

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 23.09.2022 12:10:54  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f0

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:  
Руководитель ООП:  
Б.Б. Педько  
«30» августа 2017 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

**Введение в физику конденсированных сред**

Направление подготовки  
**03.03.02 - Физика**

Профиль подготовки  
Физика конденсированного состояния  
вещества

Для студентов 2 курса очной формы обучения

Составитель: д.ф.-м.н., профессор А.В. Солнышкин

Тверь 2017

## **I. Аннотация**

### **1. Наименование дисциплины в соответствии с учебным планом**

Введение в физику конденсированных сред

### **2. Цель и задачи дисциплины**

**Целью** дисциплины является создание фундаментальной базы знаний в области физики конденсированного состояния вещества, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение различных разделов физики конденсированных сред.

**Задачами** освоения дисциплины являются:

- формирование представления об основных понятиях физики конденсированного состояния;
- формирование представления об особенностях строения конденсированных сред;
- знакомство с физическими свойствами кристаллических материалов;
- изучение эффектов, сопровождающих контактные явления в полупроводниках.

### **3. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Введение в физику конденсированных сред» входит в вариативную часть учебного плана и изучается студентами в четвертом семестре. Содержательно она закладывает основы знаний для изучения физических свойств и структуры конденсированных сред. Учебная дисциплина непосредственно связана с дисциплинами «Кристаллография», «Физика конденсированного состояния вещества» и «Современные методы исследования твердых тел», «Нанотехнологии в физике конденсированного состояния».

Уровень начальной подготовки для успешного освоения дисциплины «Введение в физику конденсированных сред»: обучающийся должен *иметь представление* о молекулярно-кинетической теории вещества, использующей статистические законы, и о термодинамике, изучающей макроскопических свойств тел и явлений природы; *знать* основные законы механики, молекулярной физики, электродинамики и оптики, а также владеть математическим аппаратом векторной алгебры, математического анализа, теории групп и тензорного исчисления.

**4. Объем дисциплины:** 6 зачетных единиц, 216 академических часов, **в том числе контактная работа:** лекции – 19 часов, практические занятия – 38 часов; **самостоятельная работа:** 159 часов.

В учебном плане 2014 г.н. **объем дисциплины:** 5 зачетных единиц, 180 академических часов, **в том числе контактная работа:** лекции – 19 часов, практические занятия – 38 часов; **самостоятельная работа:** 123 часа.

**5. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-1</b> способность использовать в профессиональной деятельности базовые естественно-научные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук</p>	<p><b>Владеть:</b> способностью использовать базовые знания в области физики конденсированных сред в профессиональной деятельности. <b>Уметь:</b> объяснять проявления базовых физических свойств с точки зрения структурных особенностей материалов. <b>Знать:</b> принципы строения конденсированных систем; понимать природу и особенности межатомных связей в кристаллических и аморфных твердых телах, особенности упругих, тепловых, электрических и магнитных свойств анизотропных материалов.</p>
<p><b>ПК-1</b> способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</p>	<p><b>Владеть:</b> способностью использовать специализированные знания в области физики конденсированного состояния вещества для более глубокого изучения специальных разделов физики конденсированных сред. <b>Уметь:</b> уметь решать основные физические задачи в области физики конденсированных сред, оценивать границы применимости теории, ясно излагать и аргументировать собственную точку зрения. <b>Знать:</b> особенности упругих, тепловых, электрических и магнитных свойств анизотропных материалов и их связь со структурой материалов.</p>

**6. Форма промежуточной аттестации экзамен (4 семестр)**

**7. Язык преподавания русский**

**II. Содержание дисциплины, структурированное по темам с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)		Самостоятельная работа (час.)
		Лекции	Практические занятия	
<b>Классификация типов связей в кристаллах. Энергия связи.</b>				
Атомные и ионные радиусы. Координационное число и координационный многогранник. Стехиометрическая формула вещества.	10	1	2	7
Классификация типов связей в кристаллах. Ионные кристаллы. Кристаллы с ковалентной связью. Металлические кристаллы. Молекулярные кристаллы. Кристаллы с водородными связями. Энергия связи. Энергия решетки ионных кристаллов. Формула Борна-Ланде. Вычисление постоянной Маделунга. Вычисление постоянной, характеризующей потенциал сил отталкивания. Формула Борна-Майера.	13	1	3	9
Классификация кристаллов на металлы и диэлектрики по пространственному распределению валентных электронов. Простейшая модель ионного кристалла. Ионные кристаллы химических соединений $A_1B_{VII}$ ; $A_{II}B_{VI}$ ; $A_{III}B_V$ . Отличительные особенности моделей ковалентных, молекулярных и металлических кристаллов. Наличие непрерывного перехода от одного класса кристаллов к другому в соответствии с периодической таблицей элементов Менделеева.	11	1	3	7
Пределы устойчивости структур. Плотнейшие упаковки частиц в структурах. Построение структур с помощью координационных многогранников (полиэдров).	13	1	2	10
Полиптипия. Изоморфизм. Фазовые переходы. Полиморфизм.	12		2	10

