

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Амурский государственный университет»**

Кафедра физического материаловедения и лазерных технологий

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ**

Основы кристаллографии и физики кристаллов

Основной образовательной программы по специальности 010701.65 – Физика  
(Специализация Физическое материаловедение,  
Информационные технологии в образовании и научной деятельности)

Благовещенск 2012

УМКД разработан докт. физ.-мат. наук, проф. Астаповой Е. С.

Рассмотрен и рекомендован на заседании кафедры

Протокол заседания кафедры от «30» сентября 2012 г. № 8

Зав. кафедрой Астаповой Е. С. Астапова

УТВЕРЖДЕН

Протокол заседания УМСС 010701.65 – Физика от «01» октября 2012 г. № 3

Председатель УМСС Ванина Е. А. Ванина

## Содержание

I. Рабочая программа дисциплины	3
II. Краткое изложение программного материала	22
2.1. Краткое изложение программного материала лекционных занятий	22
2.2. Краткое изложение программного материала практических занятий	34
III. Методические указания	52
3.1. Методические указания для преподавателя	52
3.2. Методические указания для студентов	53
3.3. Методические указания к практическим занятиям	53
3.4. Методические указания к самостоятельной работе студентов	57
IV. Контроль знаний	57
4.1. Текущий контроль знаний	57
4.2. Итоговый контроль знаний	63
V. Интерактивные технологии и инновационные методы, используемые в образовательном процессе	64

## I. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### *Основы кристаллографии и физики кристаллов*

Специальность *010701.65 – Физика*

Специализация *Физическое материаловедение, Информационные технологии в образовании и научной деятельности*

Квалификация выпускника *специалист*

Курс *3*

Семестр *6*

Лекции *36* (час.) Зачет - *6 семестр*

Практические занятия *36* (час.)

Самостоятельная работа *25* (час.)

Общая трудоемкость дисциплины *97* (час.)

Составитель *Е. С. Астапова профессор, докт. физ.-мат. наук*

Факультет *инженерно - физический*

Кафедра *физического материаловедения и лазерных технологий*

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта по специальности 010701.65 – «Физика» и авторских разработок.

Занятия по дисциплине «Основы кристаллографии и физики кристаллов» ведутся в соответствии с рабочей программой, составленной на основании государственного образовательного стандарта и авторских разработок. На освоение дисциплины «Основы рентгеноструктурного анализа» отводится 97 часов, из них: 36 часов лекций, 36 часов практических занятий, 25 часов - самостоятельная работа студентов.

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью освоения дисциплины** «Основы кристаллографии и физики кристаллов» является изучение теоретических основ кристаллографии и кристаллофизики с использованием практических занятий, раскрытие связи между структурой и свойствами кристаллических тел и получение в итоге фундаментального образования, направленного на получение современного естественнонаучного мировоззрения.

### **Задачи дисциплины:**

1. освоение основных идей, исходных положений и определений строения конденсированных сред,
2. изучение кристаллических структур и приобретение навыков описания структур,
3. изучение симметрии кристаллов, точечных и пространственных групп, принципов плотной и валентной упаковок,
4. изучение упругих свойств кристаллов, тензоров напряжений и деформаций, устойчивости кристаллических решеток, магнитных,

Программа составлена на основании государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и авторских разработок.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:**

Дисциплина «Основы кристаллографии и физики кристаллов» в структуре ООП ВПО находится в блоке дисциплин специализации.

Для освоения дисциплины необходимо знать:

- 1) общую и теоретическую физику;
- 2) тензорный и векторный анализ;
- 3) физику конденсированного состояния;
- 4) математический анализ;
- 5) линейную алгебру.

## **3. ЗНАНИЯ И УМЕНИЯ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате освоения дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов» студент должен демонстрировать следующие результаты образования:

### **1) Знать:**

основные понятия, закономерности кристаллографии и кристаллофизики, основы геометрической кристаллографии, микрокристаллографии, теории симметрии, кристаллооптики, кристаллохимии, кристаллофизики, генетической кристаллографии, росту и морфологии кристаллов, гониометрии, физический смысл различных коэффициентов, характеризующих свойства кристаллов.

### **2) Уметь:**

оценивать величину коэффициентов, характеризующих свойства кристаллов, и анизотропию,

выбирать оптимальные значения коэффициентов в зависимости от конкретных условий практического применения кристаллов,

уметь решать кристаллографические задачи, строить сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции кристаллов,

грамотно описывать внешнюю форму и внутреннее строение кристаллов, используя знания по точечной и пространственной симметрии, необходимые для правильной интерпретации результатов самостоятельной научной деятельности и понимания специальной литературы,

применять полученные знания при решении кристаллографических задач.

### 3) Владеть:

методами проектирования кристаллов;

методами описания симметрии и простых форм кристаллов;

знаниями по физическим характеристикам и свойствам анизотропных тел.

## 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов» составляет 97 часов.

№ п/п	Модуль дисциплины	Виды учебной работы				Формы текущего контроля
		Лекции (час.)	Практические занятия (час.)	Лабораторные раб. (час.)	СРС (час.)	
1	<p>Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии, история развития».</p> <p>1.1. Фундаментальные законы кристаллографии и краткая историческая справка развития.</p> <p>1.2. Операции и элементы симметрии конечных фигур.</p> <p>1.3. Категории, сингонии, ячейки Браве.</p> <p>1.4. Законы Вейса, Гаюи, индексы Миллера, Вейса.</p>	8	8	0	6	<p>Посещение лекций.</p> <p>Посещение практических занятий.</p> <p>Расчетно-графическая работа.</p> <p>Контролирующий тест по модулю.</p>
2	<p>Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования».</p> <p>2.1. Методы проектирования кристаллов.</p> <p>2.2. Символика точечных групп симметрии Бравэ, Шенфлиса, Германа-Могена. Вывод 32 точечных групп симметрии в обозначениях по Шенфлису. Группы с единичными направлениями.</p> <p>2.3. Вывод точечных групп симметрии без единичных направлений. Два способа вывода групп без</p>	10	10	0	6	<p>Посещение лекций.</p> <p>Посещение практических занятий.</p> <p>Расчетно-графическая работа.</p> <p>Коллоквиум.</p>

	<p>единичных направлений.</p> <p>2.4. Морфология кристаллов. Вывод простых форм кристаллов в группах разных сингоний.</p> <p>2.5. 230 пространственных групп.</p>					
3	<p>Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность».</p> <p>3.1. Предмет кристаллофизики. Главная задача. Предельные группы симметрии – группы Кюри. Основные принципы симметрии в кристаллофизике. Скалярные, векторные свойства.</p> <p>3.2. Векторные свойства. Указательные поверхности.</p> <p>3.3. Диэлектрические свойства.. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости. Общие замечания о физических свойствах, описываемых тензором 2-го ранга.</p> <p>3.4. Магнитные свойства. Группы антисимметрии Шубникова.</p> <p>3.5. Теплопроводность. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Изменение теплопроводности при фазовом переходе I рода.</p>	10	10		6	<p>Посещение лекций.</p> <p>Посещение практических занятий.</p> <p>Расчетно-графическая работа.</p> <p>Контролирующий тест по модулю.</p>
4	<p>Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».</p> <p>4.1. Оптические свойства кристаллов. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий.</p> <p>4.2. Напряжения и деформации в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. 3 нормальных и 6 сдвиговых компонент тензора механических напряжений. Полевые и материальные тензоры. Деформации. Тензор деформаций</p> <p>4.3. Пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Связь вектора электрической поляризации с тензором</p>	8	8		7	<p>Посещение лекций.</p> <p>Посещение практических занятий.</p> <p>Расчетно-графическая работа.</p> <p>Контролирующий тест по модулю.</p> <p>Контрольная работа.</p>

	<p>механических напряжений. Тензор пьезоэлектрических модулей - тензор третьего ранга. Матричные обозначения компонент.</p> <p>4.4. Упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Физический смысл коэффициент <math>c</math> и <math>s</math>. Тензоры четвертого ранга. Симметричность тензоров. Физический смысл компонент тензора упругих постоянных. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных.</p>					
--	---	--	--	--	--	--

## 5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1 ЛЕКЦИИ

#### *Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии, история развития».*

1.1. Предмет кристаллографии и физики кристаллов. Исторические сведения. К. Рентген, М. Лауэ, У.Г. Брегг, У.Л. Предмет кристаллографии. Основные понятия. Макроскопические признаки кристаллических веществ: однородность, анизотропия, огранка, симметрия. Исторические сведения. Работы И. Кеплера, В. Дависсона. Основание кристаллографии как науки. Работы Н. Стенона, М. Ломоносова, Роме де Лиля. Закон постоянства углов. Геометрическая кристаллография. Опыты Э. Бартолина. Открытие эффекта двупреломления. Кристаллооптика. Кристаллофизика. Х. Гюйгенс. Рене Ж. Гаюи. Закон рациональности отношений параметров. И. Гессель. Х. С. Вейс. Закон поясов. Зональная кристаллография. О. Браве. 14 типов ячеек, 32 группы симметрии. Теория симметрии. А. Гадолин. Вывод 32 кристаллографических групп. Геометрическая макрокристаллография. Е. Федоров, А. Шенфлис. 230 пространственных групп симметрии. Геометрическая микрокристаллография. В. Рентген. Открытие рентгеновских лучей. М. Лауэ. Явление дифракции рентгеновских лучей. У. Брегг, Г. Вульф. Метод рентгеноструктурного анализа. Нобелевские премии 1901, 1914, 1915 гг. Н. В. Белов. Теория плотнейшей упаковки. Кристаллохимия. Периоды зарождения и развития кристаллографии: предыстория (до конца XVII в.), становление кристаллографии как науки (конец XVII в.– начало XIX в.), развитие классической кристаллографии (начало XIX в. – начало XX в.), современный период (с начала XX в.). Труды академика Н.В.Белова.

1.2. Симметрия. Операции и элементы симметрии конечных фигур. Элементы симметрии I и II рода, конгруэнтно равные и энантиоморфные фигуры. Поворотные оси симметрии, элементарный угол поворота, порядок оси. Основной закон симметрии – отсутствие осей 5-го и выше 6-го порядков. Обозначение элементов симметрии в символике Бравэ. Неэквивалентные и эквивалентные одноименные элементы симметрии в символике Бравэ. Зеркальная плоскость симметрии. Центр инверсии (центр симметрии). Зеркальные и инверсионные оси симметрии. Правила взаимодействия операций симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп. Осевая теорема Эйлера. Математическая справка из теории групп. Понятие группы. Групповые аксиомы. Взаимодействие элементов симметрии – групповое умножение. Точечная группа симметрии – совокупность операций симметрии (на примере группы  $L_33L_2$ ).

1.3. Понятие категории, сингонии в кристаллографии. Обозначения групп в различных номенклатурах: примитивные, центральные, планальные, аксиальные,

планаксиальные, инверсионно-примитивные, инверсионно-планальные группы. Элементарная ячейка (ячейка Бравэ). 14 типов ячеек Бравэ.

1.4. Символы граней и ребер кристаллов. Основные законы геометрической кристаллографии. Индексы Вейса и Миллера. Индицирование. Закон Гаюи – закон рациональности отношений параметров. Четвертая ось в гексагональной кристаллографической системе координат. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний. Символы ребер кристалла. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте. Связь между символами граней и ребер. Закон Вейса - закон зон. Метод развития зон.

### ***Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования».***

2.1. Методы проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции. Закон постоянства углов (закон Н.Стенона) – основа гониометрии.

2.2. Символика точечных групп симметрии Бравэ, Шенфлиса, Германа-Могена. Вывод 32 точечных групп симметрии в обозначениях по Шенфлису. Группы с единичными направлениями. Группы без единичных направлений. Группы с единственной поворотной осью  $C_n$ ,  $C_{nv}$ ,  $C_{nh}$ . Группа с плоскостью безразличной ориентации  $C_s$ . Группы с побочными осями  $D_n$ ,  $D_{nh}$ ,  $D_{nd}$ , обоснование невозможности существования групп  $D_{nv}$ . Группы со сложными (зеркальными, инверсионными) осями симметрии  $S_n$ .

2.3. Вывод точечных групп симметрии без единичных направлений. Группы  $T$ ,  $O$ ,  $T_d$ ,  $T_h$ ,  $O_h$ . Два способа вывода групп без единичных направлений.

2.4. Морфология кристаллов. Понятие «простая форма кристаллов». Вывод простых форм кристаллов в группах разных сингоний. Классификация точечных групп симметрии по виду простых форм. Простые формы в группах с единичными направлениями. N-гонально-пирамидальные, ди-n-гонально-пирамидальные, n-гонально-бипирамидальные, трапецоэдрические, скаленоэдрические группы. Простые формы в группах без единичных направлений. Два способа вывода.

2.5. 230 пространственных групп. Трансляционные элементы симметрии. Специфические для бесконечной кристаллической структуры элементы симметрии: плоскость скользящего отражения  $g$  и винтовые оси  $n_s$ . Плоскости скользящего отражения  $g$ :  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Клиноплоскости  $n$  и  $d$ . Винтовые оси  $n_s$ . Взаимодействие элементов микросимметрии. Симморфные и несимморфные группы. Гемисимморфные и асимморфные группы. Переход от пространственной группы к точечной.

### ***Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность».***

3.1. Предмет кристаллофизики. Главная задача. Предельные группы симметрии – группы Кюри. Основной принцип симметрии в кристаллофизике. Принцип Кюри. Принцип Неймана. Матричные представления преобразований симметрии. Скалярные физические свойства. Симметрия скалярных свойств. Плотность, объемный коэффициент теплового расширения, коэффициент всестороннего сжатия, теплоемкость, температура фазовых переходов, температура Кюри.

3.2. Векторные свойства. Пирозлектрический эффект. Десять полярных групп симметрии, в которых возможен пирозлектрический эффект. Указательная поверхность пирозлектрического коэффициента, ее симметрия. Плоскость антисимметрии  $m$ . Вывод уравнения указательной поверхности. Расположение указательной поверхности относительно осей симметрии кристалла. Расположение вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ , 1. Количество независимых параметров, определяющих векторное свойство в кристаллах триклинной, моноклинной и др. сингоний.

3.3. Диэлектрические свойства. Случай линейной связи между  $D$  и  $E$  в анизотропном диэлектрике. Тензор второго ранга  $\epsilon_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора диэлектрической проницаемости. Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга. Симметрия характеристической поверхности. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости (3 случая). Количество независимых измерений, необходимых для полного определения диэлектрической проницаемости кристалла различных сингоний. Общие замечания о физических свойствах, описываемых тензором 2-го ранга.

3.4. Магнитные свойства. Связь между напряженностью  $H$ , намагниченностью  $J$  и магнитной индукцией  $B$  в изотропном материале и кристалле. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Диамагнитные и парамагнитные вещества. Анизотропия магнитных свойств. Способность монокристаллов  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $Ni$ ,  $Co$  к намагничиванию, анизотропия. Ферромагнитные кристаллы. Антиферромагнетизм. Ферриты. Симметрия ферромагнитных кристаллов, группы антисимметрии Шубникова.

3.5. Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности – симметричный тензор второго ранга. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Зависимость теплопроводности от температуры. Изменение теплопроводности при фазовом переходе I рода.

#### **Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».**

4.1. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле. Уравнения Максвелла. Уравнение Пойнтинга. Плоскость поляризации, направление поляризации, плоскость колебаний. Волновая поверхность. Фазовая (лучевая) скорость волны, групповая (нормальная) скорость волны. Показатель преломления среды. Закон Снеллиуса-Декарта. Тензоры диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и диэлектрической непроницаемости  $\eta$ . Двойное преломление в кристаллах низшей и средней категории. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий. Оптическая индикатрисса. – характеристическая поверхность тензора диэлектрической непроницаемости. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний. Применение оптических свойств кристаллов. Исследование оптических свойств кристаллов в поляризованном свете. Оптические явления в кристаллах, наблюдаемые в параллельном поляризованном свете. Оптические явления в кристаллах, наблюдаемые в сходящемся поляризованном свете.

4.2. Напряжения и деформации в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. 3 нормальных и 6 сдвиговых компонент тензора механических напряжений  $T_{ij}$ . Отличие тензора механических напряжений  $T_{ij}$  от тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей. Полевые и материальные тензоры. Деформации. Тензор деформаций  $e_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора деформаций. Антисимметричная и симметричная части тензора  $e_{ij}$ . Описание вращения тела как целого. Собственно тензор деформаций. Связь тензора деформаций с симметрией кристалла. Тепловое расширение. Тензор коэффициентов теплового расширения  $\alpha_{ij}$ . Симметрия теплового расширения кристалла.

4.3. Пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Связь вектора электрической поляризации  $P$  с тензором механических напряжений  $T_{ij}$ . Тензор пьезоэлектрических модулей  $d_{ijk}$  - тензор третьего ранга. Матричные обозначения компонент.

