

## Программа учебной дисциплины «Физика твердого тела»

Утверждена

Академическим советом ОП

Протокол № 4 от 29 08 2019

Разработчик	Бондаренко Геннадий Германович, доктор физ.-мат. наук, профессор, департамент электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ
Число кредитов	9
Контактная работа (час.)	124 (3 модуль – 64 часа, 4 модуль – 60 часов)
Самостоятельная работа (час.)	218 (3 модуль – 112 часов, 4 модуль – 106 часов)
Курс, Образовательная программа	1 курс магистратуры, образовательная программа «Материалы. Приборы. Нанотехнологии» направления подготовки 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»
Формат изучения дисциплины	Без использования онлайн курса

### 1. Цель, результаты освоения дисциплины и пререквизиты

Целями освоения дисциплины "Физика твердого тела" являются:

- формирование углубленных представлений об основных физических процессах, явлениях и закономерностях физики твердого тела, систематических знаний о фазовых равновесиях и структурно-фазовых превращениях в твердых телах, физических свойствах материалов, влиянии на их характеристики различных факторов (температуры, давления, механических, термических, радиационных воздействий), технологических процессах создания и производства материалов с заданными свойствами и структурой, методах модификации материалов для целенаправленного получения улучшенных эксплуатационных характеристик, методах их диагностики и контроля, оценки технологичности изделий из различных материалов (в том числе изделий электронной техники);
- формирование основных компетенций в области физики твердого тела, а также практических умений и навыков, необходимых для эффективной последующей работы в академических, вузовских, научно-исследовательских и конструкторских организациях электронной, авиакосмической, оборонной, атомной промышленности.

В результате освоения дисциплины студент приобретает следующие компетенции:

- способен проектировать удовлетворяющие требованиям технологичности, здоровья и безопасности технологические процессы производства новых материалов и изделий электронной техники с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства (ПК-9);
- способен осуществить авторское сопровождение, диагностику и контроль материалов и изделий электронной техники на производственном и эксплуатационном

этапах (ПК-10).

### Место дисциплины в учебном плане

Дисциплина «Физика твердого тела» относится к базовой части учебного плана магистерской образовательной программы «Материалы. Приборы. Нанотехнологии» направления подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» и изучается студентами магистратуры на 1 курсе в 3 и 4 модулях. Изучение дисциплины «Физика твердого тела» базируется на следующих дисциплинах: «Введение в физику твердого тела» (1курс - 1,2 модули), «Высшая математика для прикладной физики» (1курс - 1,2 модули). Основные положения дисциплины используются в дальнейшем при изучении дисциплины «Избранные главы физики конденсированного состояния», выполнении преддипломной практики, подготовке выпускной квалификационной работы.

## 2. Содержание учебной дисциплины

Раздел дисциплины	Объем в часах	Планируемые результаты обучения (ПРО), подлежащие контролю	Формы контроля
	лк		
	см		
	ср		
Раздел 1. Введение	2	<b>Знать:</b> основные тенденции развития, место и значение физики твердого тела в современном научно-техническом прогрессе. <b>Уметь:</b> сформулировать и обосновать принципы выбора материалов, а также технологического процесса их создания, диагностики и контроля для практического применения в различных изделиях, в том числе в изделиях электронной техники.	Выступление на семинаре. Контрольная работа. Устный экзамен.
	-		
	2		
Раздел 2. Кристаллическое строение идеальных и реальных твердых тел.	10	<b>Знать:</b> основные понятия о строении кристаллических идеальных и реальных твердых тел, а также диффузионных процессах в твердых телах. <b>Уметь:</b> описывать основные типы кристаллических решеток и дефектов в реальных металлических и неметаллических структурах. <b>Владеть:</b> методиками определения силовых и энергетических характеристик дефектов кристаллической решетки, а также диффузионных параметров кристаллических твердых тел.	Выступление на семинаре. Контрольная работа. Устный экзамен.
	20		
	56		
Раздел 3. Фазовое равновесие и фазовые превращения в твердых телах.	12	<b>Знать:</b> основы теории кристаллизации и термодинамики фазовых превращений в твердых телах. <b>Уметь:</b> исходя из фазовой диаграммы, обосновать выбор вида и оптимального режима модифицирования сплава для улучшения его физических характеристик.	Выступление на семинаре. Контрольная работа. Устный экзамен.
	20		
	56		