<b>Упругие свойства кристаллов.</b> Напряжения и деформации в изотропном твердом теле. Упругие деформации и напряжения в кристаллах. Закон Гука для анизотропных твердых тел. Модули упругости и упругие постоянные. Упругие волны в кристаллах. Колебания решетки. Фононы. Колебания цепочки одинаковых атомов. I-зона Бриллюэна. Колебания линейной цепочки, состоящей из двух различных атомов. Акустическая и оптическая ветви колебаний. Колебания атомов трехмерной решетки. Инфракрасное поглощение.	16  12 1 8 10	2  1  1 1	2  2 1 1	12  9  6 9
<b>Тепловые свойства твердых тел.</b> Классическая теория теплоемкости твердых тел. Квантовая теория теплоемкости твердых тел по Эйнштейну. Теория теплоемкости Дебая. Дополнение к теории теплоемкости Дебая. Решеточная и электронная теплоемкости. Тепловое расширение твердых тел. Теплопроводность твердых тел. Теплопроводность диэлектриков. Теплопроводность металлов. Диффузия в твердых телах. Уравнение состояния твердых тел. <b>Магнитные свойства твердых тел.</b> Классификация магнетиков по основным свойствам. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Природа диа-, пара- и ферромагнетизма. Процессы намагничивания. Гистерезис.	10  10  10 9 2 12	1  1  1  1 1	2  2  2 1 1 1	7  7  7 8  10
<b>Физика реальных кристаллов.</b> Атомные нарушения структуры кристалла. Классификация дефектов структуры. Основные типы точечных дефектов. Тепловые точечные дефекты по Френкелю и по Шоттки. Равновесная концентрация точечных дефектов. Тепловые дефекты в бинарных кристаллах. Центры окраски. Радиационные дефекты. Дислокации. Линия дислокаций. Контур и вектор Бюргерса. Правило Франка. Напряжения, необходимые для образования дислокаций в совершенном кристалле. Скальвающее	13  11	1  1	2  3	10  7

<p>напряжение Движение дислокаций. Напряжения, связанные с дислокациями. Энергия дислокаций. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. Дефекты упаковки и частичные дислокации. Границы зерен. Методы наблюдений дислокаций.</p> <p>Пластические свойства кристаллических твердых тел. Пластическая деформация путем скольжения и механического двойникового. Закон постоянства критического скалывающего напряжения (закон Шмидта). Хрупкое разрушение. Спайность и твердость.</p>	11		2	9
<p><b>Конденсированные системы.</b></p> <p>Общая характеристика. Пять типов конденсированных систем: жидкости, стекла, аморфы, кристаллы и жидкие кристаллы. Текучесть твердых тел и хрупкость жидкостей. Основные способы получения конденсированных систем Кристаллизация. Термодинамика фазового перехода I рода. Термодинамика образования зародыша кристаллизации. Влияние стенок и примесей. Флуктуационное образование зародышей. Кинетика процесса кристаллизации.</p> <p>Стеклование (твердение расплава). Определение понятия “стекло”. Метастабильность стекол. Спиновые стекла. Аморфизация. Особенности свойств аморфов. Неравновесность аморфов.</p> <p>Жидкие кристаллы. Характерные свойства. Нематики. Сметтики. Холестерики. Многообразие фазовых переходов вещества.</p>	9	1	2	6
	5	1	1	3
	8	1	1	6
<b>ИТОГО</b>	<b>216</b>	<b>19</b>	<b>38</b>	<b>159</b>

### **III. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

- планы практических занятий и методические рекомендации к ним;
- методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов;
- сборники заданий для самоконтроля.

#### **IV. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине**

Наряду с другими дисциплинами учебного плана дисциплина «Физика полупроводников» участвует в формировании общепрофессиональной компетенции ОПК-1 «Способность использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук» и профессиональной компетенции ПК-1 «Способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин»

##### ***Экзамен***

Студенты, освоившие программу курса «Введение в физику конденсированных сред» могут получить экзаменационную оценку «удовлетворительно» или «хорошо» по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно Положению о рейтинговой системе обучения и оценки качества учебной работы студентов ТвГУ (протокол №4 от 25 октября 2017 г.). Оценку «отлично» студент может получить только при сдаче экзамена.

На полусеместровой аттестации используется опросный лист для проверки категорий знать и уметь (1 вопрос и 1 задача). На семестровой аттестации – опросный лист для проверки категорий знать и владеть (1 вопрос и 1 задача).

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно Положения о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ (протокол №4 от 25 октября 2017 г.).

При сдаче экзамена используются билеты для проверки категорий знать, уметь и владеть (2 вопроса и 2 задачи).

##### ***Пример опросного листа для полусеместровой аттестации:***

1. Понятие о классах и точечных группах симметрии кристаллических многогранников. 32 класса симметрии.
2. Найти матрицу преобразования системы координат осью симметрии второго порядка, лежащей в координатной плоскости  $X_1X_2$  и располагающейся под произвольным углом  $\varphi$  к оси  $X_2$ .

##### ***Пример билета для окончательной аттестации:***

1. Обозначения классов симметрии (по формуле симметрии и международной символике). Распределение кристаллов по классам симметрии.

2. Физический смысл обратной решетки. Формула Вульфа – Брэгга. Условия Лауэ. Зоны Бриллюэна.
3. Записать матрицу преобразования системы координат плоскостью симметрии, проходящей через ось  $X_3$  и располагающейся под произвольным углом  $\varphi$  к оси  $X_1$ .
4. Определить симметрию кристалла, подвергнутого одноосному механическому растяжению в направлениях: а)  $[100]$ , б)  $[111]$ , в)  $[110]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkk]$ , е)  $[hkl]$ , если симметрия кристалла в ненапряженном состоянии 23.

Шкала оценивания: Максимальная возможная оценка за заполнение опросного листа (билета) промежуточной аттестации составляет 20 баллов. Она складывается из оценки уровня знаний (максимум 10 баллов), умений (максимум 10 баллов).

