

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.  
Н.И. Лобачевского»

Физический

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. декана  
физического факультета \_\_\_\_\_

Мальшев А.И.

« 30 » августа 2017г.

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

Кристаллография

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.03.02 «Физика»

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Физика конденсированного состояния

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очно-заочная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород

2017

год набора 2016

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Кристаллография» относится к обязательным дисциплинам вариативной части профессионального цикла основной образовательной программы по направлению 03.03.02 – Физика (4 год обучения, 7 семестр). Данный курс является первым курсом блока учебных дисциплин по физике конденсированного состояния и, в частности, физике твердого тела. Он является также необходимым при изучении студентами ряда спецкурсов по физике кристаллов, дифракционным методам исследования твердого тела, физике полупроводников и др.

### Целями освоения дисциплины являются:

Целями освоения дисциплины «Кристаллография» являются: знакомство студентов с современными взглядами на атомное строение твердых тел, методами описания симметрии, атомного строения и внешней огранки кристаллов, формирование представления об основных методах аналитической геометрии кристаллического пространства, теории точечной и пространственной симметрии кристаллов, о природе связи физических свойств и симметрии, дать описание их зависимости и влиянии различных внешних воздействий на физические свойства кристаллов.

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

Формируемые компетенции (код компетенции, уровень освоения – при наличии в карте компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций	Наименование оценочного средства
<i>ОПК-2</i> - Способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости модели	<b>Знать</b> физико-математический аппарат описания строения кристаллов и их физических свойств. <b>Уметь</b> выявлять необходимый способ описания строения кристаллов для исследования конкретного вида объектов. <b>Владеть</b> навыками применения физико-математического аппарата описания строения и свойств кристаллов.	Устный опрос.  Устный опрос, вопросы и задачи к экзамену.  Задачи к экзамену
<i>ПК-1</i> - (ПК-1) способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	<b>Знать</b> основные постулаты строения кристаллов, фундаментальные понятия кристаллофизики. <b>Уметь</b> определять тип исследуемых объектов – твердых тел, объяснить связь физических свойств кристаллов с их структурой. <b>Владеть</b> методологией описания структуры кристаллов, навыками исследования физических свойств кристаллических твердых тел.	Устный опрос.  Устный опрос, вопросы и задачи к экзамену.  Задачи к экзамену

## 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 7 зачетных единиц, всего 252 часа, из которых 50 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (16 часов занятия лекционного типа, 32 часа занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа - мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа - мероприятия промежуточной аттестации), 202 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
	Очно-заочное	Очно-заочное	Очно-заочное	Очно-заочное	Очно-заочное	Очно-заочное
Аналитическая геометрия кристаллического пространства		3	6			24
Точечная симметрия кристаллов		4	8			32
Пространственная симметрия кристаллических структур		2	4			20
Основы тензорного и симметричного описания физических свойств анизотропных сред		3	6			18
Электрические свойства анизотропных сплошных сред		1	4			16
Механические свойства анизотропных сплошных сред		1	2			20
Связь электрических и механических свойств анизотропных сред		1	2			24
Термодинамика равновесных сред		1	-			12
В т.ч. текущий контроль	2		2		2	
Промежуточная аттестация - Экзамен						

### Содержание разделов дисциплины.

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

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

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

4. Основы тензорного и симметричного описания физических свойств анизотропных сред. Анизотропные сплошные среды. Понятие физического свойства. Симметрия кристалла, симметрия воздействия, симметрия физического свойства. Принцип суперпозиции Кюри, принцип Неймана. Кристаллографические и кристаллофизические системы координат. Матричное описание ортогональных преобразований. Преобразования компонент векторов и тензоров при преобразовании системы координат. Тензоры различных рангов. Псевдотензоры. Внутренняя симметрия тензоров. Взаимно обратные тензоры. Матричные обозначения. Полевые и материальные тензоры. Геометрическая интерпретация тензоров. Указательная поверхность. Величина, характеризующая свойство в данном направлении. Характеристическая поверхность симметричного тензора II ранга и ее свойства. Эллипсоид значений симметричного тензора II ранга. Указательные поверхности для тензоров высших рангов. Собственные векторы и собственные значения симметричного тензора II ранга. Приведение симметричного тензора II ранга к главным осям. Собственная (внешняя) симметрия полярных и аксиальных тензоров.

5. Электрические свойства анизотропных сплошных сред.

Пирозлектрический эффект. Указательная поверхность пирозэффекта. Электрокалорический эффект. Поляризация кристаллов в электрическом поле. Тензоры поляризуемости и диэлектрической проницаемости, их симметрия для кристаллов разных сингоний. Плотность энергии электростатического поля в кристалле.

