


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
Физики твердого тела и наноструктур
 (П.В.Середин)
31.08.2022

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Б1.О.18 Кристаллография и кристаллофизика

Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

2. Профиль подготовки/специализация: Интегральная электроника и наноэлектроника

3. Квалификация выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: физики твердого тела и наноструктур

6. Составители программы: Голощапов Д.Л., к.ф.-м.н., доцент

7. Рекомендована: МС физического факультета от 14.06.2024 г. протокол №6

8. Учебный год: 2023-2024

Семестр(ы): 4

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются: формирование у обучающихся комплекса знаний, умений, навыков и компетенций, необходимых для описания структуры кристаллов и их физических свойств при освоении теоретических основ и практическом использовании физических методов.

Задачи учебной дисциплины:

- получение систематизированного представления о закономерностях атомного строения кристаллов, их симметрии;
- формирование навыков построения и применения моделей кристаллических структур, и проведения расчетов по различным моделям
- формирование знаний о связи фундаментальных свойств кристаллов с их атомным строением,
- усвоение основ тензорного описания физических свойств кристалла, принципов сложения симметрии внешних воздействий с симметрией самого кристалла.
- формирование представлений о закономерности изменения свойств кристаллов под влиянием внешних воздействий;
- развитие у обучающихся навыков экспериментального исследования кристаллических структур и приемов обработки и представления полученных данных

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина Б1.О.18 Кристаллография и кристаллофизика относится к обязательным дисциплинам базового блока Б1.

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

| Код | Название компетенции | Код(ы) | Индикатор(ы) | Планируемые результаты обучения |
|---------|--|---|--|---|
| ОПК-1 | Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности | ОПК-1.1 | Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов | Знать: фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы |
| | | | | Уметь: применять фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы |
| | | | | Владеть: навыками использования фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов |
| | | ОПК-1.2 | Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера | Знать: физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера |
| | | | | Уметь: применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера |
| | | | | Владеть: навыками применения физических законов и математических методов для решения задач теоретического и прикладного характера |
| ОПК-1.3 | Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности | Знать: положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности | | |
| | | Уметь: использовать положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности | | |

| | | | | |
|-------|---|---------|---|--|
| | | | й деятельности | Владеть: навыками использования положений, законов и методов естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности |
| ОПК-2 | Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных | ОПК-2.4 | Выбирает способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований | Знать: способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований Уметь: выбирать способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований Владеть: навыками выбора способов и средств измерений для проведения экспериментальных исследований |

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час - 6/216.

Форма промежуточной аттестации(зачет/экзамен) экзамен

13. Трудоемкость по видам учебной работы

| Вид учебной работы | | Трудоемкость | |
|--|--------------|--------------|--------------|
| | | Всего | По семестрам |
| | | | Семестр № 4 |
| Аудиторные занятия | | 102 | 102 |
| в том числе: | лекции | 34 | 34 |
| | практические | | |
| | лабораторные | 68 | 68 |
| Самостоятельная работа | | 78 | 78 |
| Контроль | | | |
| Форма промежуточной аттестации – экзамен | | 36 | 36 |
| Итого: | | 216 | 216 |

13.1. Содержание дисциплины

| п/п | Наименование раздела дисциплины | Содержание раздела дисциплины |
|------------------|---------------------------------|--|
| 1. Лекции | | |
| 1.1 | Симметрия кристаллов | Кристаллическое состояние: основные характеристики. Элементы симметрии кристаллических многогранников. Матричное представление симметрических операций. Преобразование осей кристаллофизической системы координат, компонент вектора и координат точки. Точечные группы симметрии кристаллов. Операции и элементы симметрии конечных фигур I и II рода (ось симметрии – поворотные, зеркальные и инверсионные, плоскость симметрии и центр симметрии). Их обозначение в символике Браве. Основной закон симметрии кристаллов - невозможность осей симметрии V порядка и выше порядков. Теоремы о сочетании элементов симметрии и их использование при выводе 32-х кристаллографических классов. Предельные группы симметрии Юри. Координатные системы в кристаллографии, категории, сингонии. Международная символика и символика А. Шенфлиса точечных классов (групп) симметрии. Кристаллографические проекции. Сферическая проекция, полярный комплекс кристалла. Стереографическая проекция. Гномографическая проекция. Сетка Вульфа. |