4.4. Упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Физический смысл коэффициент  $c$  и  $s$ . Тензоры четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ . Симметричность тензоров. Матричное представление. Физический смысл компонент тензора упругих постоянных. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных. Форма матриц тензора упругих постоянных. Соотношения Коши.

## 5.2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### *Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии».*

1.1. Задачи на правила взаимодействия элементов симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп. Элементы симметрии I и II рода, конгруэнтно равные и энантиоморфные фигуры. Поворотные оси симметрии, элементарный угол поворота, порядок оси.

1.2. Задачи на проектирование, изучение методов проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции. Сетка Вульфа. Координаты  $\phi$ ,  $\rho$ .

1.3. Задания на индцирование кристалла. Символы граней и ребер кристаллов. Индексы Вейса и Миллера. Четвертая ось в гексагональной кристаллографической системе координат. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний. Символы ребер кристалла. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте. Связь между символами граней и ребер. Графический метод определения граней и ребер кристалла - метод развития зон.

1.4. Зависимость между старой (XYZ) и новой (X'Y'Z') координатными системами, между старыми (hkl), [rst] и новыми (HKL), [RST] символами граней и ребер. Преобразование координатных осей. Преобразование индексов граней кристалла. узловых сеток. Преобразование индексов ребер кристалла. Вычисление матриц преобразования осей при различных заданиях координатных систем.

### *Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования».*

2.1. Задачи на использование графических методов индцирования граней кристаллов и определение их геометрических констант. Метод развития зон. Определение геометрических констант кристалла. Определение позиции грани методом развития зон. Определение символов граней кристалла методом развития зон. Метод косинусов Вульфа. Определение выходов координатных осей триклинного кристалла и символов его граней методом косинусов Вульфа. Определение геометрических констант кристалла.

2.2. Определение позиций основных граней кристалла по его элементам. Построение проекций координатных граней. Определение положения единичной грани. Преобразование координатного репера от четырехосной установки гексагонального кристалла к установке Миллера.

2.3. Вывод точечных групп симметрии с единичными и без единичных направлений с использованием символики Шенфлиса. Вывод симморфных пространственных групп ***Pmmm***, ***Cmmm***, ***Immm***, ***Fmmm*** из точечной группы ***mmm***. Вывод несимморфных пространственных групп способом последовательной замены порождающих макроэлементов симметрии на микроэлементы.

2.4. Пространственные группы с примитивной, базоцентрированной, объемноцентрированной решетками Бравэ. Приемы вывода пространственных групп, подчиненных точечным группам ***mmm*** (***D2h***), ***222*** (***D***). Построение графиков пространственных групп.

2.5. Вывод простых форм в группах с единичным направлением: а) с одним особым направлением в группах ***C<sub>n</sub>***, ***C<sub>nh</sub>***, ***S<sub>2n</sub>***, б) с особым направлением 2 или  $\bar{2}$ , перпендикулярным главному единичному направлению в группах ***C<sub>nv</sub>***, ***D<sub>n</sub>***, ***D<sub>nv</sub>***, ***D<sub>nd</sub>***. Вывод

простых форм в группах без единичных направлений. Простые формы  $\{hkl\}$  – производные гексаэдра.. Простые формы  $\{hhl\}$  ( $h>1$ )– производные октаэдра (тетраэдра). Простые формы  $\{hll\}$  ( $h>1$ )– производные октаэдра (тетраэдра) и гексаэдра. Общие простые формы кубической сингонии для групп  $m\bar{3}m$ ,  $\bar{4}3m$ ,  $m\bar{3}$ , 432, 23.

**Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность».**

3.1. Решение кристаллофизических задач. Задачи на использование предельных групп – групп Кюри. Матричные представления преобразований симметрии.

3.2. . Задачи на векторные свойства. Пироэлектрический эффект. Указательная поверхность пироэлектрического коэффициента, ее симметрия. Плоскость антисимметрии. Вывод уравнения указательной поверхности. Расположение указательной поверхности относительно осей симметрии кристалла. Расположение вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ , 1. Количество независимых параметров, определяющих векторное свойство в кристаллах триклинной, моноклинной и др. сингоний.

3.3. Задачи на диэлектрические свойства. Тензор второго ранга  $\epsilon_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора диэлектрической проницаемости. Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга. Симметрия характеристической поверхности. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости (3 случая).

3.4. Задачи на магнитные свойства. Связь между напряженностью  $H$ , намагниченностью  $J$  и магнитной индукцией  $B$  в изотропном материале и кристалле. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Анизотропия магнитных свойств. Симметрия ферромагнитных кристаллов.

3.5. Задачи на теплопроводность. Коэффициент теплопроводности – симметричный тензор второго ранга. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Зависимость теплопроводности от температуры.

**Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».**

4.1. Решение кристаллофизических задач. Задачи на оптические свойства кристаллов. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле. Тензоры диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и диэлектрической непроницаемости  $\eta$ . Двойное преломление в кристаллах низшей и средней категории. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий. Оптическая индикатрисса. – характеристическая поверхность тензора диэлектрической непроницаемости. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний.

4.2. Задачи на напряжения и деформации в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. 3 нормальных и 6 сдвиговых компонент тензора

механических напряжений  $T_{ij}$ . Деформации. Тензор деформаций  $e_{ij}$ . Антисимметричная и симметричная части тензора  $e_{ij}$ . Связь тензора деформаций с симметрией кристалла.

Тепловое расширение. Тензор коэффициентов теплового расширения  $\alpha_{ij}$ . Симметрия теплового расширения кристалла.

4.3. Задачи на пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Связь вектора электрической поляризации  $P$  с тензором механических напряжений  $T_{ij}$ . Тензор пьезоэлектрических модулей  $d_{ijk}$  - тензор третьего ранга.

4.4. Задачи на упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Тензоры четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ . Симметричность тензоров. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных. Форма матриц тензора упругих постоянных.

## 6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

	Раздел (тема)	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
1	Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии, история развития».	Изучение материалов лекций. Подготовка к практическим занятиям. Выполнение расчетно-графической работы. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	6
2	Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования»	Изучение лекционных материалов. Подготовка к практическим занятиям. Выполнение расчетно-графической работы. Подготовка к контролируемому тесту по модулю. Подготовка к коллоквиуму.	6
3	Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность».	Изучение материалов лекций. Подготовка к практическим занятиям. Выполнение расчетно-графической работы. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	6
4	Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов.	Изучение материалов лекций. Подготовка к практическим занятиям. Выполнение расчетно-графической работы. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	7

Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».	Подготовка к контрольной работе. Подготовка к зачету.	
--	--	--

## 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При изучении дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов» применяются следующие интерактивные технологии: метод заданий, метод дебатов, метод презентации информации.

Лекции проводятся с использованием мультимедийного оборудования. Каждая лекция сопровождается показом лекционных демонстраций (видеосюжетов).

Для усвоения дисциплины используются интерактивные базы данных, справочных физико-химических характеристик материалов.

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

### 8.1 Контролирующий тест

Контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тесте 4 задания. Тест выполняется в письменном виде на практическом занятии. Тест выявляет теоретические знания, практические умения и аналитические способности студентов.

### 8.2 Расчетно-графические работы

В одном семестре предполагается выполнение четырех расчетно-графических работ по соответствующим модулям. РГР зачитывается при условии правильного выполнения всех задач.

### 8.3 Коллоквиум

Коллоквиум проводится в устной форме по окончании лекционного материала по двум первым модулям. Вопросами коллоквиума являются часть зачетных вопросов.

### 8.4 Контрольная работа

Контрольная работа выполняется в конце семестра по всем пройденным модулям семестра. В контрольной работе содержится четыре задачи. Контрольная работа направлена на проверку умений студентов применять полученные теоретические знания в отношении определенной конкретной задачи.

### 8.5 Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение

**Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии, история развития».**

1.1. Изучение понятий, фундаментальных законов кристаллографии и физики кристаллов. Самостоятельное изучение истории развития кристаллографии и физики кристаллов по периодам: период зарождения и развития кристаллографии - предыстория (до конца XVII в.), становление кристаллографии как науки (конец XVII в.– начало XIX в.), развитие классической кристаллографии (начало XIX в. – начало XX в.), современный период (с начала XX в.).

1.2. Изучение операций и элементов симметрии конечных фигур, правил взаимодействия операций симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп. Изучение основ теории групп: понятие группы, групповые аксиомы. Точечная группа симметрии – совокупность операций симметрии.

1.3. Изучение категорий, сингоний, различных номенклатур, примитивных, центральных, планальных, аксиальных, планаксиальных, инверсионно-примитивных, инверсионно-планальных групп. Изучение элементарных ячеек.

1.4. Изучение основных законов геометрической кристаллографии. Индексы Вейса и Миллера. Индицирование. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний. Символы ребер кристалла. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте. Связь между символами граней и ребер.

### ***Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования».***

2.1. Освоение методов проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции. Закон постоянства углов.

2.2. Вывод 32 точечных групп симметрии в обозначениях по Шенфлису. Группы с единичными направлениями.

2.3. Вывод точечных групп симметрии без единичных направлений. Два способа вывода групп без единичных направлений.

2.4. Вывод простых форм кристаллов в группах разных сингоний. Классификация точечных групп симметрии по виду простых форм. Простые формы в группах с единичными направлениями. N-гонально-пирамидальные, ди-n-гонально-пирамидальные, n-гонально-бипирамидальные, трапецоэдрические, скаленоэдрические группы. Простые формы в группах без единичных направлений. Два способа вывода.

2.5. Изучение 230 пространственных групп. Трансляционные элементы симметрии. Специфические для бесконечной кристаллической структуры элементы симметрии: плоскость скользящего отражения  $g$  и винтовые оси  $n_s$ . Плоскости скользящего отражения. Клиноплоскости. Винтовые оси. Взаимодействие элементов микросимметрии. Переход от пространственной группы к точечной.

### ***Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность».***

3.1. Изучение понятий физики кристаллов. Предельные группы симметрии – группы Кюри. Основной принцип симметрии в кристаллофизике. Принцип Кюри. Принцип Неймана. Симметрия скалярных свойств.

3.2. Изучение векторных свойств. Пироэлектрический эффект. Десять полярных групп симметрии, в которых возможен пироэлектрический эффект. Указательная поверхность пироэлектрического коэффициента, ее симметрия. Расположение вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ , 1. Количество независимых параметров, определяющих векторное свойство в кристаллах триклинной, моноклинной и др. сингоний.

3.3. Изучение диэлектрических свойств. Тензор второго ранга  $\epsilon_{ij}$ . Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга. Симметрия характеристической поверхности. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости.

3.4. Изучение магнитных свойств. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Симметрия ферромагнитных кристаллов, группы антисимметрии Шубникова.

3.5. Изучение теплопроводности. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Зависимость теплопроводности от температуры. Изменение теплопроводности при фазовом переходе I рода.

### ***Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».***

4.1. Изучение оптических свойств кристалла. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле. Волновая поверхность. Тензоры диэлектрической

проницаемости и диэлектрической непроницаемости. Двойное преломление в кристаллах низшей и средней категории. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний.

4.2. Изучение напряжений и деформаций в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. Отличие тензора механических напряжений от тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей. Деформации. Тензор деформаций  $e_{ij}$ . Антисимметричная и симметричная части тензора  $e_{ij}$ .

4.3. Изучение пьезоэлектрического эффекта. Связь вектора электрической поляризации с тензором механических напряжений. Тензор пьезоэлектрических модулей  $d_{ijk}$  - тензор третьего ранга. Матричные обозначения компонент.

4.4. Изучение упругих свойств. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Тензоры четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ . Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных.

## 8.6. Зачет

### 8.6.1. Критерии зачетной оценки

При определении оценки знаний студентов во время зачета преподаватели руководствуются следующими критериями:

К сдаче зачета допускаются студенты, посетившие лекционные занятия данного курса и выполнившие все расчетно-графические задания, успешно написавшие тест и контрольную работу, сдавшие коллоквиум. При наличии пропусков темы пропущенных занятий должны быть отработаны. Программные вопросы к зачету доводятся до сведения студентов в начале семестра.

При определении итоговой оценки знаний студента учитывается активность и текущая успеваемость студента в течение семестра по данному предмету.

Оценка «зачет» - ставится при 70 - 100 % правильных ответах на зачете и наличии выполненных заданий.

Безупречным считается ответ, в котором правильно, ясно и подробно изложен теоретический материал по теоретическим вопросам и правильно (без единой погрешности) решены задачи с необходимыми пояснениями. Студент получает зачет при следующих соотношениях выполнения заданий билета:

при безупречном выполнении заданий билета;  
при правильных ответах на теоретические вопросы и решении задач с небольшими недочетами (погрешностями);

при спорности выставления зачета беседа ведется по конспекту лекций.

В остальных случаях задание считается невыполненным и зачет не выставляется.

### 8.6.2. Вопросы к зачету.

1. Предмет кристаллографии. Основные понятия. Макроскопические признаки кристаллических веществ.

2. Исторические сведения. Периоды зарождения и развития кристаллографии: предыстория (до конца XVII в.), становление кристаллографии как науки (конец XVII в. – начало XIX в.), развитие классической кристаллографии (начало XIX в. – начало XX в.), современный период (с начала XX в.).

3. Операции и элементы симметрии конечных фигур. Элементы симметрии I и II рода, конгруэнтно равные и энантиоморфные фигуры.

4. Основной закон симметрии.

5. Правила взаимодействия операций симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп. Осевая теорема Эйлера.

6. Математическая справка из теории групп. Понятие группы. Групповые аксиомы. Взаимодействие элементов симметрии – групповое умножение. Точечная группа симметрии – совокупность операций симметрии (на примере группы  $L_33L_2$ ).
7. Методы проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции.
8. Закон постоянства углов (закон Н.Стенона) – основа гониометрии.
9. Символика точечных групп симметрии Бравэ, Шенфлиса, Германа-Могена.
10. Вывод 32 точечных групп симметрии в обозначениях по Шенфлису.
11. Группы с единичными направлениями.
12. Группы без единичных направлений.
13. Группы с единственной поворотной осью  $C_n, C_{nv}, C_{nh}$ .
14. Группа с плоскостью безразличной ориентации  $C_s$ .
15. Группы с побочными осями  $D_n, D_{nh}, D_{nd}$ , обоснование невозможности существования групп  $D_{nv}$ .
16. Группы со сложными (зеркальными, инверсионными) осями симметрии  $S_n$ .
17. Вывод точечных групп симметрии без единичных направлений. Группы  $T, O, T_d, T_h, O_h$ . Два способа вывода групп без единичных направлений.
18. Понятие категории, сингонии в кристаллографии.
19. Обозначения групп в различных номенклатурах: примитивные, центральные, планальные, аксиальные, планаксиальные, инверсионно-примитивные, инверсионно-планальные группы.
20. Элементарная ячейка (ячейка Бравэ). 14 типов ячеек Бравэ.
21. Символы граней и ребер кристаллов. Основные законы геометрической кристаллографии.
22. Индексы Вейса и Миллера. Индицирование. Четвертая ось в гексагональной кристаллографической системе координат.
23. Закон Гаюи – закон рациональности отношений параметров.
24. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний.
25. Символы ребер кристалла. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте. Связь между символами граней и ребер.
26. Закон Вейса - закон зон. Метод развития зон.
27. Морфология кристаллов. Понятие «простая форма кристаллов».
28. Вывод простых форм кристаллов в группах разных сингоний.
29. Классификация точечных групп симметрии по виду простых форм. Простые формы в группах с единичными направлениями. N-гонально-пирамидальные, ди-n-гонально-пирамидальные, n-гонально-бипирамидальные, трапецоэдрические, скаленоэдрические группы.
30. Простые формы в группах без единичных направлений. Два способа вывода.
31. 230 пространственных групп.
32. Трансляционные элементы симметрии.
33. Специфические для бесконечной кристаллической структуры элементы симметрии: плоскость скользящего отражения  $g$  и винтовые оси  $n_s$ .
34. Плоскости скользящего отражения  $g: a, b, c$ .
35. Клиноплощности  $n$  и  $d$ .
36. Винтовые оси  $n_s$ .
37. Взаимодействие элементов микросимметрии.
38. Симморфные и несимморфные группы.
39. Гемисимморфные и асимморфные группы.
40. Переход от пространственной группы к точечной.
41. Предмет кристаллофизики. Главная задача. Предельные группы симметрии – группы Кюри. Основной принцип симметрии в кристаллофизике.