6. Механические свойства анизотропных сплошных сред.

Анизотропия механических характеристик кристаллов. Понятие о твердости и способах ее измерения. Шкала Мооса. Тензор напряжений. Частные формы тензора напряжений. Тензор упругой дилатации. Тензор упругой деформации. Тепловое расширение кристаллов. Закон Гука для кристаллов. Тензоры упругой податливости и жесткости, их симметрия. Матричные обозначения тензоров. Энергия деформированного кристалла.

7. Связь электрических и механических свойств анизотропных сред.

Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Пьезотензор и его симметрия. Физический смысл компонент пьезотензора. Переход к матрице пьезомодулей. Метод прямой проверки. Указательные поверхности пьезоэффекта. Продольный и поперечный пьезоэффект.

8. Термодинамика равновесных сред.

Внутренняя энергия и термодинамический потенциал кристалла. Обобщенные термодинамические координаты и силы. Матрица термодинамического потенциала. Ее симметрия и вытекающие из этого следствия.

#### План практических занятий.

1. Кристаллографические системы координат, символы узлов, узловых рядов и плоскостей (2 ч.).
2. Основные положения теории групп (2 ч.).
3. Операции и элементы симметрии (2 ч.).
4. Матричный метод описания операций симметрии (2 ч.).
5. Точечные группы симметрии (4 ч.).
6. Решетки Бравэ (2 ч.).
7. Операторный метод описания операций симметрии. Операции пространственной симметрии кристаллических структур. (2 ч.).
8. Пространственные группы симметрии (2 ч.).

9. Матричное представление симметрических операций и классов симметрии (2 ч.).
10. Принципы суперпозиции Кюри и принцип Неймана. Симметрия физических явлений и свойств кристаллов (2 ч.).
11. Физические свойства кристаллов, описываемые тензорами первого и второго ранга (4 ч.).
12. Напряжения и деформации в кристаллах, анализ напряженного состояния (2 ч.).
13. Пьезоэлектрические свойства кристаллов (2 ч.).
14. Упругие свойства кристаллов. Закон Гука (2 ч.).

#### 4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме и в форме практических занятий, на которых проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий и теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

#### 5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

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

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на занятиях и в процессе лекций, активность в обсуждении качественных вопросов.

Для контроля промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины «Кристаллография» используются задачи и нижеприведенные вопросы.

##### Вопросы для контроля

1. Каковы основные постулаты кристаллического пространства?
2. Определите понятия трансляций и кристаллической решетки.
3. Как преобразуются индексы узловых рядов и узловых плоскостей при изменении базиса кристаллографической системы координат?
4. Сформулируйте Первую Основную теорему решетчатой кристаллографии.
5. Сформулируйте Вторую Основную теорему решетчатой кристаллографии.
6. Сформулируйте основные свойства обратной решетки.
7. Приведите основные расчетные формулы решетчатой кристаллографии.
8. Сформулируйте основные принципы построения кристаллографических проекций.
9. Приведите основные положения теории групп.
10. В чем заключается матричный метод описания симметрии кристаллов.
11. Сформулируйте теоремы умножения операций микросимметрии кристаллов.
12. Приведите примеры точечных групп симметрии кристаллов.
13. Как связаны понятия: особые направления в кристалле и сингонии?
14. Определите свойства кристаллических многогранников.
15. Сформулируйте теорему о взаимном расположении особых направлений и узловых рядов и узловых плоскостей в кристалле.
16. Каковы возможные решетки Бравэ для кристаллов низших сингоний.
17. В чем состоит операторный метод описания пространственных операций симметрии кристаллов?
18. Каковы принципы построения графиков пространственных групп кристаллов?
19. Каковы основные постулаты анизотропных сплошных сред.
20. Перечислите предельные группы симметрии.

