

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  
Кафедра кристаллографии и экспериментальной физики

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

### **Рабочая программа дисциплины**

**Кристаллография**

---

Уровень высшего образования  
бакалавриат

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения: очная

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Кристаллография» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника», изучается на 3 году обучения в 5 семестре. Курс кристаллографии является первым курсом блока учебных дисциплин по физике конденсированного состояния и, в частности, физике твердого тела. Он является также необходимым при изучении студентами ряда спецкурсов по физике кристаллов, дифракционным методам исследования твердого тела, физике полупроводников и др. Для усвоения данного курса необходимо изучить следующие дисциплины в рамках образовательных программ бакалавра по направлениям Физика и Электроника и микроэлектроника:

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

### Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Кристаллография» являются: знакомство студентов с современными взглядами на атомное строение твердых тел, методами описания симметрии, атомного строения и внешней огранки кристаллов, формирование достаточно полного представления об основных методах аналитической геометрии кристаллического пространства, теории точечной и пространственной симметрии кристаллов и кристаллохимии.

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

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих 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	
ПК-1 Способен применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных	ПК-1.1. Знать физические явления и процессы, лежащие в основе работы приборов и устройств электроники и микроэлектроники. ПК-1.2. Уметь	Знать принципы кристаллографии, лежащие в основе работы приборов и устройств электроники и микроэлектроники. Уметь применять законы кристаллографии для достижения требуемых функциональных качеств	Вопросы по темам/разделам дисциплины.  Комплект задач.

качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники	применять фундаментальные представления о физических явлениях и процессах для достижения требуемых функциональных качеств приборов и устройств электроники и наноэлектроники	приборов и устройств электроники и наноэлектроники	Фонд тестовых заданий
--	--	--	-----------------------

### 3. Структура и содержание дисциплины "Кристаллография"

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	16
- контроль самостоятельной работы	1
самостоятельная работа	39 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	5 семестр – зачет

#### 3.2 содержание дисциплины «Кристаллография».

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	
	5 семестр очное					
Введение	1	1			1	
Аналитическая геометрия кристаллического пространства	22	5	5		10	12
Точечная симметрия кристаллов	14	4	4		8	6
Пространственная симметрия	13	3	4		7	6

кристаллических структур						
Основы кристаллохимии	21	3	3		6	15
В т.ч. текущий контроль	1					
Промежуточная аттестация – зачет						

#### Содержание разделов дисциплины.

1. Введение. Определение и основные свойства кристаллов, их роль в науке, технике и технологии.

2. Аналитическая геометрия кристаллического пространства. Основные постулаты кристаллического пространства. Трансляции. Кристаллическая решетка. Элементарная ячейка. Кристаллографические системы координат Узлы и их индексы. Узловые прямые и их описание. Индексы узловых прямых. Узловые плоскости. Индексы плоскостей. Первая основная теорема решетчатой кристаллографии. Обратная решетка и ее свойства. Вторая основная теорема решетчатой кристаллографии. Применение обратной решетки для описания дифракции волн на кристаллических решетках. Преобразование индексов плоскостей и координат точек кристаллического пространства при изменении базиса кристаллографической системы координат. Основные расчетные формулы решетчатой кристаллографии. Кристаллографические проекции.

3. Точечная симметрия кристаллов. Понятие о симметрии физических систем. Основные положения теории групп. Понятие о точечной симметрии кристаллов. Матричный метод описания симметрии кристаллов. Умножение операций точечной симметрии кристаллов. Точечные группы симметрии (некубические). Теорема Эйлера. Кубические точечные группы симметрии кристаллов. Сингонии. Международные обозначения точечных групп симметрии. Кристаллические многогранники и их свойства. Простые формы кристаллов. Влияние точечной симметрии кристаллов на геометрию кристаллической решетки. Предельные группы симметрии. Принцип суперпозиции Кюри и принцип Неймана.

4. Пространственная симметрия кристаллических структур. Решетки Бравэ. Операции пространственной симметрии атомных структур кристаллов и операторный метод их описания. Умножение операций пространственной симметрии атомных структур кристаллов. Пространственные группы симметрии кристаллических структур. Правильные системы точек пространственных групп.