42. Принцип Кюри. Принцип Неймана.
43. Матричные представления преобразований симметрии.
44. Скалярные физические свойства. Симметрия скалярных свойств. Плотность, объемный коэффициент теплового расширения, коэффициент всестороннего сжатия, теплоемкость, температура фазовых переходов, температура Кюри.
45. Векторные физические свойства.
46. Пироэлектрический эффект. Десять полярных групп симметрии, в которых возможен пироэлектрический эффект.
47. Указательная поверхность пироэлектрического коэффициента, ее симметрия. Плоскость антисимметрии  $m$ . Вывод уравнения указательной поверхности.
48. Расположение указательной поверхности пироэлектрического эффекта относительно осей симметрии кристалла.
49. Расположение вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ , 1. Количество независимых параметров, определяющих векторное свойство в кристаллах триклинной, моноклинной и др. сингоний.
50. Диэлектрические свойства. Случай линейной связи между  $D$  и  $E$  в анизотропном диэлектрике. Тензор второго ранга  $\epsilon_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора диэлектрической проницаемости.
51. Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга. Симметрия характеристической поверхности тензора диэлектрической проницаемости.
52. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости (3 случая). Количество независимых измерений, необходимых для полного определения диэлектрической проницаемости кристалла различных сингоний.
53. Общие замечания о физических свойствах, описываемых тензором 2-го ранга.
54. Магнитные свойства. Связь между напряженностью  $H$ , намагниченностью  $J$  и магнитной индукцией  $B$  в изотропном материале и кристалле. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости.
55. Диамагнитные и парамагнитные вещества.
56. Анизотропия магнитных свойств.
57. Способность монокристаллов  $\alpha-Fe$ ,  $Ni$ ,  $Co$  к намагничиванию, анизотропия.
58. Ферромагнитные кристаллы. Антиферромагнетизм. Ферриты. Симметрия ферромагнитных кристаллов, группы антисимметрии Шубникова.
59. Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности – симметричный тензор второго ранга.
60. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Зависимость теплопроводности от температуры. Изменение теплопроводности при фазовом переходе I рода.
61. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле. Уравнения Максвелла. Уравнение Пойнтинга. Плоскость поляризации, направление поляризации, плоскость колебаний. Волновая поверхность. Фазовая (лучевая) скорость волны, групповая (нормальная) скорость волны. Показатель преломления среды. Закон Снеллиуса-Декарта. Тензоры диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и диэлектрической непроницаемости  $\eta$ .
62. Двойное преломление в кристаллах низшей и средней категории. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий.
63. Оптическая индикатриса. – характеристическая поверхность тензора диэлектрической непроницаемости. Оптическая индикатриса в кристаллах различных сингоний. Применение оптических свойств кристаллов.
64. Исследование оптических свойств кристаллов в поляризованном свете. Оптические явления в кристаллах, наблюдаемые в параллельном поляризованном свете. Оптические явления в кристаллах, наблюдаемые в сходящемся поляризованном свете.

65. Напряжения и деформации в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. 3 нормальных и 6 сдвиговых компонент тензора механических напряжений  $T_{ij}$ .

66. Отличие тензора механических напряжений  $T_{ij}$  от тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей.

67. Полевые и материальные тензоры.

68. Деформации. Тензор деформаций  $e_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора деформаций. Антисимметричная и симметричная части тензора  $e_{ij}$ . Описание вращения тела как целого. Собственно тензор деформаций.

69. Связь тензора деформаций с симметрией кристалла.

70. Тепловое расширение. Тензор коэффициентов теплового расширения  $\alpha_{ij}$ . Симметрия теплового расширения кристалла.

71. Пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Связь вектора электрической поляризации  $P$  с тензором механических напряжений  $T_{ij}$ . Тензор пьезоэлектрических модулей  $d_{ijk}$  - тензор третьего ранга. Матричные обозначения компонент.

72. Упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел.

73. Упругие свойства. Физический смысл коэффициент  $c$  и  $s$ . Тензоры четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ . Симметричность тензоров. Матричное представление.

74. Физический смысл компонент тензора упругих постоянных.

75. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных. Форма матриц тензора упругих постоянных.

76. Соотношения Коши.

77. Индицирование кристалла.

78. Символы граней и ребер кристаллов, связь между ними.

79. Индексы Вейса и Миллера.

80. Четвертая ось в гексагональной кристаллографической системе координат.

81. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний.

82. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте.

83. Графический метод определения граней и ребер кристалла - метод развития зон.

84. Зависимость между старой (XYZ) и новой (X'Y'Z') координатными системами, между старыми (hkl), [rst] и новыми (HKL), [RST] символами граней и ребер. Преобразование координатных осей. Преобразование индексов граней кристалла. узловых сеток. Преобразование индексов ребер кристалла. Вычисление матриц преобразования осей при различных заданиях координатных систем.

85. Графические методы индицирования граней кристаллов и определение их геометрических констант. Метод развития зон. Определение геометрических констант кристалла. Определение позиции грани методом развития зон. Определение символов граней кристалла методом развития зон.

86. Метод косинусов Вульфа. Определение выходов координатных осей триклинного кристалла и символов его граней методом косинусов Вульфа.

87. Определение геометрических констант кристалла.

88. Определение позиций основных граней кристалла по его элементам. Построение проекций координатных граней. Определение положения единичной грани.

89. Преобразование координатного репера от четырехосной установки гексагонального кристалла к установке Миллера.

90. Вывод симморфных пространственных групп  $Pmmm$ ,  $Cmmm$ ,  $Immm$ ,  $Fmmm$  из точечной группы  $mmm$ .

91. Вывод несимморфных пространственных групп способом последовательной замены порождающих макроэлементов симметрии на микроэлементы.

92. Вывод групп  $Pnma$ ,  $Pbam$ ,  $Pbca$ , ... из группы  $Pmmm$ ; групп  $Cmma$ ,  $Cmca$ ,  $Ccca$  из группы  $Cmmm$ .

93. Вывод пространственных групп, подчиненных точечной группе  $mm2$  ( $C_{2v}$ ).

94. Пространственные группы с примитивной, базоцентрированной, объемноцентрированной решетками Бравэ.

95. Приемы вывода пространственных групп, подчиненных точечным группам  $mmm$  ( $D_{2h}$ ),  $222$  ( $D$ ). Построение графиков пространственных групп.

96. Вывод простых форм в группах с единичным направлением: а) с одним особым направлением в группах  $C_n$ ,  $C_{nh}$ ,  $S_{2n}$ .

97. Вывод простых форм в группах с единичным направлением: б) с особым направлением 2 или  $\bar{2}$ , перпендикулярным главному единичному направлению в группах  $C_{nv}$ ,  $D_n$ ,  $D_{nv}$ ,  $D_{nd}$ .

98. Вывод простых форм в группах без единичных направлений. Простые формы  $\{hkl\}$  – производные гексаэдра..

99. Вывод простых форм в группах без единичных направлений. Простые формы  $\{hhl\}$  ( $h \neq l$ ) – производные октаэдра (тетраэдра).

100. Вывод простых форм в группах без единичных направлений. Простые формы  $\{hll\}$  ( $h \neq l$ ) – производные октаэдра (тетраэдра) и гексаэдра.

101. Общие простые формы кубической сингонии для групп  $m\bar{3}m$ ,  $\bar{4}3m$ ,  $m\bar{3}$ , 432, 23.

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Основы кристаллографии и физики кристаллов»

### а) основная литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.

### б) дополнительная литература:

1. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

2. Пермяков, А.А. Установка кристаллов. Кристаллографические символы. Лаб. практикум/ Сост.: А.А. Пермяков: СибГИУ. - Новокузнецк, 2007. - 16с.

3. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст] : учеб. пособие для вузов. Рек. Гос. Ком. РФ / Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. - 3-е изд., доп. и перераб. - М. : МИСИС, 1994. - 328с.

4. Чупрунов, Е..В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.

5. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

6. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

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

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://193.49.43.4/dif/icsd/">http://193.49.43.4/dif/icsd/</a>	База структурных данных для

		неорганических соединений.. ICSD (Inorganic Crystal Structure) Database
2	<a href="http://www.iqlib.ru">http://www.iqlib.ru</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания.
3	<a href="http://window.edu.ru/">http://window.edu.ru/</a>	Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование
4	<a href="http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html">http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html</a>	Физика твердого тела. Василевский А. С. М. Дрофа. 2010. 206 с.
5	<a href="http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html">http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html</a>	Современная физика. Конденсированное состояние. Воронов В. К., Подоплелов А. В. М. Изд. ЛКИ. 2008. 336 с.
6	<a href="http://geo.web.ru/db/section_page">http://geo.web.ru/db/section_page</a>	Теория симметрии кристаллов. Егоров-Тисменко Ю. К., Литвинская Г.П.

**г) периодические издания:**

1. Доклады Академии наук
2. Известия вузов. Физика.
3. Вестник Амурского государственного университета

**10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

п/п	Наименование лабораторий, ауд.	Основное оборудование
1	Корпус № 1, ауд. 113 (лаборатория рентгеноструктурного анализа)	Банк рентгенометрических данных.
2.	Корпус № 1, ауд. 112 (лекционная)	<b>Комплект ТСО</b> Видеопроектор Epson Мультимедийный проектор-03г Ноутбук Пентиум 100-03г.
3	Учебный корпус № 8, музей минералогии и петрографии	Коллекции кристаллов природных неорганических соединений.

## II. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ПРОГРАММНОГО МАТЕРИАЛА

### 2.1. Краткое изложение программного материала лекционных занятий

Лекционный материал излагается в виде четырёх модулей:

Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии, история развития»;

Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования»;

Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность»;

Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».

#### **Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии, история развития»**

##### **Тема 1.1.**

#### **Предмет кристаллографии и физики кристаллов. Основные понятия. Исторические сведения.**

План лекции:

1. Предмет кристаллографии. Основные понятия.
2. Макроскопические признаки кристаллических веществ: однородность, анизотропия, огранка, симметрия.
3. Основные законы.
3. Исторические сведения. Этапы развития: Периоды зарождения и развития кристаллографии: предыстория (до конца XVII в.), становление кристаллографии как науки (конец XVII в.– начало XIX в.), развитие классической кристаллографии (начало XIX в. – начало XX в.), современный период (с начала XX в.).

Цель: получение знаний о предмете кристаллографии и физики кристаллов, основных понятиях и законах и исторических этапах развития.

Задачи:

1. Формирование представления о кристаллографии и кристаллофизике как о науке.
2. Усвоение основных понятий дисциплины.
3. Краткое знакомство с основными законами.
4. Усвоение исторических сведений о возникновении, становлении и развитии кристаллографии и физики кристаллов.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Работы И. Кеплера, В. Дависсона. Основание кристаллографии и физики кристаллов как науки. Работы Н. Стенона, М. Ломоносова, Роме де Лиля. Закон постоянства углов. Геометрическая кристаллография. Опыты Э. Бартолина. Открытие эффекта двупреломления. Кристаллооптика. Кристаллофизика. Х. Гюйгенс. Рене Ж. Гаюи. Закон рациональности отношений параметров. И. Гессель. Х. С. Вейс. Закон поясов. Зональная кристаллография. О. Браве. 14 типов ячеек, 32 группы симметрии. Теория симметрии. А. Гадолин. Вывод 32 кристаллографических групп. Геометрическая макрокристаллография. Е. Федоров, А. Шенфлис. 230 пространственных групп симметрии. Геометрическая микрокристаллография. В. Рентген. Открытие рентгеновских лучей. М. Лауэ. Явление дифракции рентгеновских лучей. У. Брегг, Г. Вульф. Метод рентгеноструктурного анализа. Нобелевские премии 1901, 1914, 1915 гг. Н. В. Белов. Теория плотнейшей упаковки. Кристаллохимия. Труды академика Н.В.Белова.

### Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
3. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

### **Тема 1.2.**

#### **Симметрия. Операции и элементы симметрии конечных фигур. Элементы симметрии I и II рода.**

#### План лекции:

1. Понятие симметрии.
2. Операции и элементы симметрии конечных фигур.
3. Элементы симметрии I и II рода.

Цель: получение знаний об операциях и элементах макросимметрии, их классификации.

#### Задачи:

1. Формирование навыков определения элементов симметрии по расположению объектов.
2. Усвоение понятий «симметрия», «поворотная ось», «плоскость симметрии», «сложная ось симметрии», «центр симметрии».
3. Изучение основного закона симметрии.
4. Усвоение символики кристаллографии и физики кристаллов.
5. Изучение правил взаимодействия элементов симметрии.

#### В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Конгруэнтно равные и энантиоморфные фигуры. Поворотные оси симметрии, элементарный угол поворота, порядок оси. Основной закон симметрии – отсутствие осей 5-го и выше 6-го порядков. Обозначение элементов симметрии в символике Бравэ. Неэквивалентные и эквивалентные одноименные элементы симметрии в символике Бравэ. Зеркальная плоскость симметрии. Центр инверсии (центр симметрии). Зеркальные и инверсионные оси симметрии. Правила взаимодействия операций симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп. Осевая теорема Эйлера. Математическая справка из теории групп. Понятие группы. Групповые аксиомы. Взаимодействие элементов симметрии – групповое умножение. Точечная группа симметрии – совокупность операций симметрии (на примере группы  $L_33L_2$ ).

#### Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
3. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
4. Чупрунов, Е..В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
5. Физика твердого тела. Василевский А. С. М. Дрофа. 2010. 206 с.  
[http://www.ph4s.ru/book\\_ph\\_tvteho.html](http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html)

### **Тема 1.3.**

#### **Категории и сингонии. Типы ячеек Бравэ.**

#### План лекции:

1. Понятие категории, сингонии в кристаллографии.

2. Обозначения групп в различных номенклатурах.
3. Понятие элементарной ячейки. 14 типов ячеек Бравэ.

Цель: получение знаний об основных категориях и понятиях кристаллографии и физики кристаллов: сингония, точечная группа, элементарная ячейка и др.

Задачи:

1. Формирование представления категориях: низшей, средней, высшей.
2. Усвоение основных понятий: точечная группа, элементарная ячейка, сингония, характеристическая ячейка.
3. Изучение трех номенклатур кристаллографии.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Понятие категории, сингонии в кристаллографии. Обозначения групп в различных номенклатурах: примитивные, центральные, планальные, аксиальные, планаксиальные, инверсионно-примитивные, инверсионно-планальные группы. Элементарная ячейка (ячейка Бравэ). 14 типов ячеек Бравэ.

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Современная физика. Конденсированное состояние. Воронов В. К., Подоплелов А. В. М. Изд. ЛКИ. 2008. 336 с. [http://www.ph4s.ru/book\\_ph\\_tvteho.html](http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html)

#### **Тема 1.4.**

#### **Символы граней и ребер кристаллов. Индицирование. Закон Гаюи. Закон Вейса.**

План лекции:

1. Основные законы геометрической кристаллографии. Символы граней и ребер кристаллов.
2. Индексы Вейса и Миллера. Индицирование.
3. Закон Гаюи. Закон Вейса.

Цель: получение знаний об основных законах геометрической кристаллографии, усвоение математического аппарата индицирования.

Задачи:

1. Формирование представлений о символах граней и ребер кристаллов.
2. Овладение приемами индицирования.
3. Изучение основных законов геометрической кристаллографии: закона Гаюи, закона Вейса.
4. Овладение навыками использования индексов Вейса и Миллера в процедуре индицирования.
5. Усвоение теоретического материала по правилам выбора единичной грани в кристаллах разных сингоний и получение практических навыков.
6. Усвоение метода развития зон.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Символы граней и ребер кристаллов. Основные законы геометрической кристаллографии. Индексы Вейса и Миллера. Индицирование. Закон Гаюи – закон рациональности отношений параметров. Четвертая ось в гексагональной кристаллографической системе координат. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний. Символы ребер кристалла. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте. Связь между символами граней и ребер. Закон Вейса - закон зон. Метод развития зон.

Литература:

1. Теория симметрии кристаллов. Егоров-Тисменко Ю. К., Литвинская Г.П. [http://geo.web.ru/db/section\\_page](http://geo.web.ru/db/section_page)
2. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
3. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
4. Пермяков, А.А. Установка кристаллов. Кристаллографические символы. Лаб. практикум/ Сост.: А.А. Пермяков: СибГИУ. - Новокузнецк, 2007. - 16с.

## **Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования»**

### **Тема 2.1.**

#### **Методы проектирования кристаллов. Закон постоянства углов.**

##### План лекции:

1. Методы проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции.
2. Закон постоянства углов (закон Н.Стенона) – основа гониометрии.

Цель: получение знаний о методах проектирования кристаллов и о законе постоянства углов.

##### Задачи:

1. Формирование представления о сферических, стереографических, гномонических, гномостереографических проекциях.
2. Изучение закона Н.Стенона – основного закона гониометрии.

##### В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Методы проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции. Проектирование на сферу, экваториальную плоскость, проектирование исходных и нормальных объектов. Закон постоянства углов (закон Н.Стенона) – основа гониометрии. Сетка Вульфа, сетка Болдырева.

##### Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е.В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
5. Пермяков, А.А. Установка кристаллов. Кристаллографические символы. Лаб. практикум/ Сост.: А.А. Пермяков: СибГИУ. - Новокузнецк, 2007. - 16с.
6. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст] : е изд., доп. и прераб. - М. : МИСИС, 1994. - 328с.
7. Василевский А. С. Физика твердого тела. М. Дрофа. 2010. 206 с. [http://www.ph4s.ru/book\\_ph\\_tvteho.html](http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html)
8. Воронов В. К., Подоплелов А. В. Современная физика. Конденсированное состояние. М. Изд. ЛКИ. 2008. 336 с. [http://www.ph4s.ru/book\\_ph\\_tvteho.html](http://www.ph4s.ru/book_ph_tvteho.html)

### **Тема 2.2.**

#### **Символика точечных групп симметрии Бравэ, Шенфлиса, Германа-Могена.**

#### **Вывод 32 точечных групп симметрии в обозначениях по Шенфлису.**

##### План лекции:

1. Символика точечных групп симметрии Бравэ, Шенфлиса, Германа-Могена. Основные понятия.

2. Вывод 32 точечных групп симметрии в обозначениях по Шенфлису:

а) группы с единичными направлениями (подробно),

б) группы без единичных направлений (общие положения).

Цель: получение знаний о точечных группах симметрии и номенклатурах, используемых в кристаллографии и физике кристаллов.

Задачи:

1. Формирование представления о двух способах вывода точечных групп.

2. Формирование умений вывода точечных групп в символикe Шенфлиса.

3. Усвоение математических алгоритмов вывода групп.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Вывод точечных групп (группы с единственной поворотной осью  $C_n$ ,  $C_{nv}$ ,  $C_{nh}$ ; группа с плоскостью безразличной ориентации  $C_s$ ; группы с побочными осями  $D_n$ ,  $D_{nh}$ ,  $D_{nd}$ ; обоснование невозможности существования групп  $D_{nv}$ ; группы со сложными (зеркальными, инверсионными) осями симметрии  $S_n$ ).

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.

2. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

3. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

4. Егоров-Тисменко Ю. К., Литвинская Г.П. Теория симметрии кристаллов. [http://geo.web.ru/db/section\\_page](http://geo.web.ru/db/section_page)

5. Пермяков, А.А. Установка кристаллов. Кристаллографические символы. Лаб. практикум/ Сост.: А.А. Пермяков: СибГИУ. - Новокузнецк, 2007. - 16с.

6. Чупрунов, Е..В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.

### **Тема 2.3.**

#### **Вывод точечных групп симметрии без единичных направлений.**

План лекции:

1. Группы  $T$ ,  $O$ ,  $T_d$ ,  $T_h$ ,  $O_h$ .

2. Два способа вывода групп без единичных направлений.

Цель: получение знаний о группах кубической сингонии и алгоритмах их вывода.

Задачи:

1. Формирование представления о группах кубической сингонии.

2. Овладение алгоритмами вывода пяти групп:  $T$ ,  $O$ ,  $T_d$ ,  $T_h$ ,  $O_h$ .

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Варианты вывода точечных групп симметрии кубической сингонии, преимущества и недостатки приемов вывода от простого к сложному и наоборот.

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.

2. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

3. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

4. Егоров-Тисменко Ю. К., Литвинская Г.П. Теория симметрии кристаллов. [http://geo.web.ru/db/section\\_page](http://geo.web.ru/db/section_page)
5. Доклады Академии наук
6. Известия вузов. Физика.
7. Вестник Амурского государственного университета

#### Тема 2.4.

#### Морфология кристаллов.

#### Вывод простых форм кристаллов в группах разных сингоний.

##### План лекции:

1. Морфология кристаллов. Понятие «простая форма кристаллов».
2. Вывод простых форм кристаллов в группах разных сингоний.
  - а) классификация точечных групп симметрии по виду простых форм;
  - б) простые формы в группах с единичными направлениями.
  - в) простые формы в группах без единичных направлений. Два способа вывода.

Цель: получение знаний о простых формах кристаллов различных сингоний, приобретение навыков вывода простых форм, возможных в каждой точечной группе.

##### Задачи:

1. Усвоение основных понятий морфологии кристалла.
2. Усвоение теоретического материала по простым формам.
3. Приобретение умений вывода простых форм в кристаллах любой сингонии.

##### В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Простые формы в N-гонально-пирамидальных, ди-n-гонально-пирамидальных, n-гонально-бипирамидальных, трапецеэдрических, скаленоэдрических групп.

##### Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
3. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

#### Тема 2.5.

#### 230 пространственных групп.

#### Трансляционные элементы симметрии.

##### План лекции:

1. Специфические для бесконечной кристаллической структуры элементы симметрии: плоскость скользящего отражения  $g$  и винтовые оси  $n_s$
2. Плоскости скользящего отражения и клиноплощности.
3. Винтовые оси.
4. Симморфные и несимморфные группы. Гемисимморфные и асимморфные группы

Цель: получение знаний фёдоровских группах симметрии, их классификации и взаимодействии элементов микросимметрии.

##### Задачи:

1. Формирование представления о пространственных группах симметрии.
2. Усвоение основных элементов симметрии пространственных групп.

##### В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Специфические для бесконечной кристаллической структуры элементы симметрии: плоскость скользящего отражения  $g$  и винтовые оси  $n_s$ . Плоскости скользящего отражения  $g$ :  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Клиноплощности  $n$  и  $d$ . Винтовые оси  $n_s$ . Взаимодействие элементов микросимметрии. Симморфные и несимморфные группы. Гемисимморфные и асимморфные группы. Переход от пространственной группы к точечной

##### Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
3. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
4. База структурных данных для неорганических соединений.. ICSD (Inorganic Crystal Structure) Database. <http://193.49.43.4/dif/icsd/>

**Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность»**

**Тема 3.1.**

**Предмет кристаллофизики. Главная задача. Предельные группы симметрии – группы Кюри.**

План лекции:

1. Предмет кристаллофизики. Основные понятия. Главная задача.
2. Группы Кюри. Принцип Кюри.
3. Принцип Неймана.
4. Скалярные физические величины.

Цель: получение знаний о предмете кристаллофизики, принципах кристаллофизики, предельных группах симметрии.

Задачи:

1. Формирование навыков использования предельных групп симметрии в процессе описания физических свойств и явлений.
2. Усвоение основных принципов физики кристаллов.
3. Овладение умениями матричных преобразований в теории симметрии.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Предмет кристаллофизики. Главная задача. Предельные группы симметрии – группы Кюри. Основной принцип симметрии в кристаллофизике. Принцип Кюри. Принцип Неймана. Матричные представления преобразований симметрии. Скалярные физические свойства. Симметрия скалярных свойств. Плотность, объемный коэффициент теплового расширения, коэффициент всестороннего сжатия, теплоемкость, температура фазовых переходов, температура Кюри.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.
4. Доклады Академии наук
5. Известия вузов. Физика.
6. Вестник Амурского государственного университета
7. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>

**Тема 3.2.**  
**Векторные свойства.**  
**Указательная поверхность.**

План лекции:

1. Векторные свойства.
2. Полярные группы симметрии.
3. Указательные поверхности.
4. Пироэлектрический эффект.

Цель: получение знаний о векторных свойствах и указательных поверхностях.

Задачи:

1. Формирование навыков построения указательных поверхностей.
2. Приобретение умений определения принадлежности кристаллов к полярным или неполярным группам.
3. Овладение знаниями об описании физических свойств кристаллов.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Векторные свойства. Пироэлектрический эффект. Десять полярных групп симметрии, в которых возможен пироэлектрический эффект. Указательная поверхность пироэлектрического коэффициента, ее симметрия. Плоскость антисимметрии  $m$ . Вывод уравнения указательной поверхности. Расположение указательной поверхности относительно осей симметрии кристалла. Расположение вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ , 1. Количество независимых параметров, определяющих векторное свойство в кристаллах триклинной, моноклинной и др. сингоний.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.
4. Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания. <http://www.iqlib.ru>

**Тема 3.3.**

**Диэлектрические свойства.**

**Общие замечания о физических свойствах, описываемых тензором 2-го ранга.**

План лекции:

1. Диэлектрические свойства. Тензор второго ранга  $\epsilon_{ij}$ .
2. Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга.
3. Общие замечания о физических свойствах, описываемых тензором 2-го ранга.

Цель: получение знаний о диэлектрических свойствах кристаллических веществ.

Задачи:

1. Формирование навыков построения указательных поверхностей.
2. Приобретение умений оперирования тензорами второго ранга.
3. Овладение знаниями об описании диэлектрических свойств кристаллов.
4. Приобретение умений определения влияния симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Диэлектрические свойства. Случай линейной связи между  $D$  и  $E$  в анизотропном диэлектрике. Тензор второго ранга  $\epsilon_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора диэлектрической проницаемости. Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга. Симметрия характеристической поверхности. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости (3 случая). Количество независимых измерений, необходимых для полного определения диэлектрической проницаемости кристалла различных сингоний. Общие замечания о физических свойствах, описываемых тензором 2-го ранга..

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

**Тема 3.4.**

**Магнитные свойства.**

**Группы антисимметрии Шубникова.**

План лекции:

1. Магнитные свойства. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости.
2. Ферромагнитные кристаллы. Антиферромагнетизм. Ферриты.
3. Симметрия ферромагнитных кристаллов, группы антисимметрии Шубникова.

Цель: получение знаний о магнитных свойствах кристаллических веществ.

Задачи:

1. Формирование навыков построения указательных поверхностей.
2. Приобретение умений оперирования тензорами второго ранга.
3. Овладение знаниями об описании магнитных свойств кристаллов.
4. Приобретение умений определения симметрии ферромагнитных кристаллов, умений применения групп антисимметрии Шубникова для описания свойств кристаллов.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Магнитные свойства. Связь между напряженностью  $H$ , намагниченностью  $J$  и магнитной индукцией  $B$  в изотропном материале и кристалле. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Диамагнитные и парамагнитные вещества. Анизотропия магнитных свойств. Способность монокристаллов  $\alpha$ -Fe, Ni, Co к намагничиванию, анизотропия. Ферромагнитные кристаллы. Антиферромагнетизм. Ферриты. Симметрия ферромагнитных кристаллов, группы антисимметрии Шубникова.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

**Тема 3.5.**

**Теплопроводность.**

План лекции:

1. Теплопроводность. Основные понятия.
2. Анизотропия коэффициентов теплопроводности.

3. Зависимость теплопроводности от температуры.

Цель: получение знаний о теплопроводности кристаллических веществ.

Задачи:

1. Приобретение умений оперирования симметричным тензором второго ранга – тензором коэффициентов теплопроводности.

2. Овладение знаниями об анизотропии коэффициентов теплопроводности.

3. Приобретение умений определения зависимости теплопроводности от температуры.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности – симметричный тензор второго ранга. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Зависимость теплопроводности от температуры. Изменение теплопроводности при фазовом переходе I рода.

Литература:

4. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

5. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

6. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

#### **Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».**

##### **Тема 4.1.**

##### **Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле.**

##### **Оптические явления в кристаллах.**

План лекции:

1. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле.

2. Уравнения Максвелла. Уравнение Пойнтинга.

3. Закон Снеллиуса-Декарта.

4. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний.

5. Оптические явления в кристаллах.

Цель: получение знаний об оптических явлениях в кристалле, законах кристаллооптики.

Задачи:

1. Приобретение знаний об основных законах кристаллооптики, об оптических явлениях.

2. Овладение знаниями о двойном лучепреломлении и поляризации света в кристалле.

3. Приобретение умений определения оптической индикатриссы. – характеристической поверхности тензора диэлектрической непроницаемости.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле. Уравнения Максвелла. Уравнение Пойнтинга. Плоскость поляризации, направление поляризации, плоскость колебаний. Волновая поверхность. Фазовая (лучевая) скорость волны, групповая (нормальная) скорость волны. Показатель преломления среды. Закон Снеллиуса-Декарта.

Тензоры диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и диэлектрической непроницаемости  $\eta$ . Двойное преломление в кристаллах низшей и средней категории. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий. Оптическая индикатрисса. – характеристическая поверхность тензора диэлектрической непроницаемости. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний. Применение оптических свойств кристаллов. Исследование

оптических свойств кристаллов в поляризованном свете. Оптические явления в кристаллах, наблюдаемые в параллельном поляризованном свете. Оптические явления в кристаллах, наблюдаемые в сходящемся поляризованном свете.

Литература:

7. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

8. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

9. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

#### **Тема 4.2.**

#### **Напряжения и деформации в кристаллах.**

План лекции:

1. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния.

2. Полевые и материальные тензоры.

3. Деформации. Тензор деформаций  $e_{ij}$ .

4. Тепловое расширение. Тензор коэффициентов теплового расширения  $\alpha_{ij}$ .

Цель: получение знаний о напряжениях и деформациях в кристалле.

Задачи:

1. Овладение знаниями об основных понятиях и характеристиках напряженного состояния кристаллических материалов.

2. Овладение знаниями о напряжениях и деформациях в кристаллах.

3. Приобретение умений определения отличий тензора механических напряжений  $T_{ij}$  от тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей.

4. Приобретение навыков определения связи тензора деформаций с симметрией кристалла.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Напряжения и деформации в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. 3 нормальных и 6 сдвиговых компонент тензора механических напряжений  $T_{ij}$ . Отличие тензора механических напряжений  $T_{ij}$  от тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей. Полевые и материальные тензоры. Деформации. Тензор деформаций  $e_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора деформаций.

Антисимметричная и симметричная части тензора  $e_{ij}$ . Описание вращения тела как целого. Собственно тензор деформаций. Связь тензора деформаций с симметрией кристалла.

Тепловое расширение. Тензор коэффициентов теплового расширения  $\alpha_{ij}$ . Симметрия теплового расширения кристалла.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

#### **Тема 4.3.**

#### **Пьезоэлектрический эффект.**

План лекции:

1. Прямой пьезоэлектрический эффект.
2. Обратный пьезоэлектрический эффект.
3. Вектор электрической поляризации и тензор механических напряжений.
4. Тензор пьезоэлектрических модулей  $d_{ijk}$  - тензор третьего ранга.

Цель: получение знаний о пьезоэлектрическом эффекте в кристалле.

Задачи:

1. Овладение знаниями о тензоре пьезоэлектрических модулей.
2. Приобретение умений оперирования с тензорами третьего ранга.
3. Приобретение навыков определения связи вектора электрической поляризации  $P$  с

тензором механических напряжений  $T_{ij}$ .

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Связь вектора электрической поляризации  $P$  с тензором механических напряжений  $T_{ij}$ . Тензор пьезоэлектрических модулей  $d_{ijk}$  - тензор третьего ранга. Матричные обозначения компонент.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

#### **Тема 4.4.**

#### **Упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел.**

План лекции:

1. Упругие свойства. Основные понятия.
2. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел.
3. Тензоры четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ .
4. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных.
5. Соотношения Коши.

Цель: получение знаний об упругих свойствах кристаллов.

Задачи:

1. Овладение знаниями о законе Гука и характеристиках упругих свойств кристаллов.
2. Приобретение умений оперирования с тензорами четвертого ранга.
3. Приобретение навыков определения влияния симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных.

В лекции должны быть освещены следующие вопросы:

Упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Физический смысл коэффициент  $c$  и  $s$ . Тензоры четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ . Симметричность тензоров. Матричное представление. Физический смысл компонент тензора упругих постоянных. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных. Форма матриц тензора упругих постоянных. Соотношения Коши.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

## **2.2. Краткое изложение программного материала практических занятий**

Программный материал практических занятий излагается в четырёх модулях:

Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии».

Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования».

Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность».

Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».

Объёмы аудиторных часов, отводимых для освоения материалов по каждой теме, приведены в разделе 4 рабочей программы дисциплины. Часы для самостоятельной работы студентов приведены в разделе 6 рабочей программы дисциплины.

### **Модуль 1. «Основные понятия и представления кристаллографии».**

#### **Тема 1.1.**

#### **Задачи на правила взаимодействия элементов симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп.**

##### План занятия:

1. Разбор типовой задачи на правила взаимодействия элементов симметрии.
2. Задания на элементы симметрии I и II рода с конгруэнтно равными и энантиоморфными фигурами.