| | | |
|--------------------------------|---|--|
| | | Закон постоянства углов – основной закон кристаллографии. |
| 1.2 | Метод кристаллического индирования | Символы узлов, ребер, граней кристалла. Понятие «символ грани кристалла». Индексы Миллера. Закон Гаюи – закон рациональности отношения параметров граней. Понятие «единичная грань» и ее выбор в кристаллах разных сингоний.. Связь символов граней и ребер кристалла. |
| 1.3 | Элементы математического аппарата теории групп | Понятие группы. Порядок группы, порядок элемента. Понятие циклической, абелевой групп. Понятие подгруппы. Нормальный делитель. Классы сопряженных элементов. Точечные группы кристаллических многогранников. |
| 1.4 | Симметрия структуры кристаллов | Структура кристаллов и пространственная решетка. Типы решеток Браве. Определение элементарной ячейки – ячейки Браве. Примитивная, условная ячейки Браве. Элементы симметрии кристаллических структур. Трансляционные элементы симметрии – плоскости скользящего отражения, винтовые оси. Общие представления о 230 пространственных группах симметрии. Обратная решетка. Основные свойства обратной решетки. Основные формулы структурной кристаллографии. |
| 1.5 | Физические свойства идеальных кристаллов и симметрия | Основной закон кристаллофизики (принцип Неймана). Принцип суперпозиции симметрии (принцип Кюри). Типы связей в кристаллах. Химическая связь, ближней порядок и основные типы твердых тел: металлы, полупроводники, ионные кристаллы. |
| 1.6 | Тензорное описание. Физические свойства кристаллов, описываемые тензором первого ранга. | Тензорное описание физических свойств кристаллов и внешних воздействий. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект в кристаллах. Ограничения, налагаемые симметрией кристалла. Применение прямого и обратного пьезоэффектов |
| 1.7 | Физические свойства кристаллов, описываемые тензором второго ранга | 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. |
| 1.8 | Дефекты в кристаллах. | Дефекты кристаллической структуры. Основные типы дефектов. Влияние на оптические и электрофизические свойства. . Методы наблюдений. |
| 1.9 | Основные методы исследования кристаллов | Дифракционные методы исследования кристаллов. Дифрактометрический метод исследования. Общее интерференционное уравнение Лауэ, его интерпретация с помощью сферы Эвальда. Связь общего интерференционного уравнения Лауэ с уравнением Вульфа - Брэгга. Интенсивность дифракционных максимумов. Правила погасаний (непогасаний). Основные методы рентгеноструктурного анализа. Другие методы исследования структуры кристаллов. Электронография. Электронная микроскопия. |
| 2. Лабораторные занятия | | |
| 2.1 | Симметрия кристаллов | Лабораторная работа №1. Определение элементов симметрии, сингонии и категории кристаллов Лабораторная работа №2. Решение кристаллографических задач на сетке Вульфа |
| 2.2 | Метод кристаллического индирования | Лабораторная работа №3. Установка кристаллов. Определение символов (индексов) граней кристаллов |
| 2.3 | Симметрия структуры кристаллов | Лабораторная работа №4. Определение типов пространственной решетки и ее элементов |
| 2.4 | Основные методы исследования кристаллов | Лабораторная работа №5. Метод Лауэ. Определение симметрии кристалла. Лабораторная работа №6. Анализ элементного состава твердых тел рентгенофлюоресцентным методом. Лабораторная работа №7. Анализ фазового состава твердых тел рентгенодифрактометрическим методом. |

| | | |
|--|--|---|
| | | Лабораторная работа №8. Исследование фононных спектров материалов полупроводниковой электроники. Лабораторная работа №9. Исследование влияния поляризации на фононные спектры. |
|--|--|---|

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

| № п/п | Наименование темы (раздела) дисциплины | Виды занятий (количество часов) | | | | |
|-------|---|---------------------------------|----------|--------------|------------------------|-------|
| | | Лекции | Контроль | Лабораторные | Самостоятельная работа | Всего |
| 1 | Симметрия кристаллов | 6 | 6 | 16 | 16 | 44 |
| 2 | Метод кристаллического индифицирования | 2 | 4 | 8 | 8 | 22 |
| 3 | Элементы математического аппарата теории групп | 4 | 4 | | 6 | 14 |
| 4 | Симметрия структуры кристаллов | 4 | 4 | 8 | 10 | 26 |
| 5 | Физические свойства идеальных кристаллов и симметрия | 4 | 4 | | 6 | 14 |
| 6 | Тензорное описание. Физические свойства кристаллов, описываемые тензором первого ранга. | 4 | 4 | | 6 | 14 |
| 7 | Физические свойства кристаллов, описываемые тензором второго ранга | 4 | 4 | | 6 | 14 |
| 8 | Дефекты в кристаллах. | 2 | 2 | | 6 | 10 |
| 9 | Основные методы исследования кристаллов | 4 | 4 | 36 | 14 | 58 |
| | Итого: | 34 | 36 | 68 | 78 | 216 |

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Для успешного усвоения дисциплины «Кристаллография и кристаллофизика» необходимо освоить и изучить основные разделы, а именно темы: Симметрия твердых тел. Точечные группы, группы трансляции пространственные группы. Прямая и обратная решетки, взаимный векторный базис. Силы связи в твердых телах. Химическая связь, ближней порядок и основные типы твердых тел: металлы, полупроводники, ионные кристаллы. Дифракционные методы исследования кристаллов. Для успешной сдачи экзамена по курсу, необходимо выучить конспекты лекций по всем темам, а также успешно написать две текущие контрольные в течение семестра.