Максимальная возможная оценка за заполнение билета заключительной аттестации составляет 40 баллов. Она складывается из оценки уровня знаний (максимум 20 баллов) и владений (максимум 20 баллов).

**1. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности общепрофессиональной компетенции ОПК-1:** «Способность использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук»

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
Начальный владеть	Продемонстрировать навыки владения материалом по методам характеристики структуры и свойств. <i>Пример.</i> Описать закон постоянства углов и гониометрические методы исследования кристаллов.	1 уровень – сформулирован закон постоянства углов (1 балл). 2 уровень – детально описывает закон постоянства углов и гониометрические методы исследования кристаллов (2 балла).

<p><b>Начальный уметь</b></p>	<p>Продemonстрировать умение решать типичные примеры по методам характеристики структуры и свойств.</p> <p><i>Пример.</i> Для исследования физических свойств сфалерита приготовили две ориентированные пластинки. Одна из них вырезана перпендикулярно направлению [100], вторая – перпендикулярно [111]. Какой из этих пластинок следует воспользоваться для обнаружения пьезоэлектрического эффекта при действии одноосного сжатия перпендикулярно к их рабочим граням?</p>	<p>1 уровень – рассмотрено только изменение симметрии в результате одноосного сжатия (1 балл).</p> <p>2 уровень – дается правильное решение и получен верный ответ (2 балла).</p>
<p><b>Начальный знать</b></p>	<p>Продemonстрировать знания по методам характеристики структуры и свойств.</p> <p><i>Пример.</i> Кристалл поворачивают на <math>90^\circ</math> с последующим отражением в центре инверсии, затем поворачивают на <math>180^\circ</math> вокруг направления, перпендикулярного оси первого поворота. Найти матричное представление операции симметрии, которая приводит к тому же результату.</p>	<p>1 уровень – записывает представление операций симметрии в общем виде (1 балл).</p> <p>2 уровень – полностью определяет матричное представление операции симметрии (2 балла).</p>
<p><b>Промежуточный владеть</b></p>	<p>Продemonстрировать навыки владения материалом по определению симметричных преобразований.</p>	<p>1 уровень – названы симметричные преобразования кристаллических многогранников (1 балл).</p>

	<p><u>Пример.</u> Описать правила отыскания элементов симметрии в кристаллических многогранниках.</p>	<p>2 уровень – сформулированы часть правил отыскания элементов симметрии в кристаллических многогранниках (2 балла).</p> <p>3 уровень – полностью описаны правила отыскания элементов симметрии в кристаллических многогранниках (3 балла).</p>
<p>Промежуточный уметь</p>	<p>Продемонстрировать умение решать типичные примеры по определению симметричных преобразований.</p> <p><u>Пример.</u> Кристалл с симметрией <math>m\bar{2}</math> поместили в электрическое поле таким образом, что направление поля совпало с направлением <math>[001]</math>, затем с направлением <math>[010]</math>. Найти симметрию кристалла в поле в том и другом случаях.</p>	<p>1 уровень – рассмотрена симметрия электрического поля (1 балл).</p> <p>2 уровень – правильно использован подход для определения изменения симметрии, в ходе решения допущены некоторые ошибки, ответ получен неверный (2 балла).</p> <p>3 уровень – дается верный ход решения и получен правильный ответ (3 балла).</p>
<p>Промежуточный знать</p>	<p>Продемонстрировать знания по определению симметричных преобразований.</p> <p><u>Пример.</u> Используя матричное представление элементов симметрии, найти такую операцию симметрии, действие которой давало бы тот же результат, что и действие двух осей второго порядка, пересекающихся под углом <math>90^\circ</math>.</p>	<p>1 уровень – записано матричное представление операций симметрии в общем виде (1 балл).</p> <p>2 уровень – записана матричное представление действия одной оси 2-ого порядка (2 балла).</p> <p>3 уровень – правильно найдено матричное представление для операции симметрии, действие которой дает тот же результат, что и действие двух осей</p>

		второго порядка, пересекающихся под углом $90^\circ$ (3 балла)
--	--	--

**Список вопросов и заданий для проверки уровня сформированности общепрофессиональной компетенции ОПК-1:** «Способность использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук»

Для оценивания результатов обучения в виде владений предлагается рассмотреть следующие темы:

1. Структура кристалла и пространственная решетка.
2. Закон постоянства углов. Гониометрические методы исследования кристаллов.
3. Метод кристаллографического индицирования. Символы узлов. Символы рядов (рядов). Символы плоскостей (граней).
4. Параметры Вейсса и индексы Миллера.
5. Закон целых чисел Гаюи.
6. Кристаллографические проекции: сферическая, стереографическая, гномо-стереографическая, гномоническая.
7. Соотношения между сферической, стереографической, гномостереографической, гномонической проекциями. Сетка Вульфа.
8. Понятие симметрии и симметричного многогранника. Элементы симметрии кристаллических многогранников.
9. Операции и элементы симметрии первого рода: плоскость, оси и центр симметрии. Невозможность существования осей 5-ого порядка и больше 6-ого.
10. Операции и элементы симметрии 2-ого рода: инверсионные и зеркально-поворотные оси симметрии.
11. Правила отыскания элементов симметрии в кристаллических многогранниках. Принцип суперпозиции Кюри.
12. Сочетание операций симметрии. Теоремы о сочетании операций симметрии в кристаллических многогранниках.
13. Понятие о классах и точечных группах симметрии кристаллических многогранников. 32 класса симметрии.
14. Обозначения классов симметрии (по формуле симметрии и международной символике). Распределение кристаллов по классам симметрии.