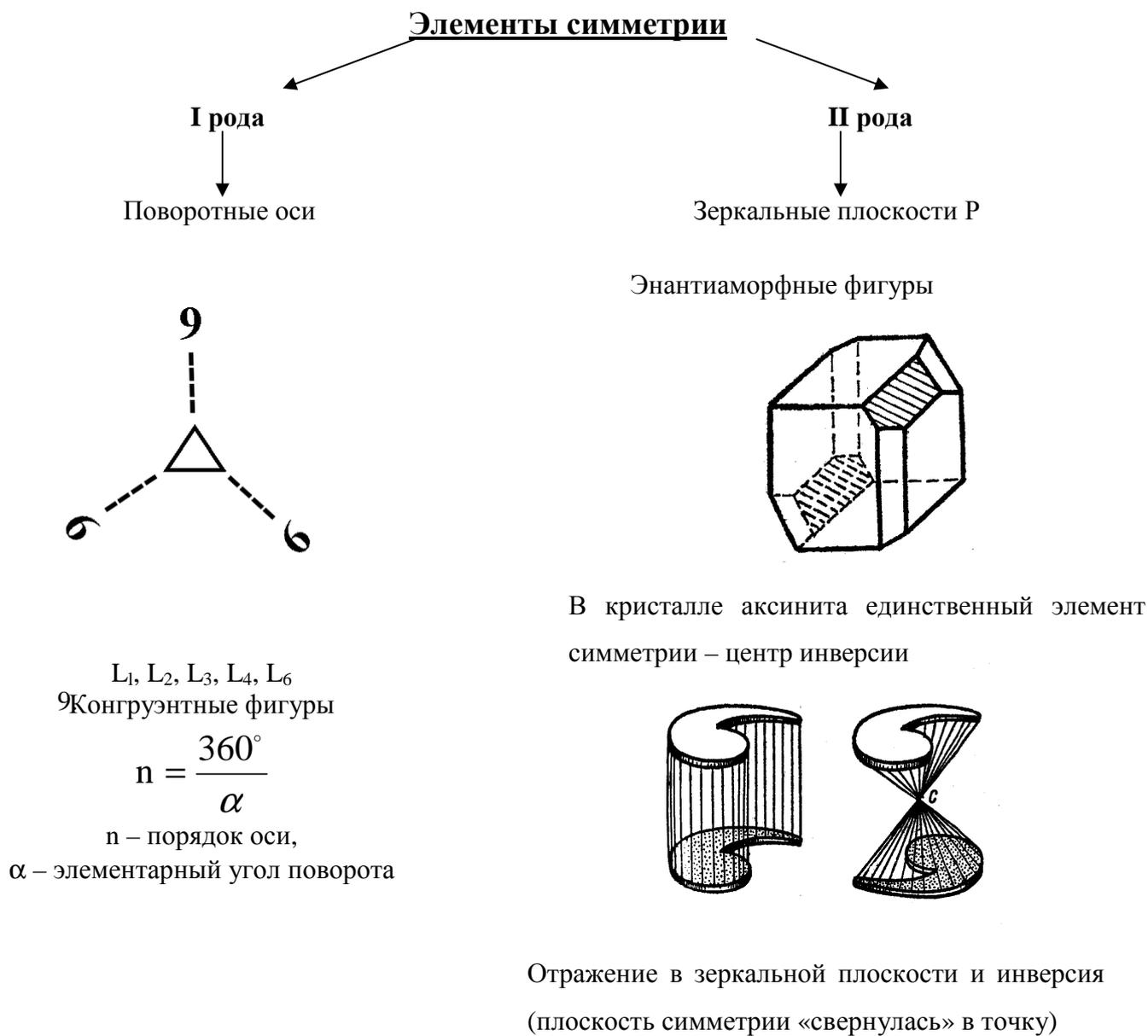
##### На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на правила взаимодействия элементов симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп. Элементы симметрии I и II рода, конгруэнтно равные и энантиоморфные фигуры. Поворотные оси симметрии, элементарный угол поворота, порядок оси.

##### Учебно-методические материалы приведены на следующей странице.

##### Вопросы для обсуждения:

1. Определите понятие «симметрия».
2. Что называется операцией симметрии?
3. Перечислите элементы симметрии и определите понятие каждого элемента.
4. Как классифицируются операции симметрии в зависимости от их характера?
5. Опишите элементы симметрии I и II рода.
6. Какие фигуры называются энантиоморфными, а какие – конгруэнтно равными?
7. Опишите поворотные оси симметрии.
8. Какие оси в кристаллографии являются запрещенными?



*Рис1.* Элементы симметрии I и II рода.

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е.В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

**Тема 1.2.**

**Задачи на проектирование,  
Изучение методов проектирования кристаллов.**

План занятия:

1. Построение сферических проекций элементов кристаллов и элементов симметрии.
2. Построение стереографических проекций элементов кристаллов и элементов симметрии.
3. Построение гномонических проекций элементов кристаллов и элементов симметрии.
4. Построение гномостереографических проекций элементов кристаллов и элементов симметрии.

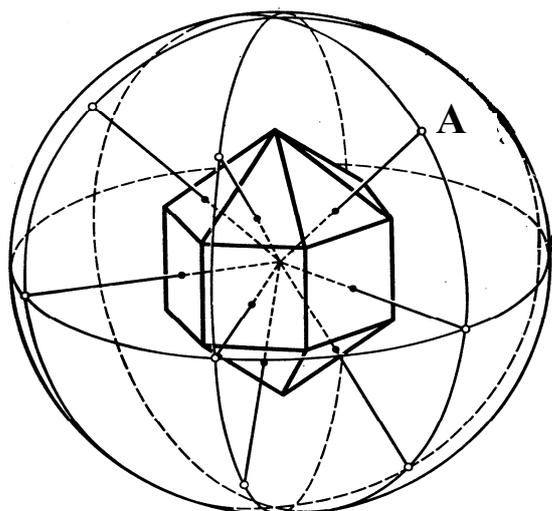
На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на проектирование, изучение методов проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции. Сетка Вульфа. Координаты  $\varphi$ ,  $\rho$ .

Учебно-методические материалы приведены на рисунках 2, 3.

Вопросы для обсуждения:

1. Какой закон используется при проектировании кристаллов? Сформулируйте этот закон. Кто является его автором?
2. Какие типы проекций кристалла Вы знаете?
3. Какая задача является главной в проектировании кристаллов?
4. Как получить сферическую проекцию направления?
5. Какая градуировка принята для сферы?
6. Что является началом отсчета в сферической проекции?
7. Где расположены северный и южный полюсы проекции?
8. Какие величины являются сферическими координатами точки?
9. В каких интервалах могут меняться значения сферических координат?
10. Что является сферической проекцией плоскости?
11. Назовите два этапа построения стереографической проекции.
12. В чем заключается стереографический метод проектирования?
13. Что является стереографической проекцией направления?
14. В каком случае для наблюдения выбирается северный полюс проекции, в каком – южный?
15. Что является стереографической проекцией плоскости?
16. Назовите, что является гномостереографическими проекциями грани и ребра?

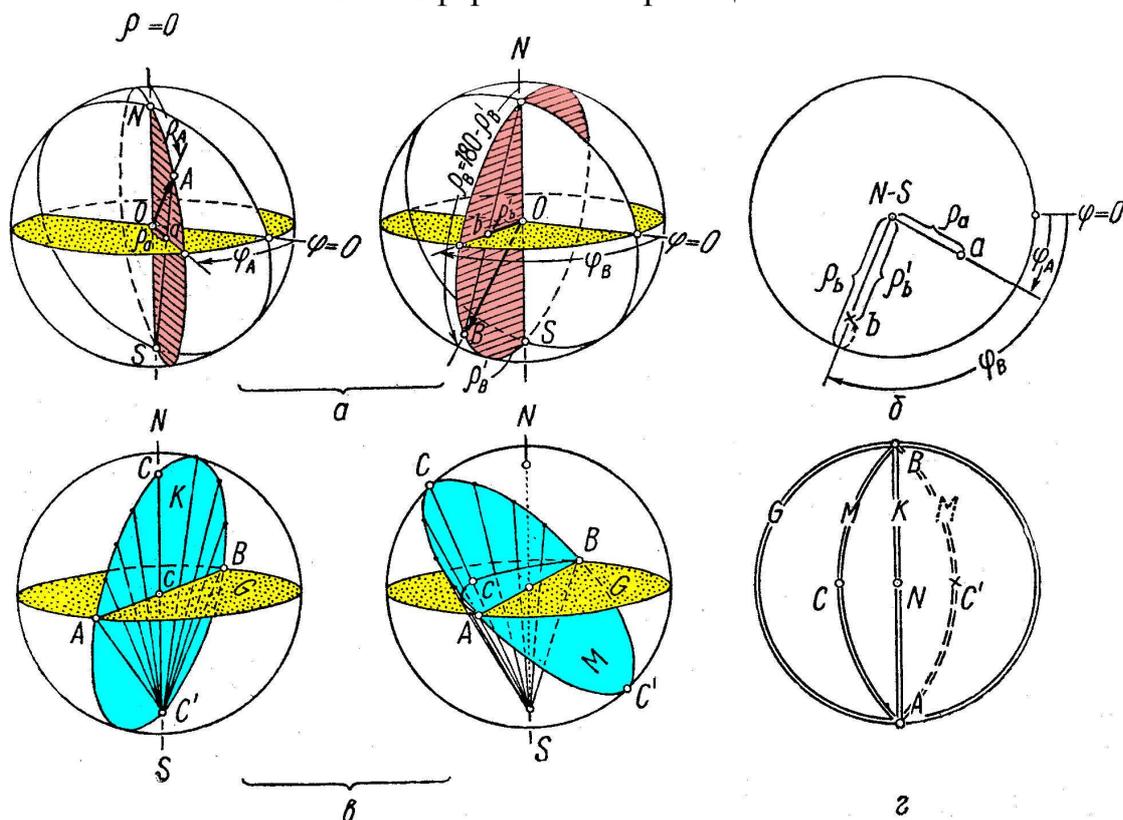


Угловые величины в неискаженном виде. Закон постоянства углов. А – сферический полюс направления. Координаты  $\rho, \varphi$ :

$$0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

$$0^\circ \leq \rho \leq 180^\circ$$

Рис.2. Сферическая проекция.



К методу стереографического проектирования:

- а – построение сферической и стереографической проекций направлений:  $\rho < 90^\circ$  (вектор А) и  $\rho > 90^\circ$  (вектор В);
- б – стереограмма направлений А и В;
- в – построение сферической и стереографической проекций плоскости, проходящей через центр сферы проекций;
- г – стереограмма таких плоскостей.

Рис.3. Стереографическая проекция.

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е.В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

**Тема 1.3.**

**Задания на индцирование кристалла. Символы граней и ребер кристаллов.**

План занятия:

1. Символы граней и ребер кристаллов.
2. Системы координат в кристаллографии и физике кристаллов. Четвертая ось в гексагональной кристаллографической системе координат.
3. Выбор единичной грани в кристаллах разных сингоний.
4. Графический метод определения граней и ребер кристалла - метод развития зон.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

1. Задания на индцирование кристалла. Символы граней и ребер кристаллов. Индексы Вейса и Миллера. Четвертая ось в гексагональной кристаллографической системе координат. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний. Символы ребер кристалла. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте. Связь между символами граней и ребер. Графический метод определения граней и ребер кристалла - метод развития зон.

Учебно-методические материалы приведены на рисунках 4,5.

Вопросы для обсуждения:

1. Сформулируйте закон рациональности отношений параметров.
2. В чем заключается процесс индцирования?
3. Каким образом определяются индексы Вейса?
4. Дайте характеристику символам Миллера.
5. По каким правилам выбирается единичная грань в кристаллах низшей категории?
6. Почему в кристаллах гексагональной сингонии вводится дополнительный индекс для обозначения символа грани?
7. Охарактеризуйте положение единичной грани кристалла тетрагональной сингонии.
8. Почему единичная грань в кристаллах кубической сингонии отсекает по координатным осям равные отрезки?
9. Чем обусловлено возникновение координатного направления  $OU$  в гексагональной и тригональной сингониях?

Литература:

2. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
3. Чупрунов, Е.В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.

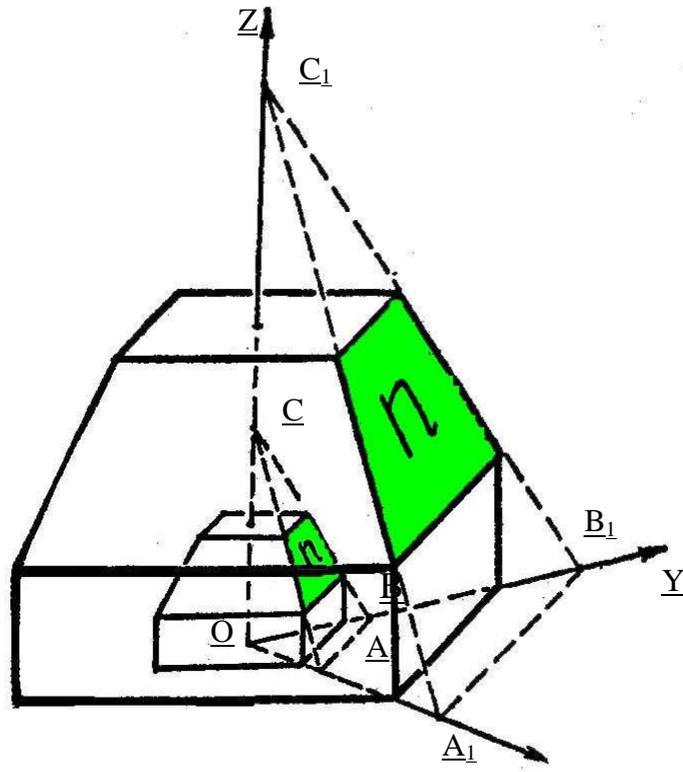


Рис.4 . Положение грани растущего кристалла.

Грань p «малого» и «большого» кристаллов пересекает координатные оси в одинаковом отношении  
 $OA:OB:OC = OA_1:OB_1:OC_1$ .

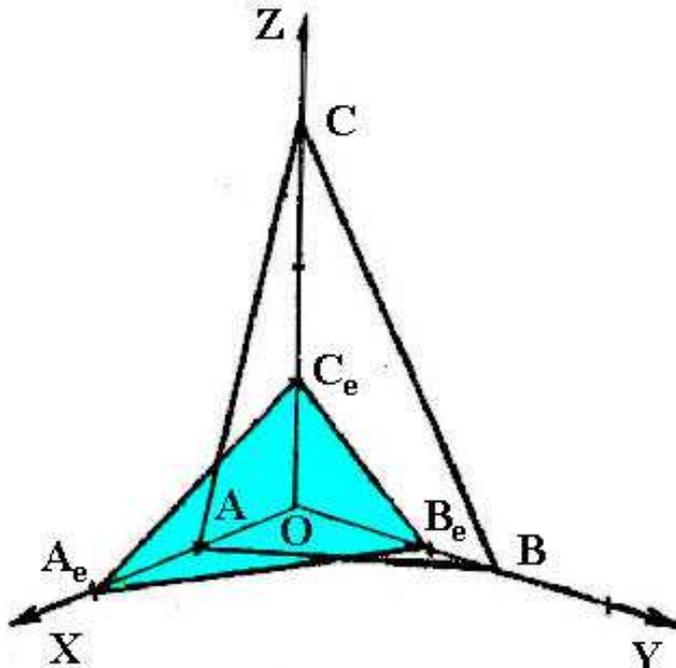


Рис. 5. Расположение произвольной грани относительно единичной грани.

$$OA:OB:OC = a : b : c \quad OA_e:OB_e:OC_e = a_e : b_e : c_e$$

$$p : q : r = \frac{1}{2} : \frac{3}{2} : 3 = 1 : 3 : 6 \quad h : k : l = \frac{1}{1} : \frac{1}{3} : \frac{1}{6} = 6 : 2 : 1$$

4. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>

5. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

6. Пермяков, А.А. Установка кристаллов. Кристаллографические символы. Лаб. практикум/ Сост.: А.А. Пермяков: СибГИУ. - Новокузнецк, 2007. - 16с.

#### **Тема 1.4.**

### **Преобразование координатных осей.**

### **Преобразование индексов граней кристалла. узловых сеток.**

### **Преобразование индексов ребер кристалла.**

#### План занятия:

1. Зависимость между старой и новой координатными системами. Преобразование координатных осей.

2. Преобразование индексов граней, узловых сеток, индексов ребер кристалла.

#### На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Зависимость между старой (XYZ) и новой (X'Y'Z') координатными системами, между старыми (hkl), [rst] и новыми (HKL), [RST] символами граней и ребер. Преобразование координатных осей. Преобразование индексов граней кристалла. узловых сеток. Преобразование индексов ребер кристалла. Вычисление матриц преобразования осей при различных заданиях координатных систем.

#### Учебно-методические материалы:

Студенту необходимо воспользоваться учебно-методическими материалами темы 3 практических занятий и учебным пособием, указанным в пункте 1 литературы к данному занятию.