Дисциплина «Кристаллофизика и кристаллография» реализуется с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий. В учебном процессе используются следующие образовательные технологии. По образовательным формам: лекции; лабораторные работы; индивидуальные занятия. По преобладающим методам и приемам обучения: объяснительно-иллюстративные (объяснение, показ–демонстрация учебного материала и др.); активные (анализ учебной и научной литературы, составление схем и др.) и интерактивные, информационные; компьютерные; мультимедийные (работа с сайтами академических структур, научно-исследовательских организаций, электронных библиотек и др., , работа с электронными обучающими программами и т.п.). Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов. Студентам, чтобы хорошо овладеть учебным материалом, необходимо выработать навыки правильной и планомерной работы. Перед началом лекционных занятий надо просмотреть все, что было сделано в предыдущий раз. Это позволит сосредоточить внимание и восстановить в памяти уже имеющиеся знания по данному предмету. Кроме того, такой метод поможет лучше запомнить как старое, так и новое, углубит понимание

того и другого, так как при этом устанавливаются связи нового со старым, что является не только обязательным, но и основным условием глубокого овладения материалом. Чем детальнее изучаемое ассоциируется с известным ранее, тем прочнее сохраняется в памяти и быстрее вспомнить, когда требуется.

Следует помнить о том, что через лекцию передается не только систематизированный теоретический материал, но и постигается методика научного исследования и умение самостоятельно работать, анализировать различного рода явления.

Записывать на лекции необходимо главное, не стремясь зафиксировать все слово в слово. Выбрать же главное без понимания предмета невозможно. Наличие собственного конспекта лекций позволяет еще раз ознакомиться, продумать, разобраться в новом материале, так как недостаточно хорошо понятые во время лекции положения могут быть восстановлены в памяти, сопоставлены с другими, додуманы, дополнены, уяснены и расширены с помощью учебной литературы. Записи являются пособиями для повторения, дают возможность охватить содержание лекции и всего курса в целом.

При этом хорошо овладеть содержанием лекции – это:

- знать тему;
- понимать значение и важность ее в данном курсе;
- четко представлять план;
- уметь выделить основное, главное;
- усвоить значение примеров и иллюстраций;
- связать вновь полученные сведения о предмете или явлении с уже имеющимися;
- представлять возможность и необходимость применения полученных сведений.

Существует несколько общих правил работы на лекции:

- лекции по каждому предмету записывать удобнее в отдельных тетрадях, оставляя широкие поля для пометок;
- к прослушиванию лекций следует готовиться, что позволит в процессе лекции отделить главное от второстепенного;
- лекции необходимо записывать с самого начала, так как оно часто бывает ключом ко всей теме;
- так как дословно записать лекцию невозможно, то необходимо в конспекте отражать: формулы, определения, схемы, трудные места, мысли, примеры, факты и положения от которых зависит понимание главного, новое и неизвестное, неопубликованные данные, материал отсутствующий в учебниках и т.п.;
- записывать надо сжато;
- во время лекции важно непрерывно сохранять рабочую установку, умственную активность.

Изучение теоретического материала в данном курсе не ограничивается подготовкой к лекциям и работой на данном виде занятий. Лекционная часть курса органически взаимосвязана с иными видами работ: написанием рефератов, участием в лабораторных работы, подготовкой и сдачей зачета по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента. Лабораторные и практические занятия выполняются студентами под руководством преподавателя. При выполнении практических работ студенты используют материально-техническое обеспечение кафедры.

Самостоятельная работа – планируемая работа обучающихся, выполняется по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Самостоятельная работа подразделяется на самостоятельную работу на аудиторных занятиях и на внеаудиторную самостоятельную работу. Самостоятельная работа обучающихся включает как полностью самостоятельное освоение отдельных тем (разделов) дисциплины, так и проработку тем (разделов), осваиваемых во время аудиторной работы. Во время самостоятельной работы обучающиеся читают и конспектируют учебную, научную и справочную литературу, выполняют задания, направленные на закрепление знаний и отработку умений и навыков, готовятся к текущему и промежуточному контролю по дисциплине.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных обучающимся знаний. Основной, наиболее экономичной формой получения и усвоения информации, теоретических знаний в вузе является лекция, позволяющая воспринять значительную сумму основных знаний и потому способствующая повышению продуктивности всех других форм учебного труда.

Результат обучения и самостоятельной работы обучающегося предполагает наличие следующих составляющих:

- понимание методологических основ построения изучаемых знаний;
- выделение главных структур учебного курса;
- формирование средств выражения в данной области;
- построение методик решения задач и ориентации в проблемах (ситуациях).

Самостоятельная работа обучающихся при изучении дисциплины «Кристаллография и кристаллофизика» включает в себя: изучение теоретической части курса, подготовку к выполнению лабораторных работ, написание отчетов по лабораторным работам.