Для оценивания результатов обучения в виде умений предлагается продемонстрировать следующие навыки решения типичных примеров:

1. Для исследования физических свойств сфалерита приготовили две ориентированные пластинки. Одна из них вырезана перпендикулярно направлению  $[100]$ , вторая – перпендикулярно  $[111]$ . Какой из этих пластинок следует воспользоваться для обнаружения пьезоэлектрического эффекта при действии одноосного сжатия перпендикулярно к их рабочим граням?

2. Кристалл кварца растянули: а) вдоль направления  $[0001]$ , б) вдоль направления  $[10\bar{1}0]$ . В каком из указанных случаев в кристалле может наблюдаться изменение поляризации при нагревании?

3. К кристаллу KDP (дигидрофосфат калия) прикладывают электрическое поле вдоль направлений: а)  $[001]$ ; б)  $[110]$ ; в)  $[010]$ . Найти симметрию кристалла, находящегося в поле, для каждого из указанных направлений электрического поля.

4. Возможно ли приложением одноосного механического напряжения в направлении  $[110]$  превратить кристалл с исходной симметрией  $432$  в кристалл с полярной группой симметрии? Можно ли такое превращение осуществить наложением электрического поля вдоль этого же направления?

5. Определить все возможные изменения в точечной группе симметрии сегнетоэлектрического кристалла, принадлежащего к классу  $222$ , если в кристалле совершается сегнетоэлектрический переход. Рассмотреть следующие направления, вдоль которых предположительно может располагаться вектор спонтанной поляризации: а)  $[100]$ , б)  $[010]$ , в)  $[001]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkl]$ .

6. Кристалл с симметрией  $mm2$  поместили в электрическое поле таким образом, что направление поля совпало с направлением  $[001]$ , затем с направлением  $[010]$ . Найти симметрию кристалла в поле в том и другом случаях.

7. Вдоль каких кристаллографических направлений одноосное растяжение не приводит к изменению симметрии кристаллов средней категории?

8. В каких классах симметрии и вдоль каких направлений наложение электрического поля не вызывает изменения симметрии кристаллов?

9. Вдоль каких кристаллографических направлений нужно растянуть гексагональный кристалл с симметрией  $6/mmm$ , чтобы его симметрия понизилась: а) до ромбической, б) до моноклинной?

10. К кристаллу с симметрией  $\bar{6}$  приложили электрическое поле вдоль направлений: а)  $[0001]$ , б)  $[10\bar{1}0]$ . Определить симметрию кристалла в поле.

11. Найти кристаллографические направления, по которым следует приложить электрическое поле к кристаллу с симметрией  $[\bar{6}m2]$ , чтобы его симметрия понизилась: а) до тригональной  $3m$ , б) до ромбической  $mm2$ , в) до моноклинной  $m$ .

12. Определить симметрию кристалла в поле одноосного механического напряжения, приложенного вдоль кристаллографических направлений: а)  $[100]$ , б)  $[110]$ , в)  $[111]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkl]$ , если его симметрия в ненапряженном состоянии  $432$ .

13. Кристаллы какой симметрии обнаруживают пьезоэлектрический эффект при всестороннем сжатии?

14. К кристаллу с симметрией  $23$  приложено электрическое поле вдоль направлений: а)  $[100]$ , б)  $[111]$ , в)  $[110]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkk]$ , е)  $[hkl]$ . Найти симметрию кристалла в поле для каждого из указанных способов наложения поля.

15. Для каких классов симметрии средней категории приложение электрического поля в направлении оси высшего порядка приводит к изменению симметрии оптической индикатрисы?

16. Вдоль каких кристаллографических направлений нужно приложить электрическое поле к кристаллу с симметрией  $622$ , чтобы симметрия кристалла понизилась до моноклинной? Перечислить все кристаллографические направления, наложение поля  $E$  вдоль которых приводит к тому же результату.

17. К кристаллу с симметрией  $432$  приложили электрическое поле вдоль кристаллографических направлений: а)  $[100]$ , б)  $[111]$ , в)  $[110]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkk]$ , е)  $[hkl]$ . Определить симметрию кристалла в поле.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний предлагается выполнить следующие задания:

1. Записать матрицу преобразования системы координат плоскостью симметрии, проходящей через ось  $X_3$  и располагающейся под произвольным углом  $\varphi$  к оси  $X_1$ .

2. Найти матрицу преобразования системы координат осью симметрии второго порядка, лежащей в координатной плоскости  $X_1X_2$  и располагающейся под произвольным углом  $\varphi$  к оси  $X_2$ .

3. Кристалл поворачивают на  $90^\circ$  с последующим отражением в центре инверсии, затем поворачивают на  $180^\circ$  вокруг направления, перпендикулярного оси первого поворота. Найти матричное представление операции симметрии, которая приводит к тому же результату.