21. Сформулируйте понятия физического свойства, симметрии воздействия, симметрии физического свойства.
22. Сформулируйте принцип суперпозиции Кюри, принцип Неймана. Приведите примеры.
23. Кристаллографические и кристаллофизические системы координат.
24. Каков матричный подход к описанию ортогональных преобразований.
25. Введите определение тензора II ранга.
26. Как преобразуются компоненты векторов и тензоров при преобразовании системы координат.
27. Какова геометрическая интерпретация тензоров? Определите указательную поверхность физического свойства.
28. Определите величину, характеризующую физическое свойство в данном направлении.
29. Введите понятие характеристической поверхности симметричного тензора II ранга и ее свойств.
30. Что такое эллипсоид значений симметричного тензора II ранга.
31. Сформулируйте правила приведения симметричного тензора II ранга к главным осям.
32. В чем заключается пьезоэлектрический эффект? Какими свойствами обладают пьезоэлектрики?
33. Каковы особенности поляризации кристаллов в электрическом поле.
34. Рассчитайте плотность энергии электростатического поля в кристалле.
35. Введите понятие тензора напряжений. Каковы частные формы тензора напряжений.
36. Введите понятие тензора упругой дилатации, тензора упругой деформации.
37. Опишите особенности теплового расширения кристаллов.
38. Сформулируйте закон Гука для кристаллов.
39. Каковы основные свойства тензоров упругой податливости и жесткости, их симметрия.
40. Рассчитайте энергию деформированного кристалла.
41. В чем особенности прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта.
42. Определите физический смысл компонент пьезотензора.
43. Сформулируйте основной подход к описанию термодинамики равновесных сред. Каковы понятия внутренней энергии и термодинамического потенциала кристалла.
44. Что такое обобщенные термодинамические координаты и силы, матрица термодинамического потенциала.

#### Список задач для контроля.

1. Найти индексы узловой плоскости, проходящей через три узла кристаллической решетки  $[[110]]$ ,  $[[101]]$ ,  $[[011]]$ .
2. Через две точки  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  кристаллического пространства с некоторым базисом  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  проведена прямая. При каких условиях данная прямая параллельна какому-либо узловому ряду?
3. Для тетрагонального кристалла показать, что взаимное совпадение векторов прямой и обратной решеток имеет место только для зон плоскостей  $(hk0)$  и направлений с индексами  $[hk0]$ , а также  $(001)$  и  $[001]$ .
4. Найти индексы плоскости  $(hkl)$ , в которой лежат узловые ряды  $[110]$  и  $[111]$ .
5. Показать эквивалентность зеркально-поворотной оси третьего порядка и инверсионной оси шестого порядка.
6. Проверить, будут ли выполняться соотношения: 1)  $2_x \times 2_y = 2_y \times 2_x$ ; 2)  $m_x \times m_y = m_y \times m_x$ ; 3)  $2_z \times m_z = m_z \times 2_z$ ; 4)  $3_z^1 \times m_z = m_z \times 3_z^1$ .

7. Какие координаты получит точка с координатами  $x, y, z$  после действия следующей операции симметрии ? 1)  $m_y$ ; 2)  $2_z$ ; 3)  $2_{xz}$ ; 4)  $2_{yz}$ ; 5)  $4_x^1$ ; 6)  $4_y^1$ ; 7)  $4_z^1$ ; 8)  $4_z^{-1}$ ; 9)  $\bar{4}_z^{-1}$ ; 10)  $3_z^{-1}$ .

8. Вывести точечные группы симметрии и записать их символы двумя способами. Генераторы заданы следующими операциями симметрии:

- 1) Отражение в плоскости симметрии и поворот вокруг оси второго порядка, лежащей в этой плоскости;
- 2) Отражения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях симметрии и поворот вокруг оси второго порядка, лежащей в одной и перпендикулярной второй плоскости;
- 3) Поворот вокруг оси четвертого порядка и отражение в перпендикулярной ей плоскости симметрии;
- 4) Два последовательных поворота вокруг осей второго порядка, составляющих между собой угол  $45^\circ$ ;

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

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

11. Тензор упругой деформации кристалла задается в виде:

$$\begin{bmatrix} 8 & -1 & -1 \\ 1 & 6 & 0 \\ -5 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}.$$

Определить тензор малых деформаций, тензор малых вращений, а также значения главных деформаций.

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

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

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

14. Как следует ориентировать кальцитовую пластинку ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\bar{3}m$ ), чтобы при нагревании она не изменяла своей толщины?

15. Найти величину удельного сопротивления кристалла в направлении  $(1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$  относительно системы координат, в которой удельная проводимость (в  $10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ) этого кристалла описывается тензором вида:

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

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

17. Найти плотность поверхностных зарядов, возникающих на противоположных гранях турмалиновой пластинки при однородном нагревании ее на 30 К, если пластинка вырезана так, что: 1) нормаль к пластинке параллельна оси симметрии  $3$ ; 2) угол между нормалью к

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

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

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина «Кристаллография».