		<b>Владеть:</b> методикой построения диаграмм фазового равновесия бинарных систем.	
Раздел 4. Физические свойства твердых тел.	12	<b>Знать:</b> основные механизмы протекания электрических, магнитных, деформационных процессов в твердых телах (в том числе материалах для электроники и наноэлектроники), связанных с ними структурных изменений и фазовых превращений, взаимовлияние и взаимосвязь различных физических свойств и структуры твердых тел. <b>Уметь:</b> предсказать изменения физических свойств и структуры твердых тел под действием различных факторов (среды, обработки, температуры, химического состава, механических и термических воздействий). <b>Владеть:</b> методиками определения и проведения оценочных расчетов характеристик физических свойств твердых тел.	Выступление на семинаре. Контрольная работа. Устный экзамен.
	20		
	60		
Раздел 5. Основные положения радиационной физики твердого тела.	10	<b>Знать:</b> основные понятия о радиационном дефектообразовании в твердых телах, особенностях взаимодействия различных видов ионизирующих излучений с твердыми телами, радиационно-индуцированных и радиационно-стимулированных процессах в твердых телах. <b>Уметь:</b> предсказать изменения физических свойств и структуры твердых тел под действием различных видов ионизирующих излучений. <b>Владеть:</b> методиками определения и проведения оценочных расчетов изменения характеристик физических свойств и структуры твердых тел при воздействии ионизирующих излучений.	Выступление на семинаре. Контрольная работа. Устный экзамен.
	18		
	44		
<b>Часов по видам учебных занятий:</b>	46		
	78		
	218		
<b>Итого часов:</b>	342		

Формы учебных занятий: лк – лекции в аудитории; см - семинары;  
ср – самостоятельная работа студента.

### Содержание разделов дисциплины

#### Раздел 1. Введение.

**Тема 1.** Физика твердого тела как наука, ее место и значение в современном научно-техническом прогрессе. Принципы выбора материалов, особенности технологических процессов их создания, диагностики и контроля для практического применения в различных изделиях, в том числе в изделиях электронной техники.

## **Раздел 2. Кристаллическое строение идеальных и реальных твердых тел.**

### **Тема 2. Межатомные связи и кристаллическое строение идеальных твердых тел.**

Кристаллические и аморфные твердые тела. Ближний и дальний порядок. Типы межатомных связей – металлическая, ковалентная, ионная, Ван-дер-Ваальса. Понятие об идеальном и реальном кристаллах. Основные типы кристаллических решеток. Коэффициент компактности кристаллической решетки. Кристаллографические пустоты в различных кристаллических решетках. Индексы Миллера и Миллера-Бравэ. Анизотропия свойств кристаллов.

### **Тема 3. Дефекты кристаллической решетки в реальных твердых телах.**

Точечные дефекты в кристаллических твердых телах. Классификация дефектов в кристаллах. Определение и описание типов точечных дефектов – вакансий, междоузельных атомов, примесных атомов внедрения и замещения. Дефекты Френкеля и Шоттки. Гантели. Кроудионы. Комплексы точечных дефектов – вакансионные, междоузельные, комплексы «собственный дефект-примесный атом». Энергии образования и миграции точечных дефектов и их комплексов. Равновесная и неравновесная концентрации точечных дефектов. Источники и стоки точечных дефектов. Поры. Методы определения концентрации и энергии образования точечных дефектов (дилатометрии, электросопротивления, электрон-позитронной аннигиляции, теплоемкости, внутреннего трения и др.). Образование точечных дефектов при пластической деформации, закалке, бомбардировке ускоренными частицами. Поведение точечных дефектов при отжиге, стадии отжига.

Дислокации. Понятие о дислокациях. Основные положения теории дислокаций. Краевая дислокация. Движение краевой дислокации скольжением и переползанием. Пороги на краевых дислокациях. Винтовая дислокация, ее скольжение и поперечное скольжение. Цилиндрическая симметрия искажения кристаллической решетки вокруг винтовой дислокации. Смешанные дислокации, их движение. Скользящие петли дислокаций. Вектор Бюргера, его свойства. Призматические петли дислокаций, их образование при пластической деформации, закалке, облучении. Скорость движения дислокаций. Плотность дислокаций, методы ее определения. Упругие свойства дислокаций. Энергия образования дислокации. Сила линейного натяжения дислокации. Сила, действующая на дислокацию. Равновесная кривизна дислокации в поле напряжений. Упругое взаимодействие дислокаций. Взаимодействие дислокаций со свободной поверхностью, сила изображения. Образование дислокаций. Эпитаксиальные дислокации (дислокации несоответствия). Размножение дислокаций. Источник Франка-Рида. Дислокационные сетки. «Лес» дислокаций. Полные и частичные (неполные) дислокации. Дислокационные реакции. Энергетический критерий дислокационных реакций (критерий Франка). Частичные дислокации Шокли. Расщепленные (растянутые) дислокации. Частичные дислокации Франка. Сидячие дислокации. Сидячие и скользящие призматические дислокационные петли. Вершинные дислокации. Дислокация Ломера-Коттрелла, ее образование. Поперечное скольжение и переползание растянутых дислокаций.

Дефекты упаковки в кристаллах. Плотнупакованные и неплотнупакованные кристаллические решетки. Коэффициент компактности кристаллической решетки. Способы укладки атомных слоев кристаллической решетки. Дефекты упаковки как поверхностные (двумерные) дефекты кристаллической решетки. Дефекты упаковки внедрения и вычитания. Энергия дефектов упаковки. Поверхностное натяжение дефекта упаковки.

Границы зерен и субзерен в твердых телах. Монокристаллические и поликристаллические твердые тела, зерна и субзерна. Границы наклона и кручения. Малоугловые границы, их образование. Симметричные и несимметричные малоугловые границы. Высокоугловые (большеугловые) границы зерен. Модели высокоугловых границ. Зернограничные дислокации и ступеньки (уступы). Миграция границ зерен и субзерен, зернограничное проскальзывание. Торможение дислокаций границами зерен и субзерен.

