

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в физику конденсированных сред
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Н.А. Львова, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии наноструктур 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Введение в физику конденсированных сред" предназначен для изучения основ физики реальных кристаллов; взаимосвязи природы химической связи, кристаллической и дефектной структуры и физических свойств конденсированных сред; условий фазового равновесия и фазовых превращений в одно- и многокомпонентных системах; физических свойств неупорядоченных сред различного типа.

Задачами курса являются:

- освоение студентами базовых знаний в области физического материаловедения;
- приобретение теоретических знаний в области исследования свойств реальных кристаллов;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области физики твердого тела.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

фундаментальные понятия, законы, теории в области физических свойств конденсированных сред;  
типы химической связи в конденсированных средах;  
способы получения твердых тел;  
основные сведения о механических свойствах твердых тел;  
основы теории фазовых переходов 1 и 2 рода;  
основные сведения о диффузии твердых тел и самодиффузии в кристаллах;  
основы понятий о сильно легированных полупроводниках;  
основы понятий об аморфном состоянии вещества.

Уметь:

понимать, излагать и критически анализировать базовую общезначимую информацию  
абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить построения фазовых диаграмм;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики.  
применять полученные знания в научно-исследовательских работах и в прикладных задачах профессиональной деятельности.

Владеть:

навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами;  
основными методами описания систем слабозаимодействующих частиц и свойств конденсированных сред.  
методами обработки и анализа экспериментальной и теоретической физической информации;  
современной терминологией и знаниями о свойствах конденсированных сред.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Аморфное состояние вещества.
2. Диффузия и самодиффузия в кристаллах.
3. Механические свойства твердых тел.
4. Получение твердых тел.
5. Сильно легированные полупроводники.
6. Типы химической связи в конденсированных средах.
7. Точечные дефекты в твердых телах.
8. Фазовые равновесия и диаграммы состояния.

## 1. Цели и задачи

## Цель дисциплины

- изучение основ физики реальных кристаллов; взаимосвязи природы химической связи, кристаллической и дефектной структуры и физических свойств конденсированных сред; условий фазового равновесия и фазовых превращений в одно- и многокомпонентных системах; физических свойств неупорядоченных сред различного типа.

## Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области физического материаловедения;
- приобретение теоретических знаний в области исследования свойств реальных кристаллов;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области физики твердого тела.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории в области физических свойств конденсированных сред;
- типы химической связи в конденсированных средах;
- способы получения твердых тел;
- основные сведения о механических свойствах твердых тел;
- основы теории фазовых переходов 1 и 2 рода;
- основные сведения о диффузии твердых тел и самодиффузии в кристаллах;
- основы понятий о сильно легированных полупроводниках;
- основы понятий об аморфном состоянии вещества.

уметь:

- понимать, излагать и критически анализировать базовую общезначимую информацию;
- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить построения фазовых диаграмм;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики.
- применять полученные знания в научно-исследовательских работах и в прикладных задачах профессиональной деятельности.

владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
 культурой постановки и моделирования физических задач;  
 навыками решения типовых задач и задач повышенной трудности теоретического и экспериментального плана с использованием методов вычислительной математики и информатики;  
 практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
 навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами;  
 основными методами описания систем слабовзаимодействующих частиц и свойств конденсированных сред;  
 методами обработки и анализа экспериментальной и теоретической физической информации;  
 современной терминологией и знаниями о свойствах конденсированных сред.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Аморфное состояние вещества.	4			8
2	Диффузия и самодиффузия в кристаллах.	4			9
3	Механические свойства твердых тел.	4			8
4	Получение твердых тел.	4			8
5	Сильно легированные полупроводники.	4			8
6	Типы химической связи в конденсированных средах.	4			8
7	Точечные дефекты в твердых телах.	4			11
8	Фазовые равновесия и диаграммы состояния.	2			15
Итого часов		30			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

###### 1. Аморфное состояние вещества.

Аморфное состояние вещества. Ближний и дальний порядок. Методы получения аморфных материалов. Стеклование. Физические свойства аморфных полупроводников. Металлические стекла. Применение аморфных материалов. Жидкие кристаллы и пленки. Классификация жидких кристаллов: нематические, смектические, холестерические. Химическая природа образования жидкокристаллического состояния. Магнитные, диэлектрические и оптические свойства. Практическое применение. Эпитаксиальные слои. Механизм и кинетика формирования слоев и пленок. Поликристаллические пленки полупроводников и металлов. Аморфные диэлектрические пленки.