#### Вопросы для обсуждения:

1. Приведите алгоритм нахождения матриц преобразования осей при различных заданиях координатных систем.

2. Как определить зависимость между старыми (hkl), [rst] и новыми (HKL), [RST] символами граней и ребер.

3. Какие законы кристаллографии и физики кристаллов используются при преобразование индексов граней, узловых сеток, индексов ребер кристалла ?

#### Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.

2. Чупрунов, Е..В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.

3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>

4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

## **Модуль 2. «Точечные и пространственные группы, методы проектирования».**

### **Тема 2.1.**

Графические методы индцирования граней кристаллов и определение их геометрических констант. Метод развития зон.

План занятия:

1. Разбор задач на использование графических методов индирования граней кристаллов и определение их геометрических констант.
2. Метод развития зон.
3. Определение геометрических констант кристалла.
4. Метод косинусов Вульфа.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на использование графических методов индирования граней кристаллов и определение их геометрических констант. Метод развития зон. Определение геометрических констант кристалла. Определение позиции грани методом развития зон. Определение символов граней кристалла методом развития зон. Метод косинусов Вульфа. Определение выходов координатных осей триклинного кристалла и символов его граней методом косинусов Вульфа. Определение геометрических констант кристалла.

Учебно-методические материалы:

Учебно-методические материалы, рекомендуемые для подготовки студента, указаны в пунктах 1-4 данной темы.

Вопросы для обсуждения:

1. Опишите метод развития зон.
2. Охарактеризуйте сетку Вульфа и сетку Болдырева.
3. Опишите методы определения геометрических констант кристалла.
4. Как определить символы граней кристалла, используя метод развития зон?
5. В чем заключается метод косинусов Вульфа?

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е.В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

**Тема 2.2.**

**Определение положения единичной грани.**

План занятия:

1. Построение проекций координатных граней.
2. Определение положения единичной грани.
3. Преобразование координатного репера от четырехосной установки гексагонального кристалла к установке Миллера.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Определение позиций основных граней кристалла по его элементам. Построение проекций координатных граней. Определение положения единичной грани. Преобразование координатного репера от четырехосной установки гексагонального кристалла к установке Миллера.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, указанные в пунктах 1-4 данной темы.

Вопросы для обсуждения:

1. Какие приемы применяются при построении проекций координатных граней?
2. Как определяется положение единичной грани в кристаллах различных сингоний?
3. Приведите алгоритм преобразования координатного репера от четырехосной установки гексагонального кристалла к установке Миллера.

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е.В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

**Тема 2.3.**

**Вывод точечных групп симметрии с использованием символики Шенфлиса.**

План занятия:

1. Вывод точечных групп симметрии с единичными направлениями.
2. Вывод точечных групп симметрии без единичных направлений.
3. Вывод симморфных пространственных групп.
4. Вывод несимморфных пространственных групп

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Вывод точечных групп симметрии с единичными и без единичных направлений с использованием символики Шенфлиса. Вывод симморфных пространственных групп ***Pmmm, Smmm, Immm, Fmmm*** из точечной группы ***mmm***. Вывод несимморфных пространственных групп способом последовательной замены порождающих макроэлементов симметрии на микроэлементы.

Учебно-методические материалы:

Таблица 1

Федоровские группы  $\Phi$   
(симморфные  $\Phi_c$ , гемисимморфные  $\Phi_s$ , асимморфные  $\Phi_a$ )

$\Phi_c$	$\Phi_s$	$\Phi_a$
$C_1^1 - P1$		
$C_i^1 - \bar{P}1$		
$C_2^1 - \bar{P}2$		$C_2^2 - P2_1(2)$
$C_2^3 - B2$		
$C_3^1 - Pm$	$C_s^2 - Pb(2)$	
$C_s^3 - Bm$	$C_s^4 - Bb(2)$	
$C_{2h}^1 - P2/m$	$C_{2h}^4 - P2/b(2)$	$C_{2h}^2 - P2_1/m, C_{2h}^5 - P2_1/b(4)$
$C_{2h}^3 - B2/m$	$C_{2h}^6 - B2/b(2)$	
$D_2^1 - P222$		$D_2^2 - P222_1(2) D_2^3 - P2_12_12(4)$
		$D_2^4 - P2_12_12_1(8)$
$D_2^6 - C222$		$D_2^5 - P222_1(2)$
$D_2^7 - F222$		

$D_2^8 - I222$		$D_2^9 - I2_12_12_1(8)$
$C_{2v}^1 - Pmm2$	$C_{2v}^3 - Pcc2(2)$ $C_{2v}^4 - Pma2(2)$	$C_{2v}^2 - Pmc2_1(2)$ $C_{2v}^5 - Pca2_1(4)$
	$C_{2v}^6 - Pnc2(4)$ $C_{2v}^8 - Pba2(4)$	$C_{2v} - Pmn2_1(4)$ $C_{2v}^9 - Pna2_1(8)$
	$C_{2v}^{10} - Pnn2(8)$	
$C_{2v}^{11} - Cmm2(2)$	$C_{2v}^{13} - Ccc2(2)$	$C_{2v}^{12} - Cmc2_1(2)$
$C_{2v}^{14} - Amm2$	$C_{2v}^{15} - Abm2(4)$ $C_{2v}^{16} - Ama2(2)$	
	$C_{2v}^{17} - Aba2(4)$	
$C_{2v}^{18} - Fmm2$	$C_{2v}^{19} - Fdd2(8)$	
$C_{2v}^{20} - Fmm2$	$C_{2v}^{21} - Iba2(8)$ $C_{2v}^{22} - Ima2(8)$	
$D_{2h}^1 - Pmmm$	$D_{2h}^2 - Pnnn(8)$ $D_{2h}^3 - Pccm(2)$	$D_{2h}^5 - Pmma(2)$ $D_{2h}^6 - Pnna(8)$
	$D_{2h}^4 - Pban(8)$	$D_{2h}^7 - Pmna(4)$ $D_{2h}^8 - Pcca(4)$
		$D_{2h}^9 - Pbam(4)$ $D_{2h}^{10} - Pccn(8)$
		$D_{2h}^{11} - Pbcm(4)$ $D_{2h}^{12} - Pnnm(8)$
		$D_{2h}^{13} - Pmmn(4)$ $D_{2h}^{14} - Pbcn(8)$
		$D_{2h}^{13} - Pmmn(4)$ $D_{2h}^{14} - Pbcn(8)$
		$D_{2h}^{15} - Pbca(8)$ $D_{2h}^{16} - Pmna(8)$
$D_{2h}^{19} - Cmmm$	$D_{2h}^{20} - Cccm(2)$ $D_{2h}^{21} - Cmma(4)$	$D_{2h}^{17} - Cmcm(2)$ $D_{2h}^{18} - Cmca(8)$
	$D_{2h}^{22} - Ccca(8)$	
$D_{2h}^{23} - Fmmm$	$D_{2h}^{24} - Fddd(8)$	
$C_{3i}^1 - P\bar{3}$		
$C_{3i}^2 - R\bar{3}$		
$D_3^1 - P312$		$D_3^3 - P3_112(3)$ $D_3^5 - P3_212(3)$
$D_3^2 - P321$		$D_3^4 - P3_121(3)$ $D_3^6 - P3_221(3)$
$D_3^7 - R32$		
$C_{3v}^1 - P3m1$	$C_{3v}^3 - P3c1(2)$	
$C_{3v}^2 - P31m$	$C_{3v}^4 - P31c(2)$	
$C_{3v}^5 - R3m$	$C_{3v}^6 - R3c(2)$	
$D_{3d}^1 - P\bar{3}1m$	$D_{3d}^2 - P\bar{3}1c(2)$	
$D_{3d}^3 - P\bar{3}m1$	$D_{3d}^4 - P\bar{3}c1(2)$	
$D_{3d}^5 - R\bar{3}m$	$D_{3d}^6 - R\bar{3}c(2)$	
$C_6^1 - P6$		$C_6^2 - P6_1(6)$ $C_6^3 - P6_5(6)$
		$C_6^5 - P6_2(3)$ $C_6^5 - P6_4(3)$
		$C_6^6 - P6_3(2)$
$C_{3h}^1 - P6$		
$C_{6h}^1 - P6/m$		$C_{6h}^2 - P6_3/m(2)$
$D_6^1 - P622$		$D_6^2 - P6_122(6)$ $D_6^3 - P6_522(6)$
		$D_6^4 - P6_222(3)$ $D_6^5 - P6_422(3)$

		$D_6^6 - P6_322(6)$
$C_{6v}^1 - P6mm$	$C_{6v}^2 - P6cc(2)$	$C_{6v}^3 - P6_3cm(2)$ $C_{6v}^4 - P6_3mc(2)$
$D_{3h}^1 - P\bar{6}m2$	$D_{3h}^2 - P\bar{6}c2(2)$	
$D_{3h}^2 - P\bar{6}2m$	$D_{3h}^4 - P\bar{6}2c(2)$	
$D_{6h}^1 - P6/mmm$	$D_{6h}^2 - P6/mcc(2)$	$D_{6h}^3 - P6_3/mcm(2)$ $D_{6h}^4 - P6_3/mmc(2)$
$T^1 - P23$		$T^4 - P2_13(8)$
$T^2 - F23$		
$T^3 - I23$		$T^5 - I2_13(8)$
$T_h^1 - Pm\bar{3}$	$T_h^2 - Pn\bar{3}(8)$	$T_h^6 - Pa\bar{3}(8)$
$T_h^3 - Fm\bar{3}$	$T_h^4 - Fd\bar{3}(16)$	
$T_h^5 - Im\bar{3}$		$T_h^7 - Ia\bar{3}(8)$
$O^1 - P432$		$O^2 - P4_232(8)$ $O^6 - P4_332(16)$
		$O^7 - P4_132(16)$

Примечание. Цифры в скобках для  $\Phi_c$  и  $\Phi_a$  указывают, во сколько раз следует увеличить объем элементарной ячейки  $\Phi_c$ , чтобы получить указанную подгруппу.

Вопросы для обсуждения:

1. Кто является автором вывода 230 пространственных групп симметрии?
2. Каким образом можно вывести каждую из 230 пространственных групп симметрии?

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е..В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

**Тема 2.4.**

**Приемы вывода пространственных групп, подчиненных точечным группам  $m\bar{3}m$  ( $D_{2h}$ ),  $222$  ( $D$ ).**

План занятия:

1. Пространственные группы с примитивной, базоцентрированной, объемноцентрированной решетками Бравэ.
2. Приемы вывода пространственных групп, подчиненных точечным группам  $m\bar{3}m$  ( $D_{2h}$ ),  $222$  ( $D$ ).
3. Построение графиков пространственных групп.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Пространственные группы с примитивной, базоцентрированной, объемноцентрированной решетками Бравэ. Приемы вывода пространственных групп,

подчиненных точечным группам  $mmm$  ( $D2h$ ),  $222$  ( $D$ ). Построение графиков пространственных групп.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в теме 2.3 практических занятий и литературе раздела 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Определите понятие «пространственная группа».
2. Охарактеризуйте пространственные группы с примитивной решеткой Бравэ.
3. Приведите примеры пространственных групп с базоцентрированной решеткой Бравэ.
4. Опишите пространственные группы с объемноцентрированной решеткой Бравэ.
5. Покажите приемы вывода пространственных групп, подчиненных точечной группе  $mmm$  ( $D2h$ ).
6. Приведите приемы вывода пространственных групп, подчиненных точечной группе  $222$  ( $D$ ).

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е.В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

## Тема 2.5.

### Вывод простых форм в группах с единичным направлением

План занятия:

1. Вывод простых форм в группах с одним особым направлением ( $C_n$ ,  $C_{nh}$ ,  $S_{2n}$ ),
2. Вывод простых форм в группах с особым направлением  $2$  или  $\bar{2}$ , перпендикулярным главному единичному направлению в группах  $C_{nv}$ ,  $D_n$ ,  $D_{nv}$ ,  $D_{nd}$ .
3. Вывод простых форм в группах без единичных направлений.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Вывод простых форм в группах с единичным направлением: а) с одним особым направлением в группах  $C_n$ ,  $C_{nh}$ ,  $S_{2n}$ , б) с особым направлением  $2$  или  $\bar{2}$ , перпендикулярным главному единичному направлению в группах  $C_{nv}$ ,  $D_n$ ,  $D_{nv}$ ,  $D_{nd}$ . Вывод простых форм в группах без единичных направлений. Простые формы  $\{hkl\}$  – производные гексаэдра.. Простые формы  $\{hhl\}$  ( $h>1$ )– производные октаэдра (тетраэдра). Простые формы  $\{hll\}$  ( $h>1$ )– производные октаэдра (тетраэдра) и гексаэдра. Общие простые формы кубической сингонии для групп  $m\bar{3}m$ ,  $\bar{4}3m$ ,  $m\bar{3}$ ,  $432$ ,  $23$ .

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Определите понятие «простая форма».
2. В каких случаях грань занимает частное положение, в каких – общее?
3. Назовите три способа расположения исходной грани в группах с единственным особым направлением, при которых будут создаваться частные простые формы.

4. Назовите три способа получения частных форм в группах с побочными особыми направлениями.
5. Какие группы называются n-гонально-пирамидальными? Почему?
6. Обозначьте сфеноидальную группу по Шенфлису.
7. Как называют группы  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_6$  по общей простой форме?
8. Какие элементы симметрии содержит группа  $C_1$ ? Запишите эту группу в обозначениях Браве, Шенфлиса, Германа-Могена.
9. Какими способами можно вывести простые формы кристаллов кубической сингонии?
10. Перечислите основные простые формы кристаллов кубической сингонии.
11. Как расположены грани основных простых форм кубической сингонии по отношению к осям высших порядков?
12. К какой предельной форме приведет процесс  $(hhl) \rightarrow (110)$  в группах  $\bar{4}3m$ ,  $23, m\bar{3}m$ ,  $432$ ,  $m\bar{3}$ ?
13. Запишите гексооктаэдрическую группу в обозначениях Германа-Могена.
14. Как называется группа  $m\bar{3}$  по виду общей простой формы?
15. В каких группах могут существовать гироздры?
16. Сколько граней будет иметь осевик в группе  $432$ , сколько – в группе  $23$ ?

Литература:

1. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. пособие / Е. С. Астапова ; АмГУ. ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. - 88 с.
2. Чупрунов, Е. В. Основы кристаллографии [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев. - М. : Физматлит, 2006. - 500 с.
3. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>
4. Астапова, Е. С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

**Модуль 3. «Основные понятия, принципы кристаллофизики. Группы Кюри. Векторные и тензорные свойства кристаллов. Диэлектрические, магнитные свойства. Теплопроводность».**

**Тема 3.1.**

**Задачи на использование предельных групп – групп Кюри.  
Матричные представления преобразований симметрии**

План занятия:

1. Решение кристаллофизических задач. Общие принципы.
2. Задачи на использование предельных групп – групп Кюри.
3. Задачи с использованием матричных представлений преобразований симметрии.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Решение кристаллофизических задач. Задачи на использование предельных групп – групп Кюри. Матричные представления преобразований симметрии.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Приведите алгоритмы решения кристаллофизических задач (любая задача по выбору студента). Общие принципы.
2. Задачи на использование предельных групп – групп Кюри.
3. Задачи с использованием матричных представлений преобразований симметрии.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.
4. Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование. <http://window.edu.ru/>

### **Тема 3.2.**

#### **Задачи на векторные свойства**

План занятия:

1. Задачи на векторные свойства.
2. Построение указательной поверхности пьезоэлектрического коэффициента.
3. Задачи на расположение вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ ,  $1$ .

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на векторные свойства. Пьезоэлектрический эффект. Указательная поверхность пьезоэлектрического коэффициента, ее симметрия. Плоскость антисимметрии. Вывод уравнения указательной поверхности. Расположение указательной поверхности относительно осей симметрии кристалла. Расположение вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ ,  $1$ . Количество независимых параметров, определяющих векторное свойство в кристаллах триклинной, моноклинной и др. сингоний.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Приведите алгоритм решения задачи на векторные свойства (по выбору студента).
2. Поясните построение указательной поверхности пьезоэлектрического коэффициента.
3. Поясните принципы расположения вектора полярного свойства в группах 2, 3, 4, 6,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ ,  $m$ ,  $1$ .

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.
4. Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания. <http://www.iqlib.ru>

### Тема 3.3.

#### Задачи на диэлектрические свойства

##### План занятия:

1. Задачи на диэлектрические свойства.
2. Построение характеристической поверхности тензора 2-го ранга.
3. Определение влияния симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости (3 случая).

##### На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на диэлектрические свойства. Тензор второго ранга  $\epsilon_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора диэлектрической проницаемости. Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга. Симметрия характеристической поверхности. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости (3 случая).

##### Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

##### Вопросы для обсуждения:

1. Поясните решение задачи на диэлектрические свойства (по выбору студента).
2. Расскажите, каким образом строится характеристическая поверхность тензора 2-го ранга.
3. Рассмотрите 3 случая влияния симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости.

##### Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

### Тема 3.4.

#### Задачи на магнитные свойства

##### План занятия:

1. Задачи на магнитные свойства.
2. Определение связи между напряженностью  $H$ , намагниченностью  $J$  и магнитной индукцией  $B$  в изотропном материале и кристалле.
3. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости.

##### На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на магнитные свойства. Связь между напряженностью  $H$ , намагниченностью  $J$  и магнитной индукцией  $B$  в изотропном материале и кристалле. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Анизотропия магнитных свойств. Симметрия ферромагнитных кристаллов.

##### Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

##### Вопросы для обсуждения:

1. Поясните решение задачи на магнитные свойства (по выбору студента).
2. Как определить зависимость между напряженностью  $H$ , намагниченностью  $J$  и магнитной индукцией  $B$  в изотропном материале и кристалле?
3. Опишите тензоры магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости.
4. Расскажите об анизотропии магнитных свойств.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

### Тема 3.5.

#### Задачи на теплопроводность

План занятия:

1. Примеры задач на теплопроводность.
2. Определение зависимости теплопроводности от температуры.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Коэффициент теплопроводности – симметричный тензор второго ранга. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Зависимость теплопроводности от температуры.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Расскажите о коэффициенте теплопроводности, охарактеризуйте симметричность тензора второго ранга.
2. Покажите на примерах анизотропию коэффициентов теплопроводности.
3. Каким образом определяется зависимость теплопроводности от температуры?

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

### Модуль 4. «Оптические, механические свойства кристаллов. Особенности изменения физических характеристик в анизотропных средах».

#### Тема 4.1.

#### Задачи на оптические свойства кристаллов.

План занятия:

1. Решение кристаллофизических задач на оптические свойства.
2. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий.
3. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Решение кристаллофизических задач. Задачи на оптические свойства кристаллов. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле. Тензоры диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и диэлектрической непроницаемости  $\eta$ . Двойное преломление в кристаллах низшей и средней категории. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий. Оптическая индикатрисса. – характеристическая поверхность тензора диэлектрической непроницаемости. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Приведите примеры решения задач на оптические свойства кристаллов.
2. Расскажите о двойном лучепреломлении и поляризации света в кристалле.
3. Опишите тензоры диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и диэлектрической непроницаемости  $\eta$ .
4. Расскажите о двойном преломлении в кристаллах низшей и средней категории.
5. Расскажите о волновых поверхностях в кристаллах различных категорий.
6. Приведите примеры оптических индикатрисс в кристаллах различных сингоний.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

## Тема 4.2.

### Задачи на напряжения и деформации в кристаллах

План занятия:

1. Решение задач на механическое напряжение.
2. Определение связи тензора деформаций с симметрией кристалла.
3. Определение симметрии теплового расширения кристалла.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на напряжения и деформации в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. 3 нормальных и 6 сдвиговых компонент тензора механических напряжений  $T_{ij}$ . Деформации. Тензор деформаций  $e_{ij}$ . Антисимметричная и симметричная части тензора  $e_{ij}$ . Связь тензора деформаций с симметрией кристалла. Тепловое расширение. Тензор коэффициентов теплового расширения  $\alpha_{ij}$ . Симметрия теплового расширения кристалла.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Приведите пример задач на напряжения и деформации в кристаллах.
2. Поясните общий случай напряженного состояния (3 нормальных и 6 сдвиговых

компонент тензора механических напряжений  $T_{ij}$ ).

3. Расскажите о деформации, тензоре деформаций.
4. Расскажите о симметрии теплового расширения кристалла.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

### Тема 4.3.

#### Задачи на пьезоэлектрический эффект

План занятия:

1. Задачи на прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.
2. Определение связи вектора электрической поляризации  $P$  с тензором механических напряжений  $T_{ij}$ .

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Связь вектора электрической поляризации  $P$  с тензором механических напряжений  $T_{ij}$ . Тензор пьезоэлектрических модулей  $d_{ijk}$  - тензор третьего ранга.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Расскажите о пьезоэлектрическом эффекте (прямой и обратном).
2. Как связаны вектор электрической поляризации  $P$  с тензором механических напряжений  $T_{ij}$  .?
3. Расскажите о тензоре пьезоэлектрических модулей.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.
2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.
3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

### Тема 4.4.

#### Задачи на упругие свойства

План занятия:

1. Применение закона Гука для изотропных и анизотропных тел.
2. Решение задач на упругие свойства кристаллов.

3. Определение влияния симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных.

На практическом занятии должны быть освещены следующие вопросы:

Задачи на упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Тензоры

четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ . Симметричность тензоров. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных. Форма матриц тензора упругих постоянных.

Учебно-методические материалы:

Студенту рекомендуется использовать учебно-методические материалы, приведённые в разделе 9 рабочей программы дисциплины.

Вопросы для обсуждения:

1. Расскажите о тензорах четвертого ранга  $C_{ijkl}$ ,  $S_{ijkl}$ .

2. Как определить влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных?

3. Расскажите о законе Гука для изотропных и анизотропных тел.

Литература:

1. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1979. - 640 с.

2. Астапова, Е.С. Основы кристаллографии и физики кристаллов [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 010701 - "Физика" / Е. С. Астапова ; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 111 с.

3. Сонин, А. С. Курс макроскопической кристаллофизики: учеб. пособ.: для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.

### **III. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ (РЕКОМЕНДАЦИИ)**

#### **3.1. Методические указания для преподавателя**

Дисциплина «Основы кристаллографии и физики кристаллов» в структуре ООП ВПО находится в блоке дисциплин специализации. На освоение дисциплины «Основы рентгеноструктурного анализа» отводится 97 часов, из них: 36 часов лекций, 36 часов практических занятий, 25 часов - самостоятельная работа студентов. Структура и содержание дисциплины изложены в разделе 4 рабочей программы. Содержание тем четырех модулей дисциплины изложено в разделе 5 рабочей программы. Лекции проводятся в виде лекции-беседы или в виде лекции-дискуссии.

Для текущего контроля используется тестирование (один раз в каждом модуле), проведение коллоквиума и контрольная работа. Контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тесте 4 задания. Тест выполняется в письменном виде на практическом занятии. Тест выявляет теоретические знания, практические умения и аналитические способности студентов. В семестре предполагается выполнение четырех расчетно-графических работ по соответствующим модулям. Коллоквиум проводится в устной форме по окончании лекционного материала по двум первым модулям. Вопросами коллоквиума являются часть зачетных вопросов. Контрольная работа выполняется в конце семестра по всем пройденным модулям семестра. В контрольной работе содержится четыре задачи.

Преподаватель использует в лекционных и практических занятиях технические средства обучения: видеопроектор, мультимедийный проектор, компьютеры, указанные в разделе 10 рабочей программы. В качестве демонстрационного материала используются коллекции кристаллов природных неорганических соединений, в качестве справочных данных используется банк рентгенометрических данных.

Литература, используемая преподавателем в качестве основной, приводится в разделе 9 рабочей программы. Необходимо использовать дополнительную литературу и интернет-ресурсы: базу структурных данных для неорганических соединений.. ICSD (Inorganic Crystal Structure) Database, Интернет-библиотеку образовательных изданий и др. Для изложения лекционного и практического материала преподаватель использует материалы из научных статей журналов «Доклады Академии наук», «Известия вузов. Физика», «Вестник Амурского государственного университета» и т. п.

### **3.2. Методические указания для студентов**

В процессе изучения дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов» студент изучает теоретические основы кристаллографии и кристаллофизики с использованием практических занятий, овладевает знаниями о связи между структурой и свойствами кристаллических тел и получает в итоге фундаментальное образование, направленное на получение современного естественнонаучного мировоззрения.

При успешной работе на лекционных и практических занятиях и добросовестном выполнении самостоятельной работы студент осваивает основные идеи, исходные положения и определения кристаллографии и физики кристаллов, овладевает знаниями о кристаллических структурах и приобретает навыки описания структур, изучает симметрию кристаллов, точечные и пространственные группы, принципы плотной и валентной упаковок, усваивает знания об упругих свойствах кристаллов, тензоров напряжений и деформаций, устойчивости кристаллических решеток, связи структуры и физических свойств.

На лекционных занятиях студенту рекомендуется конспектирование материала, излагаемого преподавателем, с последующим дополнением изучаемого материала в процессе самостоятельной работы с помощью литературы, рекомендуемой в разделе 9 рабочей программы. Практические занятия способствуют углубленному усвоению материала, студент должен самостоятельно подготовиться к публичному выступлению по вопросам, заранее предложенным преподавателем.

Для подготовки к тестам студент использует лекционный материал, знания, полученные на практических занятиях и самостоятельную подготовку. Для полного усвоения теоретического материала и приобретения практических навыков описания структур кристаллических веществ и физических свойств кристаллов студент использует интернет-ресурсы в виде рентгенометрических баз данных и интернет-библиотеку образовательных ресурсов.

Студент обязан в семестре успешно написать тест по каждому из четырех модулей, сдать коллоквиум, написать контрольную работу и сдать зачет в конце семестра в соответствии с учебным планом. При итоговом контроле студент в устной беседе с преподавателем должен показать успешное усвоение всего теоретического материала.

### **3.3. Методические указания к практическим занятиям**

Практические занятия являются составной частью процесса усвоения дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов». Студент в процессе выполнения заданий на практических занятиях и подготовке к ним учится оценивать величину коэффициентов, характеризующих свойства кристаллов, описывать свойства кристаллов с учетом анизотропии, выбирать оптимальные значения коэффициентов в зависимости от конкретных условий практического применения кристаллов, овладевает навыками решения кристаллографических задач, учится строить сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции кристаллов, грамотно описывать внешнюю форму и внутреннее строение кристаллов, используя знания по точечной и пространственной симметрии, необходимые для правильной интерпретации результатов самостоятельной научной деятельности и понимания специальной литературы.

Студент должен учитывать, что знания и навыки, приобретенные им при изучении модуля 1 «Основные понятия и представления кристаллографии», необходимы для успешного усвоения материала модуля 2 «Точечные и пространственные группы, методы проектирования», а первые два модуля необходимы для успешного усвоения 3 и 4 модулей. При изучении первых двух модулей студент овладевает основами кристаллографии, он должен использовать графический материал, изложенный в литературных источниках, предложенных в разделе 9 рабочей программы, у студента в процессе практических занятий развивается пространственное воображение, необходимое для усвоения теоретического материала.

Рекомендации по планированию и организации времени, необходимого на изучение дисциплины, представлены в таблице 2.

Таблица 2

№ п/п	Тема практического занятия	Аудиторные часы	Часы самостоятельной работы студента
1.1	Задачи на правила взаимодействия элементов симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп. Элементы симметрии I и II рода.	2	1
1.2	Задачи на проектирование, изучение методов проектирования кристаллов: сферические, стереографические, гномонические, гномостереографические проекции.	2	1
1.3	Задания на индцирование кристалла. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний. Символы ребер кристалла. Уравнение плоскости в кристаллографическом варианте. Графический метод определения граней и ребер кристалла - метод развития зон.	2	1
1.4	Зависимость между старой (XYZ) и новой ( $X'Y'Z'$ ) координатными системами, между старыми (hkl), [rst] и новыми (HKL), [RST] символами граней и ребер. Преобразование координатных осей. Преобразование индексов граней кристалла. узловых сеток. Преобразование индексов ребер кристалла. Вычисление матриц преобразования осей при различных заданиях координатных систем.	2	1
2.1	Задачи на использование графических методов индцирования граней кристаллов и определение их геометрических констант. Метод развития зон. Определение геометрических констант кристалла. Определение позиции грани методом развития зон. Определение символов граней кристалла методом развития зон. Метод косинусов Вульфа.	2	1
2.2	Определение позиций основных граней кристалла по его элементам. Построение проекций координатных граней. Определение положения единичной грани.	2	1
2.3	Вывод точечных групп симметрии с единичными и без единичных направлений с использованием символики Шенфлиса.	2	1

2.4	Пространственные группы с примитивной, базоцентрированной, объемноцентрированной решетками Бравэ. Приемы вывода пространственных групп, подчиненных точечным группам $mmm$ ( $D2h$ ), $222$ ( $D$ ). Построение графиков пространственных групп.	2	1
2.5	Вывод простых форм в группах с единичным направлением: а) с одним особым направлением в группах $C_n$ , $C_{nh}$ , $S_{2n}$ , б) с особым направлением $2$ или $\bar{2}$ , перпендикулярным главному единичному направлению в группах $C_{nv}$ , $D_n$ , $D_{nv}$ , $D_{nd}$ . Вывод простых форм в группах без единичных направлений. Простые формы $\{hkl\}$ – производные гексаэдра.. Простые формы $\{hhl\}$ ( $h>1$ )– производные октаэдра (тетраэдра). Простые формы $\{hll\}$ ( $h>1$ )– производные октаэдра (тетраэдра) и гексаэдра. Общие простые формы кубической сингонии для групп $m\bar{3}m$ , $\bar{4}3m$ , $m\bar{3}$ , $432$ , $23$ .	2	1
3.1	Решение кристаллофизических задач. Задачи на использование предельных групп – групп Кюри. Матричные представления преобразований симметрии.	2	1
3.2	Задачи на векторные свойства. Пироэлектрический эффект. Указательная поверхность пироэлектрического коэффициента, ее симметрия. Плоскость антисимметрии. Вывод уравнения указательной поверхности. Расположение указательной поверхности относительно осей симметрии кристалла. Расположение вектора полярного свойства в группах $2$ , $3$ , $4$ , $6$ , $mm2$ , $3m$ , $4mm$ , $6mm$ , $m$ , $1$ . Количество независимых параметров, определяющих векторное свойство в кристаллах триклинной, моноклинной и др. сингоний.	2	1
3.3	Задачи на диэлектрические свойства. Тензор второго ранга $\epsilon_{ij}$ . Физический смысл компонент тензора диэлектрической проницаемости. Характеристическая поверхность тензора 2-го ранга. Симметрия характеристической поверхности. Влияние симметрии кристалла на форму указательной поверхности тензора диэлектрической проницаемости (3 случая).	2	1
3.4	Задачи на магнитные свойства. Связь между напряженностью $H$ , намагниченностью $J$ и магнитной индукцией $B$ в изотропном материале и кристалле. Тензоры второго ранга магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Анизотропия магнитных свойств. Симметрия ферромагнитных кристаллов.	2	1

3.5	Задачи на теплопроводность. Коэффициент теплопроводности – симметричный тензор второго ранга. Анизотропия коэффициентов теплопроводности. Зависимость теплопроводности от температуры.	2	1
4.1	Решение кристаллофизических задач. Задачи на оптические свойства кристаллов. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле. Тензоры диэлектрической проницаемости $\epsilon$ и диэлектрической непроницаемости $\eta$ . Двойное преломление в кристаллах низшей и средней категории. Волновые поверхности в кристаллах различных категорий. Оптическая индикатрисса. – характеристическая поверхность тензора диэлектрической непроницаемости. Оптическая индикатрисса в кристаллах различных сингоний.	2	1
4.2	Задачи на напряжения и деформации в кристаллах. Механическое напряжение. Общий случай напряженного состояния. 3 нормальных и 6 сдвиговых компонент тензора механических напряжений $T_{ij}$ . Деформации. Тензор деформаций $e_{ij}$ . Антисимметричная и симметричная части тензора $e_{ij}$ . Связь тензора деформаций с симметрией кристалла. Тепловое расширение. Тензор коэффициентов теплового расширения $\alpha_{ij}$ . Симметрия теплового расширения кристалла.	2	1
4.3	Задачи на пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Связь вектора электрической поляризации $P$ с тензором механических напряжений $T_{ij}$ . Тензор пьезоэлектрических модулей $d_{ijk}$ - тензор третьего ранга.	2	1
4.4	Задачи на упругие свойства. Закон Гука для изотропных и анизотропных тел. Тензоры четвертого ранга $C_{ijkl}$ , $S_{ijkl}$ . Симметричность тензоров. Влияние симметрии кристаллов на тензоры упругих постоянных. Форма матриц тензора упругих постоянных	2	1

Остальные часы самостоятельной работы отводятся на подготовку к тестированию, выполнение РГР, подготовку к коллоквиуму, контрольной работе и зачету.

Последовательность изучения теоретического материала изложена в рабочей программе. Подготовку к зачету студенту необходимо производить на основании конспектов лекций, используя основную и дополнительную литературу и базы данных, указанные в

разделе 9 рабочей программы, а также необходимо повторить материалы по решению всех типов задач, решенных на практических занятиях и самостоятельно.