4. Кристалл поворачивают на  $120^\circ$  против часовой стрелки, затем отражают в центре инверсии. Найти матричное представление операции симметрии, которая приводит к тому же результату. В группу какого элемента симметрии входит эта операция?
5. Используя матричное представление элементов симметрии, найти такую операцию симметрии, действие которой давало бы тот же результат, что и действие двух осей второго порядка, пересекающихся под углом  $90^\circ$ .
6. Найти матричное представление операции симметрии, действие которой дает тот же результат, что и действие осей второго порядка, расположенных под углом  $60^\circ$  друг к другу. В группу какого элемента симметрии входит эта операция?
7. Найти матричное представление и порядок точечной группы симметрии дигидрофосфата калия (KDP) для стандартного и нестандартного ( $\bar{4}m2$ ) выбора кристаллофизических осей координат.
8. Найти матричное представление точечной группы симметрии  $622$ .
9. Найти матричное представление и порядок группы  $\bar{6}$ .
10. Найти матричное представление группы  $2/m$  в установках  $2\parallel X_2$  и  $2\parallel X_3$ .
11. Пользуясь матричным представлением операции симметрии, проверить справедливость теоремы Эйлера на примере точечной группы  $222$ .
12. Используя матричное представление операции симметрии, проверить справедливость теоремы: сочетание оси четного порядка и перпендикулярной ей плоскости симметрии дает центр симметрии.
13. Убедиться в справедливости теоремы Эйлера на примере осей второго порядка, располагающихся под углом  $45^\circ$  друг к другу.

**2. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-1: «Способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин»**

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
Начальный владеть	Продемонстрировать навыки владения материалом по симметрии структуры кристаллов.	1 уровень – названы элементы симметрии структуры кристаллов (1 балл). 2 уровень – рассмотрено

	<i>Пример.</i> Описать элементы симметрии структуры кристаллов	действие элементов симметрии структуры кристаллов (2 балла).
Начальный <b>уметь</b>	Продемонстрировать умение решать типичные примеры по симметрии структуры кристаллов. <i>Пример.</i> Вдоль каких кристаллографических направлений нужно растянуть гексагональный кристалл с симметрией $6/mmm$ , чтобы его симметрия понизилась: а) до ромбической, б) до моноклинной?	1 уровень – детально описана симметрия кристалла, нет решения (1 балл). 2 уровень – дается правильное решение и получен верный ответ (2 балла).
Начальный <b>знать</b>	Продемонстрировать знания по симметрии структуры кристаллов. <i>Пример.</i> Используя матричное представление операции симметрии, проверить справедливость теоремы: сочетание оси четного порядка и перпендикулярной ей плоскости симметрии дает центр симметрии.	1 уровень – записаны матричные представления операций симметрии (1 балл). 2 уровень – полностью доказана теорема на основе матричных представлений операций симметрии (2 балла).
Заключительный <b>владеть</b>	Продемонстрировать навыки владения материалом по принципам симметрии в физике конденсированного состояния. <i>Пример.</i> Рассмотреть принцип симметрии в кристаллофизике и принцип Неймана.	1 уровень – сформулирован принцип симметрии в кристаллофизике (1 балл). 2 уровень – сформулированы принципы симметрии в кристаллофизике и Неймана (3 балла). 3 уровень – полностью описаны принцип симметрии в кристаллофизике и принцип Неймана, приведены примеры (5 балла).
Заключительный <b>уметь</b>	Продемонстрировать умение решать типичные примеры по принципам	1 уровень – представлены операции симметрии, входящие в группы $3m$ и $m\bar{3}$

	<p>симметрии в физике конденсированного состояния.</p> <p><u>Пример.</u> Какую симметрию приобретает кристалл под действием одноосного механического растяжения по направлениям а) <math>[100]</math>, б) <math>[111]</math>, в) <math>[110]</math>, г) <math>[hk0]</math>, д) <math>[hkk]</math>, е) <math>[hkl]</math>, если его симметрия в ненапряженном состоянии <math>m\bar{3}</math>? Рассмотреть случай действия одноосного растяжения на кристалл с симметрией <math>3m</math> вдоль направлений а) <math>[1010]</math>, б) <math>[1120]</math>.</p>	<p>(1 балл).</p> <p>2 уровень – правильно рассмотрено изменение симметрии для одного класса (3 балла).</p> <p>3 уровень – дается верный ход решения и получен правильный ответ (5 балла).</p>
<p><b>Заключительный знать</b></p>	<p>Продемонстрировать знания по принципам симметрии в физике конденсированного состояния.</p> <p><u>Пример.</u> Перечислить циклические кристаллографические группы четвертого порядка.</p>	<p>1 уровень – названа одна из циклических групп (1 балл).</p> <p>2 уровень – названа одна из циклических групп четвертого порядка и рассмотрены все операции симметрии в нее входящие (3 балла).</p> <p>3 уровень – правильно перечислены и описаны кристаллографические группы четвертого порядка (5 балла)</p>

**Список вопросов и заданий для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-1: «Способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин»**

Для оценивания результатов обучения в виде владений предлагается рассмотреть следующие темы:

1. Матричные представления преобразований симметрии.
2. Кристаллографические категории, сингонии и системы координат. Правила записи символов класса кристаллов.
3. Вывод и описание 32 классов симметрии (примитивные, центральные, планальные и аксиальные классы).

4. Вывод и описание 32 классов симметрии (инверсионно-примитивные, планаксиальные, инверсионно-планальные классы и классы симметрии кристаллов высшей категории).
5. Классификация кристаллов по наличию и отсутствию центра симметрии. Энантиоморфизм. Лауэвские классы симметрии.
6. Предельные группы симметрии.
7. Решетки Бравэ. Примитивная ячейка Вигнера-Зейтца.
8. Элементы симметрии структуры кристаллов.
9. Пространственные группы симметрии. Теоремы о сочетании операций симметрии структур.
10. Правильные системы точек. Правила записи символов пространственных групп в различных сингониях. Распределение кристаллов по 230 пространственным группам симметрии.
11. Принцип симметрии в кристаллофизике. Принцип Неймана.
12. Понятие обратной решетки.
13. Основные расчетные формулы кристаллографии.
14. Физический смысл обратной решетки. Формула Вульфа – Брэгга. Условия Лауэ. Зоны Бриллюэна.