Самостоятельная работа студента при изучении дисциплины «Кристаллография и кристаллофизика» включает в себя

- изучение теоретической части курса – 54 часа
- подготовку к лабораторным занятиям – 18 часов
- написание отчетов по лабораторным работам – 6 часов
- итого – 78 часов

Подготовка к экзамену – 36 часов

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины (список литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ и используется общая сквозная нумерация для всех видов источников)

а) основная литература:

| № п/п | Источник |
|-------|---|
| 1 | Басалаев, Ю.М. Кристаллофизика и кристаллохимия : учебное пособие / Ю.М. Басалаев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет». - Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2014. - 403 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru |
| 2 | Бойко, С.В. Кристаллография и минералогия. Основные понятия : учебное пособие / С.В. Бойко ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный университет. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2015. - 212 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru |
| 3 | Кристаллофизика [Электронный ресурс]: учеб.пособие / О. Р. Семенова; Перм. гос. нац. исслед.ун-т. – Электрон. дан. – Пермь, 2019. – 5,99 Мб; 179 с. – Режим доступа: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/semenovakristallofizika.pdf . |
| 4 | Диденко, И. С. Кристаллофизика. Симметрия кристаллических многогранников. Лабораторный практикум : учебное пособие / И. С. Диденко, В. В. Гераськин. — Москва : МИСИС, 2011. — 76 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/51700 (дата обращения: 02.02.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей. |
| 5 | Бердинский, В. Л. Кристаллофизика : учебное пособие / В. Л. Бердинский, О. Н. Каныгина, А. Г. Четверикова. — Оренбург : ОГУ, 2016. — 104 с. — ISBN 978-5-7410-1619-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/110675 |
| 6 | Сергеев, Н. А. Кристаллофизика : монография / Н. А. Сергеев. — Москва : Логос, 2020. — 160 с. — ISBN 978-5-98699-182-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/163083 (дата обращения: 03.02.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей. |
| 7 | Розин, К. М. Кристаллофизика : учебное пособие / К. М. Розин, В. С. Петраков. — Москва : МИСИС, 2006. — 249 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/51712 |

б) дополнительная литература:

| № п/п | Источник |
|-------|--|
| 8 | Сиротин Ю.И. Основы кристаллофизики: учебное пособие для студ. физич. специальностей вузов./ Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. - М.: Наука, 1979. - 639 с. |
| 9 | Кристаллография и кристаллохимия [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие : [для студ. бакалавриата и специалитета 1 курса очной и 2 курса заочной форм обучения направления 05.03.01 - Геология] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост. О.Г. Резникова и |

| | |
|----|--|
| | др.] — Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2019 .— Загл. с титула экрана .— Для зарегистрированных читателей ВГУ .— Текстовый файл .— <URL:http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m19-124.pdf>. |
| 10 | Основы геометрической кристаллографии : учебное пособие / К.Л. Новоселов ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 73 с. |
| 11 | Белов, Н. П. Основы кристаллографии и кристаллофизики : учебное пособие / Н. П. Белов, О. К. Покопцева, А. Д. Яськов. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, [б. г.]. — Часть I : Введение в теорию симметрии кристаллов — 2009. — 43 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/43438 |

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:

| № п/п | Ресурс |
|-------|--|
| 12 | http://www.lib.vsu.ru – Зональная научная библиотека ВГУ |
| 13 | http://e.lanbook.com - ЭБС «ЛАНЬ» |
| 14 | https://edu.vsu.ru – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ" |
| 15 | http://www.moodle.vsu.ru |
| 16 | https://biblioclub.ru – ЭБС «Университетская библиотека онлайн» |
| 17 | https://elibrary.ru – Научная электронная библиотека |

* Вначале указываются ЭБС, с которыми имеются договора у ВГУ, затем открытые электронно-образовательные ресурсы, онлайн-курсы, ЭУМК

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных), курсовых работ и др.)

| № п/п | Источник |
|-------|---|
| 1 | Точечные группы симметрии кристаллов: Учебное пособие для вузов / М.К. Шаров, Б.М. Даринский, А.М. Самойлов, В.Ф. Кострюков – Издательский дом ВГУ, 2016. – 38 с. |
| 2 | Исследование особенностей атомного и электронно-энергетического строения металлов, полупроводников и диэлектриков [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Воронеж. гос. ун-т ; сост.: Ю.А. Юраков [и др.] .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2021 .— Загл. с титул. экрана .— Для зарегистрированных читателей ВГУ .— Текстовый файл .— <URL:http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m21-93.pdf>. |
| 3 | Исследование наноструктурированных материалов методом растровой электронной микроскопии [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для вузов : [для магистрантов, обуч. по профилю "Нанотехнология в электронике ; для направления 210100- Электроника и наноэлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; сост. : Ю.А. Юраков, А.С. Леньшин, П.В. Середин .— Электрон. текстовые дан. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2014 .— Загл. с титул. экрана .— для зарегистрированных читателей ВГУ .— Текстовый файл .— <URL:http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m14-26.pdf>. |

17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

При проведении занятий по курсу Кристаллография и кристаллофизика используются следующие образовательные технологии. По образовательным формам: лекции; лабораторные работы, групповые консультации, индивидуальные занятия. По преобладающим методам и приемам обучения: объяснительно-иллюстративные (объяснение, показ–демонстрация учебного материала (моделей, презентаций) и др.); активные (анализ учебной и научной литературы, и др.) и интерактивные, в том числе и групповые (взаимное обучение в форме подготовки и обсуждения докладов); информационные; компьютерные; мультимедийные (работа с сайтами академических структур, научно-исследовательских организаций, электронных библиотек и др., разработка презентаций, работа с электронными обучающими программами и т.п.).