5. Основы кристаллохимии. Химические связи в кристаллах. Принцип плотнейшей упаковки. Двухслойная и трехслойная упаковки одинаковых шаров. Пустоты. Симметрия двухслойной и трехслойной упаковок. Координаты шаров и пустот в двухслойной и трехслойной упаковках. Плотнейшие упаковки шаров двух сортов. Полиэдрический метод описания атомных структур кристаллов. Понятие о структурном типе. Структурные типы кристаллов химических элементов. Структурные типы с общей формулой  $A_nX_m$ . Полиморфизм, изоморфизм, морфотропия. Элементы кристаллохимии молекулярных кристаллов. Псевдосимметрия кристаллических структур.

6. Заключение. Новые материалы. Фуллерены. Квазикристаллы. Углеродные нанотрубки. Кристаллы белковых веществ.

#### План практических занятий.

1. Кристаллографические системы координат, символы узлов, узловых рядов и плоскостей
2. Обратная решетка и расчетные формулы кристаллографии
3. Закон зон
4. Основные положения теории групп

5. Операции и элементы симметрии
6. Матричный метод описания операций симметрии
7. Точечные группы симметрии
8. Простые формы кристаллов
9. Принципы суперпозиции Кюри и Неймана
10. Решетки Бравэ
11. Операторный метод описания операций симметрии
12. Операции пространственной симметрии кристаллических структур
13. Пространственные группы симметрии
14. Плотнейшие упаковки

#### **4. 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.

#### **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.**

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

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 «Кристаллография» используются нижеприведенные вопросы и задачи.

##### Вопросы для контроля

1. Каковы основные постулаты кристаллического пространства?
2. Определите понятия трансляций и кристаллической решетки.
3. Как преобразуются индексы узловых рядов и узловых плоскостей при изменении базиса кристаллографической системы координат?
4. Сформулируйте Первую Основную теорему решетчатой кристаллографии.
5. Сформулируйте Вторую Основную теорему решетчатой кристаллографии.
6. Сформулируйте основные свойства обратной решетки.
7. Приведите основные расчетные формулы решетчатой кристаллографии.
8. Сформулируйте основные принципы построения кристаллографических проекций.
9. Приведите основные положения теории групп.
10. В чем заключается матричный метод описания симметрии кристаллов.
11. Сформулируйте теоремы умножения операций микросимметрии кристаллов.
12. Приведите примеры точечных групп симметрии кристаллов.
13. Как связаны понятия: особые направления в кристалле и сингонии?
14. Приведите примеры простых форм и нарисуйте их гномостереографические проекции.
15. Каковы возможные виды решеток Бравэ для кристаллов низших сингоний.
16. В чем состоит операторный метод описания пространственных операций симметрии кристаллов?
17. Каковы принципы построения графиков пространственных групп кристаллов?
18. Перечислите Предельные группы симметрии, каковы их особенности?

##### Задачи для контроля

1. Найти индексы узловой плоскости, проходящей через три узла кристаллической решетки  $[[110]]$ ,  $[[101]]$ ,  $[[011]]$ .

2. Через две точки  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  кристаллического пространства с некоторым базисом  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  проведена прямая. При каких условиях данная прямая параллельна какому-либо узловому ряду?

3. Найти индексы плоскости  $(hkl)$ , в которой лежат узловые ряды  $[110]$  и  $[111]$ .

4. Показать эквивалентность зеркально–поворотной оси третьего порядка и инверсионной оси шестого порядка.

5. Проверить, будут ли выполняться соотношения: 1)  $2_x \times 2_y = 2_y \times 2_x$ ; 2)  $m_x \times m_y = m_y \times m_x$ ; 3)  $2_z \times m_z = m_z \times 2_z$ ; 4)  $3_z^1 \times m_z = m_z \times 3_z^1$ .

6. Какие координаты получит точка  $(x, y, z)$  после действия следующей операции симметрии? 1)  $m_y$ ; 2)  $2_z$ ; 3)  $2_{xz}$ ; 4)  $2_{yz}$ ; 5)  $4_x^1$ ; 6)  $4_z^1$ ; 7)  $4_z^{-1}$ ; 8)  $3_z^{-1}$ .

7. Вывести точечные группы симметрии и записать их символы двумя способами. Генераторы заданы следующими операциями симметрии: отражение в плоскости симметрии и поворот вокруг оси второго порядка, лежащей в этой плоскости.