Для оценивания результатов обучения в виде умений предлагается продемонстрировать следующие навыки решения типичных примеров:

1. Определить симметрию монокристалла сфалерита при наложении электрического поля вдоль направлений а)  $[100]$ , б)  $[111]$ , в)  $[110]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkk]$ , е)  $[hkl]$ .
2. Пластика из ниобата лития помещена в электрическое поле таким образом, что направление вектора напряженности поля  $\mathbf{E}$  совпало а) с кристаллографическим направлением  $[1010]$ , б) с направлением  $[1120]$ . Найти симметрию кристалла в поле. Перечислить ряд кристаллографических направлений, вдоль которых при наложении поля  $\mathbf{E}$  результат будет одинаковым для обоих случаев.
3. Определить симметрию кристалла, подвергнутого одноосному механическому растяжению в направлениях: а)  $[100]$ , б)  $[111]$ , в)  $[110]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkk]$ , е)  $[hkl]$ , если симметрия кристалла в ненапряженном состоянии 23.
4. Найти все возможные изменения в точечной группе симметрии сегнетоэлектрического кристалла, принадлежащего к классу  $2/m$ , если в кристалле совершается сегнетоэлектрический фазовый переход. Рассмотреть следующие кристаллографические направления, по которым

предположительно может располагаться вектор спонтанной поляризации: а)  $[100]$ , б)  $[010]$ , в)  $[001]$ , г)  $[hk0]$ .

5. Определить симметрию монокристалла титаната бария, в котором совершается сегнетоэлектрический фазовый переход, если вектор спонтанной поляризации располагается: а) вдоль направления  $[100]$ , б) вдоль направления  $[111]$ .

6. Какую симметрию приобретает кристалл под действием одноосного механического растяжения по направлениям а)  $[100]$ , б)  $[111]$ , в)  $[110]$ , г)  $[hk0]$ , д)  $[hkk]$ , е)  $[hkl]$ , если его симметрия в ненапряженном состоянии  $m\bar{3}$ ? Рассмотреть случай действия одноосного растяжения на кристалл с симметрией  $3m$  вдоль направлений а)  $[1010]$ , б)  $[1120]$ .

7. Симметрия граней кристаллов укладывается в следующие десять классов: 1, 2, 3, 4, 6,  $m$ ,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ . При измерении микротвердости кристалла ставится отпечаток четырехгранной алмазной пирамиды на его грани. При этом симметрия 4гага накладывается на симметрию грани. Пользуясь принципом Кюри, определить симметрию, которую может приобретать отпечаток при вдавливании алмазной пирамиды в случае различных по симметрии граней.

8. Какую симметрию приобретает однородная непрерывная изотропная среда (например, расплав): а) в электрическом поле, б) в магнитном поле?

9. Можно ли использовать пластинки ADP, ориентированные по плоскостям  $(100)$ ,  $(110)$  и  $(001)$ , для получения поляризации в направлении приложенного перпендикулярно их рабочим граням одноосного механического напряжения?

10. Возможна ли монодоменизация сегнетоэлектрика посредством приложения механического напряжения? Каким по характеру (одноосное растяжение, чистый сдвиг, всестороннее сжатие) должно быть напряжение? Играет ли роль ориентировка приложенного напряжения относительно направления спонтанной поляризации?

11. Как с точки зрения принципа Кюри объяснить сохранение макроскопической симметрии сегнетоэлектрического кристалла, соответствующей точечной группе его параэлектрической фазы при охлаждении его ниже температуры Кюри? Указание. Под макросимметрией сегнетоэлектрического кристалла подразумевается симметрия его доменной упаковки.

12. Как с использованием симметричных закономерностей объяснить обязательную поляризацию диэлектрических кристаллов во внешнем электрическом поле независимо от их симметрии?

13. Изменяется ли макроскопическая симметрия кристалла  $\text{BaTiO}_3$  при фазовых переходах от тетрагональной к тригональной и ромбической сегнетоэлектрической модификациям?

14. Можно ли изменить оптическую индикатрису кристалла, помещая его в магнитное поле?

15. К кристаллу с симметрией  $\bar{3}m$  приложили магнитное поле в направлениях: а)  $[0001]$ , б)  $[1010]$ . Определить симметрию кристалла в магнитном поле.

16. Определить симметрию кристалла в магнитном поле, приложенном в направлениях: а)  $[0001]$ , б)  $[1010]$ , если кристалл принадлежит к точечной группе  $\bar{6}$ .

Для оценивания результатов обучения в виде знаний предлагается выполнить следующие задания:

1. Каков порядок следующих групп симметрии:  $mmm$ ,  $222$ ,  $4mm$ ,  $422$ ?
2. Записать систему генераторов для группы  $4/mmm$ .
3. На примере точечной группы симметрии  $2/m$  проверить, выполняются ли все групповые аксиомы.
4. Перечислить циклические кристаллографические группы четвертого порядка.
5. Какими матрицами описываются инверсионные повороты вокруг оси  $X_3$  на  $90^\circ$ ? на  $120^\circ$ ?
6. Каков порядок циклических групп  $3$  и  $\bar{3}$ ?
7. Какие матрицы отвечают оси симметрии третьего порядка, равнонаклонной к осям  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ?
8. Пользуясь матричным представлением операций симметрии, доказать эквивалентность поворота на  $180^\circ$  с последующей инверсией и отражения в плоскости, перпендикулярной оси поворота.
9. Записать матричное представление операции отражения в координатной и диагональной плоскости симметрии в кристаллах класса  $4mm$ .
10. Перечислить циклические группы второго порядка.
11. Записать матричное представление операции симметрии  $3^1$  и обратной ей.
12. Какая матрица отвечает плоскости симметрии, проходящей через биссектрису внутреннего угла между координатными плоскостями  $X_1O X_3$  и  $X_2O X_3$ ?