№	Перечень компетенций	Планируемые результаты
1	<i>ОПК-2</i> - Способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости модели	<b>Знать</b> физико-математический аппарат описания строения кристаллов и их физических свойств. <b>Уметь</b> выявлять необходимый способ описания строения кристаллов для исследования конкретного вида объектов. <b>Владеть</b> навыками применения физико-математического аппарата описания строения и свойств кристаллов.
2	<i>ПК-1</i> - (ПК-1) способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	<b>Знать</b> основные постулаты строения кристаллов, фундаментальные понятия кристаллофизики. <b>Уметь</b> определять тип исследуемых объектов – твердых тел, объяснить связь физических свойств кристаллов с их структурой. <b>Владеть</b> методологией описания структуры кристаллов, навыками исследования физических свойств кристаллических твердых тел.

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина, приводятся в Приложении.

### 6.2. Описание шкал оценивания.

Аттестация проводится в форме экзамена. Форма проведения – индивидуальное собеседование.

Экзаменационная оценка выставляется по семибальной шкале. Экзаменационные оценки «превосходно» и «отлично» – соответствуют оценке 5 (отлично) по пятибальной шкале, оценки «очень хорошо» и «хорошо» – соответствуют оценке 4 (хорошо), оценка «удовлетворительно» – соответствует оценке 3 (удовлетворительно), оценки «неудовлетворительно» и «плохо» – соответствуют оценке 2 (неудовлетворительно).

6.3. Критерии оценивания результатов обучения для проведения аттестации обучающихся по дисциплине.

Для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций, используются билеты, состоящие из 2-х вопросов, составленных на основе контрольных вопросов и задачи.

превосходно	Отличная подготовка. Студент полностью выполнил практические задания, отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Отличная подготовка. Студент полностью выполнил практические задания, отвечает полностью на вопросы билета, самостоятельно решает задачу в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы (задания) допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент полностью выполнил практические задания, однако имеются отдельные замечания по представлению и интерпретации полученных результатов. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета, самостоятельно решает задачу и отвечает на вопросы (задания) преподавателя с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Студент полностью выполнил практический задания, однако имеются замечания по представлению и интерпретации полученных результатов. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета, решает задачу с наводящими вопросами преподавателя и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент выполнил не менее 2/3 практических заданий, имеются замечания по представлению и интерпретации полученных результатов. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, может решить типовую задачу с помощью преподавателя.
неудовлетворительно	Студент выполнил менее 1/3 практический заданий, показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
плохо	Студент не выполнил практические задания. Подготовка совершенно недостаточна. Последующая передача возможна только с комиссией.

#### 6.4. Типовые вопросы к экзамену по дисциплине «Кристаллография»

Вопрос	Код компетенции
1. Кристаллическое пространство, кристаллическая решетка.	ОПК-2
2. Индексы узлов решетки, узловых рядов и узловых плоскостей.	ОПК-2
3. Первая основная теорема решетчатой кристаллографии (с доказательством).	ОПК-2
4. Обратная решетка и ее свойства.	ОПК-2
5. Вторая основная теорема решетчатой кристаллографии (с доказательством).	ОПК-2
6. Преобразование координат точек и индексов узловых плоскостей кристаллического пространства при изменении базиса кристаллографической системы координат.	ПК-1
7. Основные положения теории групп.	ОПК-2
8. Понятие о точечной симметрии кристаллов. Возможные порядки осей симметрии.	ОПК-2
9. Матричный метод описания операций симметрии.	ПК-1
10. Точечные операции симметрии кристаллического пространства: повороты, отражения, инверсия.	ОПК-2
11. Точечные операции симметрии кристаллического пространства: зеркальные повороты, инверсионные повороты.	ОПК-2
12. Теоремы об умножении операций точечной симметрии: mmN–теорема, NNN–теорема (Эйлера) и следствия из этих теорем.	ПК-1