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Лаборатория рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа (к.25): Рентгеновский спектрометр-монокроматор РСМ-500 - 1 шт., макеты кристаллических решеток основных материалов электроники.; Лаборатория рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа (лаб. 21): рентгеновский дифрактометр Радиан ДР-023 - 1 шт., спектрометр универсальный рентгеновский «Реном» СУР-01 - 1 шт; лабораторная установка Leybold rontgengerat X-ray apparatus 554800 - 1 шт. Совместная лаборатория физики наногетероструктур и полупроводниковых материалов (к 28): Рамановский спектрометр совмещенный с микроскопом РамМикс 532М (EnSpectrM, Черногловка, Россия)

Реализация дисциплины с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий осуществляется через образовательный портал "Электронный университет ВГУ".

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

| № п/п | Наименование раздела дисциплины (модуля) | Компетенция(и) | Индикатор(ы) достижения компетенции | Оценочные средства |
|---|---|----------------|-------------------------------------|--|
| 1. | Симметрия кристаллов | ОПК-1 | ОПК-1.1 | Устный опрос Лабораторная работа 1 Лабораторная работа 2 |
| | | | ОПК-1.2 | |
| 2. | Метод кристаллического индицирования | ОПК-1 | ОПК- 1.3 | Устный опрос Лабораторная работа 3 |
| 3. | Элементы математического аппарата теории групп | ОПК-1 | ОПК-1.1 | Устный опрос |
| 4. | Симметрия структуры кристаллов | ОПК-1 | ОПК-1.1 | Устный опрос Лабораторная работа 4 |
| | | | ОПК-1.2 | |
| 5. | Физические свойства идеальных кристаллов и симметрия | ОПК-1 | ОПК-1.1 | Устный опрос |
| 6. | Тензорное описание. Физические свойства кристаллов, описываемые тензором первого ранга. | ОПК-1 | ОПК-1.1 | Устный опрос |
| 7. | Физические свойства кристаллов, описываемые тензором второго ранга | ОПК-1 | ОПК-1.1 | Устный опрос |
| 8. | Дефекты в кристаллах. | ОПК-1 | ОПК-1.1 | Устный опрос |
| | | | ОПК-1.2 | |
| 9. | Основные методы исследования кристаллов | ОПК-2 | ОПК-2.4 | Устный опрос Лабораторная работа 5-9 |
| Промежуточная аттестация форма контроля - экзамен | | | | Комплет КИМ |

20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1 Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: отчеты о выполнении лабораторных работ, проведение устных опросов.

Перечень тем лабораторных работ

- Лабораторная работа №1. Определение элементов симметрии, сингонии и категории кристаллов
 Лабораторная работа №2. Решение кристаллографических задач на сетке Вульфа
 Лабораторная работа №3. Установка кристаллов. Определение символов (индексов) граней кристаллов
 Лабораторная работа №4. Определение типов пространственной решетки и ее элементов
 Лабораторная работа №5. Метод Лауэ. Определение симметрии кристалла.
 Лабораторная работа №6. Анализ элементного состава твердых тел рентгенофлюоресцентным методом.
 Лабораторная работа №7. Анализ фазового состава твердых тел рентгенодифрактометрическим методом.
 Лабораторная работа №8. Исследование фононных спектров материалов полупроводниковой электроники.
 Лабораторная работа №9. Исследование влияния поляризации на фононные спектры.

Для текущего контроля успеваемости используется устный опрос, отчеты о ходе выполнения лабораторных работ, на основе которых выставляется предварительная оценка отлично/хорошо/удовлетворительно/неудовлетворительно.

| Критерии оценивания компетенций | Уровень сформированности компетенций | Шкала предварительных оценок |
|--|--------------------------------------|------------------------------|
| Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для выполнения лабораторных работ | Повышенный уровень | <i>Отлично</i> |
| Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), допускает незначительные ошибки при выполнении лабораторных работ | Базовый уровень | <i>Хорошо</i> |
| Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен выполнять лабораторные работы | Пороговый уровень | <i>Удовлетворительно</i> |
| Неудовлетворительное выполнение тестовых заданий. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при выполнении лабораторных работ | – | <i>Неудовлетворительно</i> |

Описание технологии проведения.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации

обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета – в форме лабораторной работы. Критерии оценивания приведены выше. Результаты текущей аттестации учитываются преподавателем при проведении промежуточной аттестации (экзамена). В условиях применения электронного обучения и дистанционных образовательных

технологий все выполняемые задания текущей аттестации (контрольной работы) обучающиеся вывешивают для проверки в личных кабинетах на портале «Электронный университет ВГУ» – URL:<https://edu.vsu.ru/>

20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: теоретических вопросов. В контрольно-измерительный материал включаются два теоретических вопроса. Контрольно-измерительные материалы предназначены для тех обучающихся, которым нет возможности выставить зачет по результатам текущей аттестации в семестре (в связи с ее невыполнением / неудовлетворительным выполнением).

