаллах, его симметричные ограничения, применение.
14. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) в кристаллах, его симметричные ограничения и применение.
15. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) в кристаллах, его симметричные ограничения и применение.

16. Пьезооптический эффект (эффект фотоупругости) в кристаллах, его симметричные ограничения и применение.
17. Упругие свойства кристаллов, тензорное описание, применение.
18. Дифракция рентгеновских (электронных) лучей в кристалле. Уравнение Вульфа-Брэгга.
19. Дифракция рентгеновских (электронных) лучей в кристаллах. Условия Лауэ для дифракции.
20. Основные методы рентгеноструктурного анализа кристаллов.

## 7. Данные для учета успеваемости студентов в БАРС

Таблица 1.1 Таблица максимальных баллов по видам учебной деятельности.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Семестр	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Самостоятельная работа	Автоматизированное тестирование	Другие виды учебной деятельности	Промежуточная аттестация	Итого
5	20	0	20	20	0	10	30	100

### *Программа оценивания учебной деятельности студента*

#### **5 семестр**

##### **Лекции**

Посещаемость:

Посещаемость, опрос, активность и др. – от 0 до 20 баллов.

##### **Лабораторные занятия**

Не предусмотрены

##### **Практические занятия:**

Корректность и самостоятельность выполнения заданий – от 0 до 20 баллов.

##### **Самостоятельная работа**

Выполнение заданий на самостоятельную работу - от 0 до 20 баллов.

##### **Автоматизированное тестирование**

Не предусмотрено.

##### **Другие виды учебной деятельности:**

Контрольная работа, реферат - от 0 до 10 баллов

##### **Промежуточная аттестация (экзамен)**

Экзамен проводится в устной форме и предполагает ответ на 2 вопроса билета.

При проведении промежуточной аттестации  
ответ на «отлично» оценивается от – 21 до 30 баллов;  
ответ на «хорошо» оценивается от – 11 до 20 баллов;  
ответ на «удовлетворительно» оценивается от – 6 до 10 баллов;  
ответ на «неудовлетворительно» оценивается от 0 до 5 баллов.

Таким образом, максимально возможная сумма баллов за все виды учебной деятельности студента за 5 семестр по дисциплине «Кристаллография и кристаллофизика» составляет 100 баллов

Таблица 2.2 Таблица пересчёта полученной студентом суммы баллов по дисциплине «Кристаллография и кристаллофизика» в оценку (экзамен):

86 - 100 баллов	«отлично»
70 - 85 баллов	«хорошо»
50 - 69 баллов	«удовлетворительно»
меньше 50 баллов	«неудовлетворительно»

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) литература:

1. Названов В.Ф. Введение в кристаллофизику. – Саратов: Изд. Саратов. ун-та, 1993. – 91 с. (в ЗНБ СГУ 11 экз.).
2. Названов В.Ф. Введение в кристаллофизику: учебное пособие. 2-е издание, дополненное.- Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2016. – 120с. (в ЗНБ СГУ 5 экз.)
3. Шаскольская М.П. Кристаллография. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1976. – 392 с. (в ЗНБ СГУ 4 экз.)
4. Шалимова К. В. Физика полупроводников: учебник. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург; Москва ; Краснодар : Лань, 2010. – 390 с. (в ЗНБ СГУ 43 экз.)
5. Свойства материалов. Анизотропия, симметрия, структура [**Электронный ресурс**]: учебное пособие / Ньюнхем Роберт. - Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2019. - 652 с. - ЭБС "IPRBOOKS"

### б) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

1. Windows XP Prof
2. Антивирус Касперского 6.0 для Windows Workstations
3. Microsoft Office профессиональный 2010
4. MathCad 14.0
5. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц [**Электронный ресурс**] / Пер. с англ. – М.: Изд-во «Мир», 1960. – 377 с.

URL: <http://www.all-library.com/obrazovanie/fizika/51745-fizicheskie-svojstva-kristallov-i-ix-opisanie-pri.html> (дата обращения: 28.08.2021).

6. An Introduction to Crystal Physics/by Ervin Hartman/ [Электронный ресурс]. URL: [http://www.iucr.org/data/assets/pdf\\_file/0003/14790/18.pdf](http://www.iucr.org/data/assets/pdf_file/0003/14790/18.pdf) (дата обращения: 28.08.2021).

7. Каталог образовательных Интернет-ресурсов (<http://window.edu.ru>)

### **9. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Занятия по дисциплине «Кристаллография и кристаллофизика» проводятся в аудиториях, оснащенных компьютерной техникой, проекторами, наглядными демонстрационными материалами (моделями кристаллических структур и пр.).

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» с учётом профиля подготовки «Физика и технология твердотельных электронных микро- и наноструктур».

Автор

Профессор Названов В.Ф.

Программа разработана в 2019 г. и одобрена на заседании кафедры физики твёрдого тела от 03 декабря 2019 года, протокол № 4.

Программа актуализирована в 2021г. и одобрена на заседании кафедры физики твёрдого тела от 05 октября 2021 года, протокол № 3.

**Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

Рекомендуемая литература:

1. Ньюнхем Р.Э. Свойства материалов. Анизотропия, симметрия, структура. – М.-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Институт компьютерных исследований, 2007. – 652 с. (в НБ СГУ 1 экз.)
2. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Задачник по кристаллофизике/ Под ред. М.П. Шаскольской. 2-е изд. – М.: Наука, 1982. – 288 с. (в НБ СГУ 1 экз.)