## 2. Диффузия и самодиффузия в кристаллах.

Диффузия и самодиффузия в кристаллах. Феноменологическая теория диффузии. Поток вещества. Первый закон Фика. Коэффициент диффузии. Анизотропия коэффициента диффузии. Закон Аррениуса. Энергия активации. Уравнение непрерывности. Второй закон Фика. Поверхностная диффузия и диффузия по границам зёрен. Эффект Киркендала. Реактивная диффузия. Восходящая диффузия. Атомная теория диффузии. Твердые растворы и сплавы. Твердые растворы замещения, внедрения и вычитания. Размерный и валентный факторы. Правило Вегарда. Неограниченная взаимная растворимость в твердом состоянии. Эмпирические правила Юм-Розери. Упорядоченные твердые растворы. Равновесные и метастабильные твердые растворы. Распад твердых растворов.

## 3. Механические свойства твердых тел.

Механические свойства твердых тел. Механическое напряжение. Изменение объема или формы твердого тела без изменения его массы под действием внешней силы. Сжимаемость. Относительная деформация образца, истинная деформация. Диаграмма деформации. Модуль Юнга. Обобщенный закон Гука. Пластические свойства твердых тел. Теоретическая прочность твердых тел. Хрупкое разрушение. Теория Гриффитса. Методы измерения твердости на микро- и наноразмере.

## 4. Получение твердых тел.

Получение твердых тел: кристаллизация, стеклование, аморфизация. Термодинамика фазового перехода I рода. Гомогенная кристаллизация. Гетерогенная кристаллизация. Центр кристаллизации. Критический размер зародышей. Влияние стенок и примесей. Кинетика процесса кристаллизации. Легко и трудно кристаллизующиеся жидкости.

## 5. Сильно легированные полупроводники.

Сильнолегированные полупроводники. Примесные состояния. Примесные зоны. Слабая и сильная компенсация. Теория протекания. Переходы металл-диэлектрик. Прыжковая проводимость.

## 6. Типы химической связи в конденсированных средах.

Типы конденсированных сред: периодические системы (кристаллы), непериодические системы; системы, сочетающие порядок и беспорядок. Принципы строения твердого тела: ближний и дальний порядок, конденсация модельной системы, плотные упаковки, валентные упаковки.

Три основных типа химических связей. Насыщенные и ненасыщенные связи. Ионная связь. Энергия связи ионных кристаллов. Постоянная Маделунга. Ковалентная связь в молекулах и кристаллах. Кратность связи и межатомные расстояния. Гибридизация электронных состояний. Диполь - дипольное взаимодействие. Силы Ван-дер-Ваальса. Водородная связь.

## 7. Точечные дефекты в твердых телах.

Точечные дефекты в металлах. Вакансия, внедрение. Примесный атом в позиции внедрения и замещения. Механизмы образования точечных дефектов. Энергия образования и миграции. Локальные искажения структуры. Равновесная и неравновесная концентрация вакансий. Точечные дефекты в ковалентных и ионных кристаллах. Доноры и акцепторы. Заряженные структурные вакансии. Дефекты Шоттки. Дефекты Френкеля. Центры окраски. Комплексы точечных дефектов. Бивакансия. Краудион. Дислокации. Дислокационный механизм элементарного сдвига. Нитевидные кристаллы. Краевые дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Полные и частичные дислокации. Винтовые дислокации. Винтовые дислокации и рост кристаллов. Структура граней. Спирали роста. Ядро дислокации. Искажение структуры кристалла. Криволинейные дислокации. Дислокационные петли. Взаимодействие дислокаций. Энергия дислокации. Преодоление препятствий. Источник Франка - Рида. Атмосфера примесей. Зуб текучести. Наблюдение дислокаций. Ямки травления. Декорирование дислокаций. Двумерные дефекты. Стенки дислокаций. Полигонизация. Границы блоков в мозаичном кристалле. Границы зерен. Ошибки упаковки. Плоскости двойникования. Механизм двойникования. Трехмерные дефекты.

#### 8. Фазовые равновесия и диаграммы состояния.

Фазовые превращения в твердом состоянии. Устойчивость состояния к малым флуктуациям. Гомогенные и гетерогенные превращения. Бездиффузионные и диффузионные превращения. Структура межфазной границы. Когерентная, полугогерентная и некогерентная межфазные границы. Дислокации несоответствия. Основные закономерности распада твердых растворов. Спинодальный распад. Диаграмма состояний с куполом распада. Мартенситное превращение. Аллотропные превращения. Упорядочение атомно-кристаллической структуры. Изменение физических свойств при упорядочении. Концентрационное и температурное разупорядочение. Представление о ближнем порядке. Степень ближнего порядка.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Воронов В.К., Подоплелов А.В. Современная Физика. Конденсированные состояния. Уч. пособие. 2008
2. Елманов Г.Н., Залужный А.Г., Скрытный В.И., Смирнов Е.А., Яльцев В.Н. Физика твёрдого тела. Том 1. Учебник для ВУЗов под редакцией Калина Б.А., МИФИ, 2007
3. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М., Ме-таллургия, 2003.
4. Миронова Г.А. Конденсированное состояние вещества: от структурных единиц до живой материи. Т.1,2. М. Физический ф-т МГУ, 2006.