13. Теоремы об умножении операций точечной симметрии: $22N$ – теорема, $2m\overset{\circ}{N}$ – теорема и следствия из этих теорем.	ПК-1
14. Кристаллографические точечные группы симметрии: $S_n, C_n, C_i, C_{nv}$ .	ПК-1
15. Кристаллографические точечные группы симметрии: $C_s, C_{nh}, D_{nh}$ .	ПК-1
16. Кристаллографические точечные группы симметрии: $D_n, D_{nd}$ .	ПК-1
17. Кристаллографические точечные группы симметрии. Кубические группы.	ПК-1
18. Сингонии.	ОПК-2
19. Обозначения точечных групп: по Шенфлису и международные (алгоритм и примеры).	ПК-1
20. Влияние точечной симметрии кристалла на геометрию кристаллической решетки.	ПК-1
21. Принцип суперпозиции Кюри и принцип Неймана.	ОПК-2
22. Решетки Бравэ триклинной и моноклинной сингоний.	ПК-1
23. Анизотропные сплошные среды.	ОПК-2
24. Понятие физического свойства. Симметрия кристалла, симметрия воздействия, симметрия физического свойства.	ОПК-2, ПК-1
25. Кристаллографические и кристаллофизические системы координат. Матричное описание ортогональных преобразований.	ПК-1
26. Геометрическая интерпретация тензоров. Указательная поверхность. Указательные поверхности для тензоров высших рангов.	ПК-1
27. Геометрическая интерпретация тензоров. Характеристическая поверхность симметричного тензора II ранга и ее свойства.	ПК-1
28. Пироэлектрический эффект. Указательная поверхность пироэффекта. Электрокалорический эффект.	ОПК-2
29. Поляризация кристаллов в электрическом поле. Тензоры поляризуемости и диэлектрической проницаемости, их симметрия для кристаллов разных сингоний.	ОПК-2
30. Величина, характеризующая свойство в данном направлении.	ПК-1
31. Тензор напряжений. Частные формы тензора напряжений.	ОПК-2
32. Тензор упругой дисторсии. Тензор упругой деформации.	ОПК-2
33. Тепловое расширение кристаллов.	ОПК-2
34. Закон Гука для кристаллов. Тензоры упругой податливости и жесткости, их симметрия.	ОПК-2
35. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.	ОПК-2
36. Пьезотензор и его симметрия. Физический смысл компонент пьезотензора. Переход к матрице пьезомодулей.	ОПК-2
37. Термодинамика равновесных сред. Внутренняя энергия и термодинамический потенциал кристалла.	ОПК-2
38. Обобщенные термодинамические координаты и силы. Матрица термодинамического потенциала.	ОПК-2

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература:

1. Чупрунов Е. В., Хохлов А. Ф., Фадеев М. А. - Основы кристаллографии: учеб. для вузов. - М.: Физматлит, 2004. - 500 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=59410&DB=1>
2. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука. 1979. 680 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=99234>

### б) дополнительная литература:

1. Бокий Г.Б. Кристаллохимия. М.: Наука, 1971, 400 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=405382>
2. Вайнштейн Б.К. Современная кристаллография. Т 1. М.: Наука, 1979, 383 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=100136>
3. Вайнштейн Б.К., Фридкин В.М., Инденбом В.Л. Современная кристаллография. Т 2. М.: Наука, 1979, 355 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=100137>
4. Современная кристаллография. Под. ред. акад. Б.К. Вайнштейна. Т 4. М., Наука. 1981. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=100139>

5. Егоров-Тисменко Ю.К., Литвинская Г.П.,
  6. Загальская Ю.Г. Кристаллография. М.: Изд. МГУ, 1992, 288 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=18508>
  7. Загальская Ю. Г., Литвинская Г. П., Егоров-Тисменко Ю. К. - Геометрическая кристаллография: [учеб. для геол. специальностей вузов]. - М.: Изд-во МГУ, 1986. - 165, [1] с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=102106&DB=1>
  8. Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П. Геометрическая микрокристаллография. М.: Изд. МГУ, 1976, 241 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=102107&DB=1>
  9. Зоркий П.М., Афонина Н.Н. Симметрия молекул и кристаллов. М.: Изд. МГУ, 1979, 175 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=102111>
  10. Китайгородский А.И. Молекулярные кристаллы. М.: Наука, 1971, 424 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=100072>
  11. Костов И. Кристаллография. М.: Мир, 1965, 528 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=100118>
  12. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. - Физика твердого тела: учебник. - М.: Высшая школа, 2000. - 494 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=44686>
  13. Шубников А.В., Копцик В.А., Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972, 339 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=332901>
  14. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. М.: ИЛ, 1960 <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Naj1960ru.djvu>
  15. Васильев Д.М. Физическая кристаллография.
  16. М.: Металлургия. 1972. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=99223>
  17. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Задачник по кристаллофизике. М.: Наука. 1972. 192 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=99232>
- в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

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

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины «Кристаллография» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке, некоторые из них представлены на сайте физического факультета в электронном виде. Кроме того, при необходимости выполнения некоторых математических расчетов студенты могут воспользоваться техническими возможностями терминал-класса с установленным лицензионным программным обеспечением.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 03.03.02 – «Физика».

Автор (ы) \_\_\_\_\_ к.ф.-м.н. доцент каф. КЭФ  
Овсецина Т.И.

Рецензент (ы) \_\_\_\_\_  
Зав. кафедрой кристаллографии и экспериментальной физики \_\_\_\_\_ д.ф.-м.н. профессор  
Чупрунов Е.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии  
физического факультета  
от « 30 » августа 2017 г., протокол № б/н

Председатель  
учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_ Сдобняков В.В.