Перечень вопросов к экзамену

Контрольно-измерительный материал №1

1. Кристаллическое состояние: основные характеристики. Элементы симметрии кристаллических многогранников.
2. Основной закон кристаллофизики (принцип Неймана).

Контрольно-измерительный материал №2

1. Матричное представление симметрических операций. Преобразование осей кристаллофизической системы координат
2. Принцип суперпозиции симметрии (принцип Кюри)

Контрольно-измерительный материал №3

1. Точечные группы симметрии кристаллов. Операции и элементы симметрии конечных фигур I и II рода
2. Типы связей в кристаллах. Химическая связь, ближний порядок и основные типы твердых тел

Контрольно-измерительный материал №4

1. Основной закон симметрии кристаллов - невозможность осей симметрии V порядка и выше.
2. Тензорное описание физических свойств кристаллов и внешних воздействий

Контрольно-измерительный материал №5

1. Теоремы о сочетании элементов симметрии и их использование при выводе 32-х кристаллографических классов
2. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект в кристаллах. Ограничения, налагаемые симметрией кристалла. Применение прямого и обратного пьезоэффектов

Контрольно-измерительный материал №6

1. Предельные группы симметрии Кюри. Координатные системы в кристаллографии, категории, сингонии
2. Симметрия полярных тензоров второго ранга.

Контрольно-измерительный материал №7

1. Международная символика и символика А. Шенфлиса точечных классов (групп) симметрии
2. Характеристическая поверхность второго порядка для тензора второго ранга, ее геометрические образы и симметрия

Контрольно-измерительный материал №8

1. Кристаллографические проекции. Сферическая проекция, полярный комплекс кристалла. Стереографическая проекция.
2. Тензоры диэлектрической проницаемости и непроницаемости кристаллов.

Контрольно-измерительный материал №9

1. Гномографическая проекция. Сетка Вульфа. Закон постоянства углов – основной закон кристаллографии.
2. Описание распространения света в анизотропных кристаллах с помощью оптических индикатрис.

Контрольно-измерительный материал №10

1. Символы узлов, ребер, граней кристалла. Понятие «символ грани кристалла».
2. Тензоры механических напряжений и деформаций как примеры полевых симметричных тензоров второго ранга.

Контрольно-измерительный материал №11

1. Индексы Миллера. Закон Гаюи – закон рациональности отношения параметров граней.
2. Дефекты кристаллической структуры. Основные типы дефектов.

Контрольно-измерительный материал №12

1. Понятие «единичная грань» и ее выбор в кристаллах разных сингоний.. Связь символов граней и ребер кристалла.
2. Влияние дефектов кристаллической структуры на оптические и электрофизические свойства. . Методы наблюдений.

Контрольно-измерительный материал №13

1. Понятие группы. Порядок группы, порядок элемента. Понятие циклической, абелевой групп.
2. Дифракционные методы исследования кристаллов. Дифрактометрический метод исследования.

Контрольно-измерительный материал №14

1. Понятие подгруппы. Нормальный делитель. Классы сопряженных элементов. Точечные группы кристаллических многогранников.
2. Общее интерференционное уравнение Лауэ, его интерпретация с помощью сферы Эвальда.

Контрольно-измерительный материал №15

1. Структура кристаллов и пространственная решетка. Типы решеток Браве.
2. Связь общего интерференционного уравнения Лауэ с уравнением Вульфа - Брэгга.

Контрольно-измерительный материал №16

1. Определение элементарной ячейки – ячейки Браве. Примитивная, условная ячейки Браве.
2. Интенсивность дифракционных максимумов. Правила погасаний (непогасаний).

Контрольно-измерительный материал №17

1. Элементы симметрии кристаллических структур. Трансляционные элементы симметрии – плоскости скользящего отражения, винтовые оси.
2. Основные методы рентгеноструктурного анализа. Другие методы исследования структуры кристаллов.

Контрольно-измерительный материал №18

1. Общие представления о 230 пространственных группах симметрии.
2. Электронография. Электронная микроскопия.

Контрольно-измерительный материал №19

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

Описание технологии проведения промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация по дисциплине – экзамен. В приложение к диплому вносится оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно*.

Оценка уровня освоения дисциплины «Программирование на языке высокого уровня» осуществляется по следующим показателям:

- качество и своевременность выполнения лабораторных работ;
- полнота ответов на вопросы контрольно-измерительного материала;
- полнота ответов на дополнительные вопросы.

Критерии оценки освоения дисциплины «Кристаллография и кристаллофизика»:

– оценка *отлично* выставляется при полном соответствии работы студента всем вышеуказанным показателям. Соответствует высокому (углубленному) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически, в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей повышенный (продвинутый) уровень;

– оценка *хорошо* выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует одному из перечисленных показателей или в случае предоставления курсовых работ и отчетов по лабораторным работам позже установленного срока. Соответствует повышенному (продвинутому) уровню сформированности компетенций: компетенции в целом сформированы, но проявляются и используются фрагментарно, не в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей пороговый (базовый) уровень;

– оценка *удовлетворительно* выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует любым двум из перечисленных показателей. Соответствует пороговому (базовому) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы в общих чертах, проявляются и используются ситуативно, частично. Данный уровень обязателен для всех осваивающих основную образовательную программу;

– оценка *неудовлетворительно* выставляется в случае несоответствия работы студента всем показателям, его неорганизованности, безответственности и низкого качества работы при выполнении лабораторных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Факт невыполнения требований, предъявляемых к студенту при освоении дисциплины «Программирование на языке высокого уровня» и отраженных в вышеперечисленных критериях, фиксируется в ведомости оценкой *неудовлетворительно*.