#### Дополнительная литература

1. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
2. Жданов Г.С., Хунджиа А.Г. Лекции по физике твердого тела. М. Изд. Моск. ун-та. 1989.

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

[www.biophys.msu.ru](http://www.biophys.msu.ru)

### 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

текстовый редактор (EditPlus, Notepad), вычислительная среда Chem3D Ultra, программный пакет МОРАС.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	Н.А. Львова, канд. физ.-мат. наук, доцент



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в физику конденсированных сред» обучающийся должен:

### знать:

фундаментальные понятия, законы, теории в области физических свойств конденсированных сред;  
типы химической связи в конденсированных средах;  
способы получения твердых тел;  
основные сведения о механических свойствах твердых тел;  
основы теории фазовых переходов 1 и 2 рода;  
основные сведения о диффузии твердых тел и самодиффузии в кристаллах;  
основы понятий о сильно легированных полупроводниках;  
основы понятий об аморфном состоянии вещества.

### уметь:

понимать, излагать и критически анализировать базовую общефизическую информацию;  
абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить построения фазовых диаграмм;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики.  
применять полученные знания в научно-исследовательских работах и в прикладных задачах профессиональной деятельности.

### владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
культурой постановки и моделирования физических задач;  
навыками решения типовых задач и задач повышенной трудности теоретического и экспериментального плана с использованием методов вычислительной математики и информатики;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами;  
основными методами описания систем слабовзаимодействующих частиц и свойств конденсированных сред;  
методами обработки и анализа экспериментальной и теоретической физической информации;  
современной терминологией и знаниями о свойствах конденсированных сред.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

#### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену:

1. Типы химической связи в конденсированных средах

Ковалентная связь. Метод молекулярных орбиталей. Гибридизация атомных орбиталей.

Металлическая связь. Ионная связь. Силы Ван-дер-Ваальса. Водородная связь.

2. Получение твердых тел

Фазовый переход I рода. Термодинамика образования центра кристаллизации. Гетерогенная кристаллизация. Механизмы роста кристаллов. Легко- и труднокристаллизующиеся жидкости.

3. Точечные дефекты в твердом теле

Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты по Шоттки и по Френкелю. Локальные искажения структуры. Термодинамика точечных дефектов. Ассоциации точечных дефектов. Влияние точечных дефектов на свойства кристалла.

4. Линейные, двумерные, объемные дефекты в твердом теле

Теоретическая и техническая прочность. Краевые, винтовые, криволинейные дислокации. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. Источник Франка-Рида. Наблюдение дислокаций. Двумерные и трехмерные дефекты.

5. Механические свойства твердых тел

Кривые напряжение-деформация. Предел упругости, текучести, прочности. Обобщенный закон Гука. Механизмы пластической деформации. Хрупкое разрушение. Методы исследования механических свойств.

6. Диффузия и самодиффузия в кристаллах

Термодинамика необратимых процессов. Законы Фика. Атомная теория диффузии. Закон Аррениуса. Поверхностная, реактивная, восходящая диффузия. Методы определения параметров диффузии.

7. Фазовые равновесия и диаграммы состояния

Правило фаз Гиббса. Построение диаграмм фазовых равновесий. Диаграммы состояний бинарных твердых растворов. Диаграммы состояний тройных систем. Р-Т-Х диаграммы.

8. Фазовые превращения в твердом состоянии

Структура межфазной границы. Бездиффузионные и диффузионные фазовые превращения.

Распад твердого раствора. Упорядочение атомно-кристаллической структуры. Полиморфные превращения. Мартенситные и массивные превращения.

9. Аморфное состояние вещества

Функция радиального распределения атомов. Структура ближнего порядка. Методы получения вещества в аморфном состоянии. Аморфные полупроводники. Металлические стекла. Диэлектрические стекла.

10. Сильнолегированные полупроводники

Теория протекания. Локализованные состояния в неупорядоченных структурах. Переходы изолятор-металл. Полупроводники р- и n-типа. Структура электронного энергетического спектра.

Примесные зоны. Прыжковая проводимость

11. Жидкие кристаллы. Эпитаксиальные слои и пленки

Классификация фаз жидких кристаллов. Способы получения жидких кристаллов. Свойства жидких кристаллов. Механизм формирования эпитаксиальных слоев и пленок. Поликристаллические пленки полупроводников и металлов. Аморфные диэлектрические пленки.

Примеры билетов:

Пример 1.

1. Фазовые превращения в твердом состоянии

Структура межфазной границы. Бездиффузионные и диффузионные фазовые превращения.

2. Термодинамика точечных дефектов. Ассоциации точечных дефектов. Влияние точечных дефектов на свойства кристалла.

## Пример 2.

1. Кривые напряжение-деформация. Предел упругости, текучести, прочности. Обобщенный закон Гука. Механизмы пластической деформации. Хрупкое разрушение.
2. Механизм формирования эпитаксиальных слоев и пленок.

## Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.