## **V. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

### ***а) Основная литература:***

1. Матухин В.Л. Физика твердого тела [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Л. Матухин, В.Л. Ермаков. — Электрон. дан. — СПб.: Лань, 2010. — 224 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/262>.
2. Владимиров, Г.Г. Физика поверхности твердых тел [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — СПб.: Лань, 2016. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71707>.

### ***б) Дополнительная литература:***

1. Епифанов Г. И. Физика твердого тела [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 288 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2023>.

## **VI. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

Электронные библиотечные системы:

1. ЭБС «ИНФРА-М» <http://www.znaniium.com>
2. ЭБС «Университетская библиотека ОН-ЛАЙН» <http://www.biblioclub.ru>
3. ЭБС «ЛАНЬ» <http://e.lanbook.com>

## **VII. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

### ***1) Планы практических занятий и методические рекомендации к ним.***

*Практические занятия включают в себя экспериментальное или теоретическое исследование свойств и процессов в полупроводниковых материалах и структурах на их основе, а также его обсуждение в группе.*

### ***Тема 1. Классификация типов связей в кристаллах. Энергия связи.***

#### **Вопросы для обсуждения:**

1. Координационное число и координационный многогранник.
2. Классификация типов связей в кристаллах.

3. Пределы устойчивости структур. Построение структур с помощью координационных многогранников (полиэдров).
4. Политипия. Изоморфизм. Фазовые переходы. Полиморфизм.

### ***Тема 2. Упругие свойства кристаллов.***

#### **Вопросы для обсуждения:**

1. Упругие деформации и напряжения в кристаллах. Закон Гука. Модули упругости и упругие постоянные.
2. Упругие волны в кристаллах. Колебания решетки. Фононы. Колебания цепочки одинаковых атомов. I-зона Бриллюэна
3. Колебания атомов трехмерной решетки. Инфракрасное поглощение.

### ***Тема 3. Магнитные свойства твердых тел.***

#### **Вопросы для обсуждения:**

1. Классификация магнетиков по основным свойствам. Диамагнетизм. Парамагнетизм.
2. Ферромагнетизм. Процессы намагничивания. Гистерезис.

### ***Тема 4. Физика реальных кристаллов.***

#### **Вопросы для обсуждения:**

1. Атомные нарушения структуры кристалла.
2. Дислокации. Линия дислокаций. Контур и вектор Бюргерса. Правило Франка.
3. Пластические свойства кристаллических твердых тел. Пластическая деформация путем скольжения и механического двойникования.

### ***Тема 5. Конденсированные системы.***

#### **Вопросы для обсуждения:**

1. Типы конденсированных систем: жидкости, стекла, аморфы, кристаллы и жидкие кристаллы.
2. Стеклование (твердение расплава). Определение понятия «стекло». Метастабильность стекол.
3. Жидкие кристаллы. Характерные свойства.

### ***2) Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов:***

Самостоятельная работа студентов предполагает:

–обязательное выполнение домашних заданий, предусмотренных лекционными и практическими занятиями;

–углубленное изучение литературы и решение задач по пройденным темам и по вопросам, дополнительно указанным преподавателем;

–использование материалов рабочей программы для систематизации знаний и подготовке к занятиям и контрольным работам.

#### Перечень вопросов для систематизации знаний:

1. Атомные и ионные радиусы. Координационное число и координационный многогранник. Стехиометрическая формула вещества.
2. Классификация типов связей в кристаллах. Энергия связи. Ионные кристаллы.
3. Энергия решетки ионных кристаллов. Формула Борна-Ланде.
4. Вычисление постоянной Маделунга.
5. Вычисление постоянной “ $n$ ”, характеризующей потенциал сил отталкивания.
6. Формула Борна-Майера для расчета энергии связи ионного кристалла.
7. Классификация типов связей в кристаллах. Кристаллы с ковалентной связью.
8. Классификация типов связей в кристаллах. Металлические, молекулярные кристаллы и кристаллы с водородными связями.
9. Классификация твердых тел на металлы и диэлектрики по пространственному распределению валентных электронов. Простейшая модель ионного кристалла. Ионные кристаллы химических соединений  $A_1B_{VII}$ ,  $A_{II}B_{VI}$ ,  $A_{III}B_V$ . Модель ковалентных молекулярных, металлических кристаллов. Непрерывный переход от одного класса кристаллов к другому в соответствии с периодической таблицей элементов Менделеева.
10. Напряжения и деформации в изотропном твердом теле.
11. Упругие деформации и напряжения в кристаллах
12. Закон Гука для анизотропных твердых тел. Модули упругости и упругие постоянные.
13. Упругие волны в кристаллах.
14. Колебания решетки. Фононы. Колебания цепочки одинаковых атомов. I - ая зона Брюллюэна.
15. Колебания линейной цепочки, состоящей из двух различных атомов. Акустические и оптические ветви колебаний
16. Инфракрасное поглощение.
17. Колебания атомов трехмерной решетки.
18. Классическая теория теплоемкости твердых тел
19. Квантовая теория теплоемкости твердых тел по Энштейну.