Если студент не осваивает дисциплину в установленном программой объеме и в сроки, определенные графиком учебного процесса, он не допускается к промежуточной аттестации по данному виду учебной работы.

20.3 Фонд оценочных средств сформированности компетенций рекомендуемый для проведения диагностических работ:

Перечень заданий для оценки сформированности компетенций

1. Закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности)

1. Что является элементами точечной симметрии кристаллов?
 - a) плоские грани, прямые ребра, вершины углов;
 - b) поворотные оси, центр симметрии и плоскости зеркального отражения;**
 - c) прямые ребра и вершины углов;

- d) углы, отдельные зоны
2. Чему в пространственной решетке соответствуют грани кристалла?
- a) Сеткам
b) Рядам
c) Ячейкам
d) Ничему
3. Какому другому (им) элементу(ам) симметрии соответствует инверсионная ось симметрии третьего порядка?
- a) Никакому
b) Оси симметрии третьего порядка
c) Оси симметрии третьего порядка и плоскости симметрии
d) **Оси симметрии третьего порядка и центру инверсии**
4. Принцип Неймана позволяет
- a) определить точечную группу симметрии кристалла, зная свойства этого кристалла;
b) по результатам изучения изменения физических свойств в поле физического воздействия определять точечную группу симметрии кристалла;
c) **зная точечную группу симметрии кристалла, определять симметрию его возможных физических свойств**
a) определить пространственную группу симметрии кристалла, зная свойства этого кристалла;
5. Кристаллы каких из перечисленных точечных групп симметрии могут обладать пьезоэлектрическими свойствами?
- a) $2/m$;
b) **$4m$** ;
c) 222 ;
d) $6/m$;
e) mmm .

2. Открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности)

1. Найти символ плоскости, параллельной осям X и Z и отсекающей три единицы на оси Y.
Ответ: (010);
2. К кубическому кристаллу симметрии $m\bar{3}m$ приложили одноосное напряжение растяжения, обладающее группой симметрии ∞/mmm . Какой симметрией будет обладать кристалл, если напряжение прикладывается вдоль: $[0\ 0\ 1]$
Ответ: $4/m\bar{3}m$, т. е. тетрагональная;
3. Система плоскостей в примитивной кубической решетке задана индексами Миллера (221). Найти наименьшие отрезки, отсекаемые плоскостью на осях координат, и изобразить эту плоскость графически
Ответ: $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 1$;
4. В следствии наличия каких элементов симметрии кристаллы относимые к кубической сингонии не могут иметь физическим свойством, описываемым тензором 1-ого ранга.
Ответ: четырех осей симметрии 3-го порядка
5. Какие из кристаллов моноклинной системы имеют векторные физические свойства.
Ответ: 2 и m;

3. Открытые задания (мини-кейсы, средний уровень сложности) Комментарий: поскольку мини-кейсы предполагают свободные ответы обучающихся, допускаются иные (верные), помимо указанных ниже, формулировки ответа и фактологические данные.

1. Найти индексы узлового ряда, проходящего через два узла кристаллической решетки с символами 101.
Ответ: Семейство параллельных узловых рядов характеризуют вектором, проходящим через начало координат и ближайший узел решетки, индексы которого и являются индексами узлового ряда. Любой узел решетки определяется радиус-вектором $R = ma + nb + pc$, где a , b и c – базисные векторы, а целые числа m , n , p – индексы узла. Для двух узлов $m_1n_1p_1$ и $m_2n_2p_2$ радиусы-векторы будут $R_1 = m_1a + n_1b + p_1c$ и $R_2 = m_2a + n_2b + p_2c$ соответственно. Если поместить узел $m_1n_1p_1$ в начало координат, радиус вектор узла $m_2n_2p_2$ в новой системе координат приобретет вид $R_2 - R_1 = (m_2 - m_1)a + (n_2 - n_1)b + (p_2 - p_1)c$. Следовательно, при выборе

начала координат в узле 101 символ второго узла станет 010, а символ проходящего через оба узла узлового ряда будет [010]

2. Какому преобразованию соответствуют последовательно выполненные операции отражения в плоскости m_y и поворота вокруг оси $2x$?

Ответ: Запишем и перемножим матрицы операций симметрии m_y и $2x$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Полученная матрица соответствует операции отражения в плоскости m_z .

3. В структуре металлического индия кристаллическая плотная упаковка атомов деформирована вдоль оси 4-го порядка. Определить пространственную группу металла и позиции атомов индия.