### **3.4. Методические указания к самостоятельной работе студентов**

Самостоятельная работа студента (СРС) представляет собой процесс целенаправленного активного приобретения студентом новых знаний и умений без непосредственного участия преподавателя.

Формами самостоятельной работы являются: изучение материалов лекций, подготовка к практическим занятиям, выполнение расчетно-графической работы, подготовка к контролирующему тесту по модулю, подготовка к коллоквиуму, подготовка к контрольной работе, подготовка к зачету. Время для самостоятельной работы целесообразно распределить следующим образом: 6, 6, 6, 7 часов по 1, 2, 3, 4 модулям соответственно.

Студенту рекомендуется подготовить конспекты по итогам самостоятельного изучения тем, перечень которых указан в подразделе 8.5 рабочей программы. Рекомендации по планированию и организации времени, отведенного на изучение дисциплины, и перечень тем, которые необходимо усвоить студенту для выполнения расчетно-графических работ и подготовки к практическим занятиям, приведены в таблице предыдущего подраздела 3.3.

Студенту рекомендуется использовать в качестве основной литературы источники, приведенные в подразделе 9а рабочей программы, в качестве дополнительной литературы использовать источники, приведенные в подразделе 9б, программное обеспечение и интернет-ресурсы в подразделе 9в рабочей программы.

Студент выполняет четыре контролирующих теста – по одному по итогам изучения тем теоретического материала каждого модуля. Контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тесте 4 задания. Тест выполняется в письменном виде на практическом занятии. Тест выявляет теоретические знания, практические умения и аналитические способности студентов.

Студенту рекомендуется для подготовки к расчетно-графической работе использовать литературные и интернет источники из подраздела 9 рабочей программы. Студент выполняет в семестре четыре расчетно-графических работы по соответствующим модулям. РГР зачитывается при условии правильного выполнения всех задач. Для успешного выполнения РГР студенту необходимо посещать практические занятия.

Для подготовки к коллоквиуму студенту рекомендуется использовать материалы лекционных конспектов, учебники и учебные пособия, научные журналы, указанные в подразделе 9 рабочей программы, а также записи, произведенные на практических занятиях. Коллоквиум проводится в устной форме по окончании лекционного материала по двум первым модулям. Вопросами коллоквиума являются часть зачетных вопросов, а именно вопросы с 1 по 40 включительно из пункта 8.6.2 рабочей программы.

При подготовке к контрольной работе в конце семестра студенту рекомендуется использовать конспекты практических занятий, учебники из рекомендованного списка литературы и конспекты лекций. Контрольная работа выполняется в конце семестра по всем пройденным модулям семестра. В контрольной работе содержится четыре задачи. Контрольная работа направлена на проверку умений студентов применять полученные теоретические знания в отношении определенной конкретной задачи.

## **IV. Контроль знаний**

### **4.1. Текущий контроль знаний**

Текущий контроль знаний выполняется с целью повышения качества усвоения теоретического материала и равномерного распределения нагрузки студента на освоение теоретического материала дисциплины и приобретения практических навыков.

Текущий контроль осуществляется преподавателем на лекционных занятиях, практических занятиях, тестировании по материалам каждого модуля, проведении коллоквиума, проверке контрольной работы. Студенту рекомендуется равномерно распределять своё время для изучения материалов дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов», постепенно изучать модули дисциплины и оценивать результат усвоения по итогам контрольных точек проверки знаний, таким образом создаются условия для успешной сдачи зачета в конце семестра и приобретения прочных знаний по дисциплине.

**При подготовке к тесту** студент повторяет теоретический материал лекций, решение задач, предлагаемых на практических занятиях и для самостоятельного решения, при этом использует учебные пособия и интернет-ресурсы, указанные в разделе 9 рабочей программы.

Примерные образцы тестов выглядят следующим образом:

#### Тестовые задания (образец 1)

Тестовые задания по проверке остаточных знаний по дисциплине  
«Основы кристаллографии и физики кристаллов»  
для специальности 010701.65 – физика  
4 задания  
время тестирования – 20 минут

#### Инструкция:

все задания имеют одну и ту же форму – с выбором одного ответа из четырех предложенных, в каждом задании по 2 вопроса, номер правильного ответа нужно обвести в кружок

#### Вариант 1

##### Задание 1

1а) Элементы симметрии I рода связывают друг с другом фигуры ...

1) конгруэнтные и энантиоморфные    2) энантиоморфные    3) конгруэнтные    4) любые

1б) Основной закон симметрии кристаллов гласит: «В кристаллах невозможны оси симметрии ... порядков»

1) 5-го и выше 6-го    2) 6-го и ниже 5-го    3) 5-го    4) 6-го

##### Задание 2

2а) Ось  $L_3$  является ...

1) зеркальной осью  
2) инверсионной осью симметрии третьего порядка  
3) сложной осью симметрии третьего порядка  
4) поворотной осью симметрии третьего порядка

2б) В кристаллографии существуют возможности распределения многообразия кристаллов с соответствующими элементарными ячейками в зависимости от линейных соотношений масштабных единиц измерений по координатным осям – *категории*, это ...

...

- 1) высокая, низшая      2) высшая, средняя,      3) средняя, низкая      4) высокая, низкая  
категории                      низшая категории                      категории                      категории

### Задание 3

3а) В вариантах ответа выберите обозначение группы симметрии в символике Германа-Могена

- 1) 4/mmm                      2)  $L_33P$                       3)  $O_h$                       4)  $L_2$

3б) Точечную группу симметрии образует ...

- 1 Совокупность операций макросимметрии  
2 Совокупность операций I рода  
3 Совокупность операций микросимметрии  
4 Совокупность операций II рода

### Задание 4

4а) Количество точечных групп без единичных направлений ...

- 1) 32                      2) 5                      3) 27                      4) 230

4б) Примитивная ячейка Бравэ обозначается ...

- 1) P                      2) I                      3) F                      4) A

### Тестовые задания (образец 2)

<p>Тестовые задания по проверке остаточных знаний по дисциплине «Основы кристаллографии и физики кристаллов» для специальности 010701.65 – физика 4 задания время тестирования – 20 минут</p>
---

### Инструкция:

все задания имеют одну и ту же форму – с выбором одного ответа из четырех предложенных, в каждом задании по 2 вопроса, номер правильного ответа нужно обвести в кружок

### Вариант 2

### Задание 1

1а)

В результате малой трехмерной деформации твердого тела точки из положения  $x_i$  сместились в положение  $x_i'$ . Компоненты смещения  $\Delta u_i$  зависят от первоначального положения точки как ...

- 1)  $\Delta u_1 = e_{11}x_1 + e_{12}x_2$
- 2)  $\Delta u_1 = e_{11}x_1 + e_{12}x_2 + e_{13}x_3$
- 3)  $\Delta u_i = e_{ij}x_j$ , где  $j$  меняется от 1 до  $i$
- 4)  $\Delta u_1 = e_{11}x_1 + e_{12}x_2 + e_{13}x_3$   
 $\Delta u_2 = e_{21}x_1 + e_{22}x_2 + e_{23}x_3$

1б)

Какая из перечисленных групп относится к группам Кюри?

- 1)  $2/m$
- 2) 222
- 3)  $\infty 2$
- 4) 2

### Задание 2

2а)

Характеристической поверхностью тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$  кристаллов гексагональной сингонии является ...

- 1) тор
- 2) эллипсоид вращения
- 3) сфера
- 4) трехосный эллипсоид

2б)

Модуль прямого пьезоэлектрического эффекта кристалла описывается тензором ...

- 1) первого ранга (вектором)
- 2) четвертого ранга
- 3) второго ранга
- 4) третьего ранга

### Задание 3

3а)

Характеристическая поверхность коэффициентов теплового расширения кристалла моноклинной сингонии – это...

- 1) эллипсоид вращения
- 2) трехосный эллипсоид
- 3) сфера
- 4) скаленоэдр

3б)

Если кристалл обладает пьезоэлектрическим эффектом, то компоненты вектора электрической поляризации  $P$  связаны с компонентами тензора механических напряжений  $T_{ij}$  следующим образом ...

- 1)  $P_i = d_{ijk}T_{jk}$
- 2)  $P_i = d_{i11}T_{11} + d_{i12}T_{12}$
- 3)  $P_i = d_{32}T_{32} + d_{i33}T_{33}$
- 4)  $P_i = d_{i13}T_{13} + d_{32}T_{32}$

### Задание 4

4а)

Закон Гука для кристаллов имеет вид ...

$$1) T_{11} = c_{1122} \epsilon_{22},$$

где  $T_{11}$  - компонента тензора напряжений,  $\epsilon_{22}$  - компонента тензора деформаций,  
 $c_{1122}$  - компонента тензора упругих модулей

2)  $\epsilon = sT$ , где  $\epsilon$  - деформация,  $s$  – коэффициент податливости,  $T$ - напряжение

3)  $T = c\epsilon$ , где  $T$ - напряжение,  $c$  - константа упругости,  $\epsilon$  - деформация

$$4) \epsilon_{ij} = s_{ijkl} T_{kl},$$

где  $T_{kl}$  - тензор напряжений,  $\epsilon_{ij}$  - тензор деформаций,

$s_{ijkl}$  - тензор коэффициентов податливостей

4б)

Пьезоэлектрический эффект может проявляться только у кристалла, кристаллизующегося в точечной группе симметрии ...

1)  $\bar{1}$

2)  $2/m$

3)  $mm2$

4)  $4/m$

**При подготовке к коллоквиуму** студенту выдаются вопросы за неделю до коллоквиума. Вопросами коллоквиума являются вопросы с 1 по 40 включительно из вопросов к зачету, приведённые в подпункте 8.6.2 рабочей программы.

**При подготовке к расчетно-графической работе** студенту рекомендуется повторить и проанализировать теоретический материал модуля, прорешать задачи, предлагаемые на практических семинарах и для самостоятельного выполнения, повторить понятия и математические выражения, описывающие явления и процессы в кристаллах. В одном семестре предполагается выполнение четырех расчетно-графических работ по соответствующим модулям. РГР зачитывается при условии правильного выполнения всех задач. Образцы расчетно-графических работ приводятся ниже.

#### Расчетно-графическая работа (образец 1)

Вариант 1

Задание 1

Получите фёдоровские группы с  $P$ -решеткой Бравэ, добавляя к операциям группы  $P4_22$  поворот относительно инверсионной оси 4-го порядка.

Задание 2

Координаты некоторой точки в примитивной элементарной ячейке  $xyz$  ( $x=0,4$ ;  $y=0,3$ ;  $z=0,1$ ). Какие координаты получит та же точка, если за оси координат выбрать оси объемно-центрированного параллелепипеда? Предусмотреть разные возможности перехода от  $P$ -параллелепипеда к  $I$ - параллелепипеду.

Задание 3

Опишите все простые формы, возможные в кристаллах точечной группы  $m\bar{3}m$ . Изобразите их графически.

#### Задание 4

Найдите матричное представление и порядок группы симметрии низкотемпературной модификации кварца  $\text{SiO}_2$ . Сведения, необходимые для выполнения задания: точечная группа симметрии низкотемпературной модификации кварца 32.

#### Расчетно-графическая работа (образец 2)

#### Вариант 3

#### Задание 1

Выведите уравнение указательной поверхности пьезоэлектрического эффекта. Определите симметрию этой поверхности, изобразите графически.

#### Задание 2

Определите, каким тензором описывается линейное расширение сульфата лития в ортогональной системе координат  $X_1X_2X_3$ , если а) ось симметрии  $2 \parallel X_3$ ; б) ось симметрии  $2 \parallel X_2$ ?

#### Задание 3

Напряженное состояние кристалла кварца в кристаллофизической системе координат задается следующим образом:  $t_{11}=10 \text{ Н/см}^2$ ,  $t_{22}=20 \text{ Н/см}^2$ ,  $t_{33}=30 \text{ Н/см}^2$ ,  $t_{12}=-5 \text{ Н/см}^2$ . Определите: величину экстремальных нормальных напряжений; б) ориентацию плоскости, испытывающей максимальное и минимальное напряжения.

#### Задание 4

Определите симметрию монокристалла титаната бария в сегнетофазе  $m\bar{3}m$ , если его симметрия в парафазе  $m\bar{3}m$ , а вектор спонтанной поляризации располагается: а) вдоль направления  $[100]$ , б) вдоль направления  $[111]$ , в) вдоль направления  $[110]$ .

**При подготовке к контрольной работе** студенту разъясняется структура контрольной работы на практическом занятии, предшествующем контрольной работе, на этом же занятии анализируются алгоритмы решения задач, подобных тем, которые будут на контрольной работе. При подготовке к контрольной работе студенту необходимо повторить весь теоретический и практический материал дисциплины. Образец варианта контрольной работы приводится ниже.

#### Контрольная работа по дисциплине «Основы кристаллографии и физики кристаллов» (образец)

#### Задача 1

В структуре кристалла ромбической сингонии зеркальные плоскости чередуются с клиноплоскостями  $n$ . Какой решётке Бравэ подчиняется структура этого кристалла? Выполните то же задание с условием, что чередуются плоскости: 1)  $a$  и  $b$ , 2)  $m$  и  $c$ , 3)  $a$  и  $c$ . Изобразите графически эти плоскости.

#### Задача 2

Выведите фёдоровские группы ромбической сингонии, являющиеся подгруппами следующих групп: а)  $Cmmm$ , б)  $Pnma$ , в)  $Cmm2$ ,  $Cmc2_1$ .

### Задача 3

При упругой деформации кристаллического образца, имеющего форму гексаэдра 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 гексаэдра и изменение его объема при деформации.

### Задача 4

Определите угол между волновой нормалью  $m$  и направлением луча  $s$  для световой волны, распространяющейся в кристалле  $LiNbO_3$  в направлении, составляющем угол  $30^\circ$  с оптической осью кристалла.

## 4.2. Итоговый контроль знаний

Целью итогового контроля знаний является комплексная оценка качества усвоения студентами теоретических знаний, уровня навыков и умений, приобретенных студентами в итоге изучения дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов».

В конце семестра студенты обязаны сдать зачет по всему изученному материалу в соответствии с утвержденной рабочей программой дисциплины.

Итоговый контроль в виде зачета проводится преподавателем в устной форме. Преподаватель имеет право задавать студенту дополнительные вопросы по всему объему изученной дисциплины. Преподаватель учитывает как текущую успеваемость студента, так и его устные ответы на зачете.

Вопросы для подготовки к зачету преподаватель выдает студенту в начале семестра на первой лекции или на первом практическом занятии. Вопросы к зачету приведены в подразделе 8.6.2 рабочей программы.

При определении оценки знаний студентов во время зачета преподаватели руководствуются следующими критериями:

К сдаче зачета допускаются студенты, посетившие лекционные занятия данного курса и выполнившие все расчетно-графические задания, успешно написавшие тест и контрольную работу, сдавшие коллоквиум. При наличии пропусков темы пропущенных занятий должны быть отработаны. Программные вопросы к зачету доводятся до сведения студентов в начале семестра.

При определении итоговой оценки знаний студента учитывается активность и текущая успеваемость студента в течение семестра по данному предмету.

Оценка «зачет» - ставится при 70 - 100 % правильных ответах на зачете и наличии выполненных заданий.

Безупречным считается ответ, в котором правильно, ясно и подробно изложен теоретический материал по теоретическим вопросам и правильно (без единой погрешности) решены задачи с необходимыми пояснениями. Студент получает зачет при следующих соотношениях выполнения заданий билета:

при безупречном выполнении заданий билета;

при правильных ответах на теоретические вопросы и решении задач с небольшими недочетами (погрешностями);

при спорности выставления зачета беседа ведется по конспекту лекций.

В остальных случаях задание считается невыполненным и зачет не выставляется.

## **V. Интерактивные технологии и инновационные методы, используемые в образовательном процессе**

При изучении дисциплины «Основы кристаллографии и физики кристаллов» применяются следующие интерактивные технологии: метод заданий, метод дебатов, метод презентации информации.

Метод дебатов является методом публичного обсуждения. Дебаты – это специально подготовленный и организованный публичный спор на научную или общественно важную тему, в котором участвуют две или более стороны, отстаивающие свои позиции. Данная интерактивная форма применяется при изучении следующих тем: вывод точечных групп симметрии, описание простых форм кристаллов различных сингоний и др. Преподаватель заранее рекомендует студентам подготовиться к дебатам с помощью учебной и научной литературы, интернет-ресурсов, конспектов лекций.

Лекции проводятся с использованием мультимедийного оборудования. Каждая лекция сопровождается показом лекционных демонстраций (видеосюжетов), презентацией информации.

Для усвоения дисциплины используются интерактивные базы данных, справочных физико-химических характеристик материалов, информацию о которых можно найти в источниках, указанных в разделе 9 и 10 рабочей программы.