20. Теория теплоемкости Дебая.
21. Дополнение к теории теплоемкости Дебая. Решеточная и электронная теплоемкости.
22. Тепловое расширения твердых тел.
23. Теплопроводность твердых тел. Теплопроводность диэлектриков.
24. Теплопроводность твердых тел. Теплопроводность металлов.
25. Атомные нарушения структуры кристалла. Классификация дефектов структуры. Основные виды точечных дефектов.
26. Тепловые точечные дефекты. Дефекты по Френкелю и по Шоттки.
27. Равновесная концентрация точечных дефектов.
28. Тепловые дефекты в бинарных кристаллах. Центры окраски.
29. Радиационные дефекты.
30. Дислокации. Линия дислокации. Краевые и винтовые дислокации.
31. Контур и вектор Бюргерса. Правило Франка.
32. Напряжения, необходимые для образования дислокации в совершенном кристалле. Скалывающее напряжение.
33. Движение дислокаций.
34. Напряжения, связанные с дислокациями. Энергия дислокации. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами.
35. Дефекты упаковки и частичные дислокации. Границы зерен.
36. Методы наблюдения дислокаций.
37. Пределы устойчивости структур. Плотнейшие упаковки частиц в структурах. Построение структур с помощью координационных многогранников.
38. Равновесная концентрация точечных дефектов.

### **3) Требования к рейтинг-контролю**

Результаты промежуточной аттестации выставляются на основе текущего контроля успеваемости (рейтинг-контроль, баллы за выполненные практические задания суммируются) и по результатам зачета.

#### ***Рейтинг***

1. Первая контрольная точка. Содержание модуля 1: Раздел 1 – 3.

30 баллов, из них 10 – текущая работа, 10 – посещаемость, 10 – контрольная работа. 9-ая неделя.

2. Вторая контрольная точка. Содержание модуля 2: Раздел 4 – 6.

30 баллов, из них 10 – текущая работа, 10 – посещаемость, 10 – контрольная работа. 18-ая неделя

Критерии: работа на каждом практическом занятии – по 5 баллов (текущая работа), правильный ответ на один вопрос контрольной работы – 2 балла.

Программой предусматривается выполнение письменных контрольных работ и отчеты о выполнении студентами заданий на практических занятиях в качестве форм рубежного контроля в конце каждого модуля. Для подготовки к рубежному контролю предполагается выполнение домашних заданий по каждой пройденной в течение модуля теме и использование банка контрольных вопросов и заданий рабочей программы.

**VIII. Перечень педагогических и информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (по необходимости)**

При изучении дисциплины с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся применяются различные виды аудиторной работы (лекции, практические занятия, индивидуальное и групповое консультирование) в сочетании с внеаудиторной самостоятельной работой. При подготовке к занятиям, студенты могут использовать доступные электронные библиотечные системы и ресурсы Интернет. На занятиях используются мультимедийные средства демонстрации презентаций.

**IX. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Наименование специальных* помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Учебная аудитория № 202Б (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35))	1. Комплект учебной мебели на 25 посадочных мест. 2. Экран настенный 153x203 3. Переносной комплект мультимедийной техники.	Adobe Acrobat Reader DC – бесплатно Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Google Chrome – бесплатно MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017

## Помещения для самостоятельной работы:

Наименование помещений	Оснащенность помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
<p>Помещение для самостоятельной работы, учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, практики, Компьютерный класс физико-технического факультета. Компьютерная лаборатория робототехнических систем №4а (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<p>1. Компьютер RAMEC STORM C2D 4600/160Gb/ 256mB/DVD-RW +Монитор LG TFT 17" L1753S-SF – 12 шт                  2. Мультимедийный комплект учебного класса (вариант № 2) Проектор Casio XJ-M140, настенный проекц. экран Lumien 180*180. ноутбук Dell N4050. сумка 15,6", мышь                  3. Коммутатор D-Link 10/100/1000mbps 16-portr DGS-1016D                  4. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО                  5. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО                  6. Демонстрационное оборудование комплект «LegoMidstormsEV3»                  7. Комплект учебной мебели</p>	<p>Adobe Acrobat Reader DC - бесплатно                  Cadence SPB/OrCAD 16.6 - Государственный контракт на поставку лицензионных программных продуктов 103 - ГК/09 от 15.06.2009                  Google Chrome - бесплатно                  Java SE Development Kit 8 Update 45 (64-bit) - бесплатно                  Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г.                  Lazarus 1.4.0 - бесплатно                  Lego MINDSTORM EV3 - бесплатно                  Mathcad 15 M010 - Акт предоставления прав IC00000027 от 16.09.2011                  MATLAB R2012b - Акт предоставления прав № Us000311 от 25.09.2012                  Microsoft Express Studio 4 - бесплатно                  MiKTeX 2.9 - бесплатно                  MPICH 64-bit – бесплатно                  MSXML 4.0 SP2 Parser and SDK - бесплатно                  Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017                  MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017</p>

## Х. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Дата и протокол заседания кафедры, утвердившего изменения
1.	Раздел IV	Реквизиты «Положения о рейтинговой системе обучения и оценки качества	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г.

		учебной работы студентов ТвГУ» и «Положения о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ»	
2.	Раздел IX	Оснащенность аудиторного фонда для проведения учебных занятий и самостоятельной работы студентов согласно «Справки МТО ООП ...»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г