Ответ: Симметрия кристаллической плотной упаковке подчиняется пр. гр. $Fm\bar{3}m$, $Z = 4$. При деформации данной плотной упаковки вдоль оси 4-го порядка остаются перпендикулярная и параллельные ей плоскости симметрии и центр симметрии, но теряются остальные четверные оси и все тройные оси, структура становится тетрагональной. Не сохраняется и тип ячейки Браве, ибо в тетрагональной сингонии F-ячейки нет. Выбирая за ребра a и b новой тетрагональной ячейки половины диагоналей граней исходной кубической F-ячейки, приводим ее к стандартной I-ячейке. Таким образом, получаем пр. гр. $I4/mmm$ ($Z = 2$). Как и в исходной ячейке, атомы в новой ячейке Браве располагаются в ее вершинах с кратностью позиции 2 и симметрией $4/mmm$.

4. Кристалл NaCl поместили в однородное электрическое поле, вектор напряженности которого совпадает с направлением [110]. Найти симметрию кристалла в поле.

Ответ: В соответствии с принципом Кюри симметрия кристалла в однородном поле описывается ТГС, которая определяется пересечением множеств элементов симметрии кристалла и поля, т. е. набором их общих элементов симметрии. В данном случае это пересечение ТГС NaCl – O_h и однородного электрического поля – C_{4v} . Направление [110] кристалла каменной соли совпадает с осью 2-го порядка, которая является линией пересечения двух взаимно перпендикулярных зеркальных плоскостей. Они определяют ТГС C_{2v} , которая является подгруппой ТГС C_{4v} . Следовательно, симметрия кристалла NaCl при данном направлении электрического поля понижается до $C_{2v} = mm2$.

5. К кубическому кристаллу симметрии $m\bar{3}m$ приложили одноосное напряжение растяжения, обладающее группой симметрии ∞/mmm . Какой симметрией будет обладать кристалл, если напряжение прикладывается вдоль: $[uv0]$?

Ответ: Прикладывающая растягивающее усилие по направлению $[uv0]$, т. е. произвольным образом в одной из плоскостей симметрии, например, по направлению обозначенному на рисунке: АВ, получим, что в этом случае кристалл будет обладать симметрией $2/m$. При таком способе приложения напряжения кристалл становится моноклинным.

Критерии и шкалы оценивания заданий ФОС:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный)

2) открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности).

- 2 балла – указан верный ответ,
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный)

3) открытые задания (мини-кейсы средний уровень сложности):

- 5 баллов – задание выполнено верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход выполнения (при необходимости));
- 2 балла – выполнение задания содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода его выполнения (если оно было необходимым), или задание выполнено не полностью,

но получены промежуточные (частичные) результаты, отражающие правильность хода выполнения задания, или в случае, если задание состоит из нескольких подзаданий, верно выполнено 50% таких подзаданий;

- 0 баллов – задание не выполнено или выполнено неверно (получен неправильный ответ, ход выполнения ошибочен или содержит грубые ошибки).

При проведении тестирования используется следующая шкала оценки освоения компетенций (% от набранных баллов, в соответствии со шкалой оценивания, приведенной выше):

Задания раздела 20.3 рекомендуются к использованию при проведении диагностических работ с целью оценки остаточных результатов освоения данной дисциплины (знаний, умений, навыков).

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Направление: 11.03.04 Электроника и наноэлектроника
шифр и наименование направления/специальности

Дисциплина: Б1.О.18 Кристаллография и кристаллофизика
код и наименование дисциплины

Профиль подготовки: Интегральная электроника и наноэлектроника
в соответствии с Учебным планом

Форма обучения: очная

Учебный год: 2021-2022

Ответственный исполнитель -

| | | | |
|--|---------|--|----------------|
| <u>Зав.кафедрой ФТТиНС</u> должность, подразделение | _____ | <u>(П.В. Середин)</u> расшифровка подписи | ____.____.____ |
| | подпись | | |

Исполнители:

| | | | |
|---|---------|---|----------------|
| <u>Доцент каф. ФТТиНС</u> должность, подразделение | _____ | <u>(Алейникова К.Б.)</u> расшифровка подписи | ____.____.____ |
| | подпись | | |

| | | | |
|---|---------|---|----------------|
| <u>Ст.Преподаватель</u> <u>каф. ФТТиНС</u> должность, подразделение | _____ | <u>(В.Е. Терновая)</u> расшифровка подписи | ____.____.____ |
| | подпись | | |

СОГЛАСОВАНО:

| | | | |
|--|---------|---|----------------|
| Куратор ООП ВО направления 11.03.04 | _____ | <u>(Г.В. Быкадорова)</u> расшифровка подписи | ____.____.____ |
| | подпись | | |

| | | | |
|---------------------------------|---------|---|----------------|
| Зав.отделом обслуживания ЗНБ | _____ | <u>(Н.В. Белодедова)</u> расшифровка подписи | ____.____.____ |
| | подпись | | |

Рекомендована кафедрой физики твердого тела и наноструктур, физического факультета, протокол № 1 от 31.08.20
(наименование факультета, структурного подразделения)