8. Вывести точечные группы симметрии и записать их символы двумя способами. Генераторы заданы следующими операциями симметрии: отражения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях симметрии и поворот вокруг оси второго порядка, лежащей в одной и перпендикулярной второй плоскости.

9. Вывести точечные группы симметрии и записать их символы двумя способами. Генераторы заданы следующими операциями симметрии: поворот вокруг оси четвертого порядка и отражение в перпендикулярной ей плоскости симметрии.

10. Вывести точечные группы симметрии и записать их символы двумя способами. Генераторы заданы следующими операциями симметрии: два последовательных поворота вокруг осей второго порядка, составляющих между собой угол  $45^\circ$ .

11. Вывести точечные группы и записать их символы по Шенфлису и Герману-Могену. Генераторы заданы элементами симметрии: 1)  $4_z$  и  $2_x$ ; 2)  $2_z$ ,  $2_x$  и  $\bar{1}$ ; 3)  $6_z$ ,  $2_x$  и  $\bar{1}$ .

12. К кристаллу с точечной группой симметрии  $T$  приложено однородное электрическое поле вдоль направления: 1)  $[100]$ ; 2)  $[110]$ ; 3)  $[111]$ ; 4)  $[hk0]$ ; 5)  $[hkk]$ ; 6)  $[hkl]$ . Найти симметрию кристалла в поле.

13. Нарисовать график и записать общую правильную систему точек для пространственных групп:  $P2_12_12_1$ ;  $I222$ .

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

**6.1** 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 применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники

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 ошибки.	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, 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 несущественными 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	При решении	Имеется минимальный	Продemonстрированы	Продemonстрированы	Продemonстрированы	Продemonстрированы

	<p>владения материалом .</p> <p>Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа</p>	<p>стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.</p> <p>Имели место грубые ошибки.</p>	<p>базовый набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами</p>	<p>базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами</p>	<p>базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.</p>	<p>навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.</p>	<p>творческий подход к решению нестандартных задач</p>
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

## 6.2 Описание шкал оценивания

### Критерии оценок зачета:

зачтено – успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем, владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания.

незачтено – невыполнение практических заданий, выданных преподавателем, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации. 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.

**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 «Кристаллография»

а) основная литература:

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> (30 экз)
2. Задачи по кристаллографии. Головачев В. П., Сафьянов Ю. Н., Чупрунов Е. В., Фадеев М. А., Хохлов А. Ф. М.: Физматлит, 2003. - 208 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=59115&DB=1> (195 экз)

б) дополнительная литература:

1. Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П., Егоров-Тисменко Ю.К. - Геометрическая кристаллография: М.: Изд-во МГУ, 1986. – 165 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=102106&DB=1> (11 экз)
2. Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П. Геометрическая микрокристаллография. М.: Изд. МГУ, 1976, 238 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=102107&DB=1> (36 экз)
3. Костов И. Кристаллография. М.: Мир, 1965, 528 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=100118&DB=1> (10 экз)
4. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000, 494 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=44686&DB=1> (20 экз)

- 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>
2. Задачи по кристаллографии. Головачев В. П., Сафьянов Ю. Н., Чупрунов Е. В., Фадеев М. А., Хохлов А. Ф. М.: Физматлит, 2003. - 208 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=59115&DB=1>

б) дополнительная литература:

1. Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П., Егоров-Тисменко Ю.К. - Геометрическая кристаллография: М.: Изд-во МГУ, 1986. – 165 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=102106&DB=1>
2. Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П. Геометрическая микрокристаллография. М.: Изд. МГУ, 1976, 238 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=102107&DB=1>
3. Костов И. Кристаллография. М.: Мир, 1965, 528 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=100118&DB=1>
4. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000, 494 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=44686&DB=1>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

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

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Кристаллография»

Материально-техническое обеспечение дисциплины «Кристаллография» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке, некоторые из них представлены на сайте физического факультета в электронном виде. Кроме того, при необходимости выполнения некоторых математических расчетов студенты могут

воспользоваться техническими возможностями терминал-класса с установленным лицензионным программным обеспечением.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

Автор: доцент каф. КЭФ, к.ф.-м.н.

Овсецина Т.И.

Рецензент:

заведующий кафедрой

теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой

КРЭФ д.ф.-м.н. профессор

Е. В. Чупрунов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ

А.А. Перов