Особенности поведения дефектов в ионных кристаллах. Точечные дефекты в ионных кристаллах. Дефекты Шоттки и Френкеля. Центры окраски (электронные и дырочные) в ЩГК-кристаллах. Экситоны. Экситоны Френкеля и Ванье-Мотта. Влияние экситонов на образование F-центров в ионных кристаллах. Дислокации в ионных кристаллах, заряженные и незаряженные пороги на дислокациях. Электрические свойства дислокаций в ионных кристаллах.

Особенности поведения дефектов в полупроводниковых кристаллах. Собственные и примесные точечные дефекты в полупроводниковых кристаллах. Комплексы точечных дефектов. А-центры, Е-центры, К-центры в полупроводниках. Точечные дефекты, связанные с нарушениями стехиометрии (стехиометрические точечные дефекты). Дислокации в полупроводниковых кристаллах. Решетки типов алмаза, сфалерита. 60°-ные дислокации (Aa - и Ab -дислокации). Положительные и отрицательные дислокации. Энергия дислокации. Плотность и подвижность дислокаций в полупроводниковых кристаллах.

**Тема 4.** Диффузионные процессы в реальных кристаллах.

Диффузия в кристаллических твердых телах (определение). Самодиффузия и гетеродиффузия. Термодинамика диффузионных процессов. Химический потенциал, градиент химического потенциала. Диффузия свободная и вынужденная (термодиффузия, электродиффузия, бародиффузия, восходящая диффузия). Атомные механизмы диффузии в твердых телах (по дислокационным трубкам, границам зерен, поверхности, вакансионный, межузельный, гантельный, обменный, кольцевой и др.). Законы диффузии (законы Фика). Коэффициент диффузии. Зависимость коэффициента диффузии от температуры. Энергия активации диффузии. Эффект Киркендалла (нормальный и обратный). Методы определения диффузионных параметров твердых тел.

**Раздел 3. Фазовое равновесие и фазовые превращения в твердых телах.**

**Тема 5.** Кристаллизация. Термодинамика фазовых превращений.

Кристаллизация, энергетические условия и механизмы процесса кристаллизации. Первичная и вторичная кристаллизация. Термодинамика фазовых превращений. Изменение свободной энергии при зарождении новой фазы в жидком и твердом состояниях. Гомогенное и гетерогенное зарождение. Критический зародыш. Термические кривые охлаждения при кристаллизации веществ. Рост кристаллов. Ликвация – внутрикристаллитная, зональная, гравитационная. Возврат, полигонизация, первичная, собирательная и вторичная рекристаллизация, текстура. Статическая и динамическая рекристаллизация. Влияние возврата и рекристаллизации на свойства твердых тел. Фазовые переходы 1-го и 2-го рода. Полиморфные превращения в твердом состоянии. Магнитные превращения. Строение межфазных границ и их роль при фазовом превращении и росте монокристаллических пленок. Получение монокристаллов и эпитаксиальных пленок. Получение аморфных сплавов – металлических стекол. Виды сплавов. Компонент, фаза, механическая смесь. Виды кристаллических твердых фаз: чистые компоненты, твердые растворы, промежуточные фазы. Твердые растворы внедрения. Твердые растворы замещения – неупорядоченные, упорядоченные (сверхструктуры). Твердые растворы вычитания. Термодинамика процессов распада твердого раствора. Распад по механизму образования и роста зародышей. Спинодальный распад. Промежуточные фазы. Интерметаллиды. Соединения с нормальной валентностью (валентные соединения). Фазы внедрения. Электронные соединения (фазы Юм-Розери). Фазы Лавеса, сигма-фазы. Конгруэнтно- и инконгруэнтно-плавящиеся промежуточные фазы. Метастабильные фазы.

**Тема 6.** Диаграммы фазового равновесия сплавов.

Сущность и значение диаграмм фазового равновесия (диаграмм состояния). Правило фаз. Термодинамические основы построения диаграмм состояния. Фазовые переходы первого и второго рода, примеры. Основные типы диаграмм фазового равновесия двойных сплавов. Правило отрезков (правило рычага). Диаграмма состояния с неограниченной растворимостью компонентов. Диаграммы состояния с ограниченной растворимостью эвтектического и перитектического типов. Диаграммы состояния с химическими соединениями, промежуточными фазами, с монотектическим превращением. Полиморфизм. Диаграммы состояния с полиморфным превращением. Понятие о диаграммах состояния тройных систем. Связь свойств сплавов с их диаграммой фазового равновесия (законы Курнакова).

**Тема 7.** Модифицирование структуры и свойств твердых тел термической, химико-термической и термомеханической обработкой.

Сущность термической обработки и ее назначение. Классификация процессов термической обработки. Виды отжига и его назначение. Отжиг 1-го рода. Гомогенизирующий (диффузионный) отжиг. Рекристаллизационный отжиг. Отжиг для снятия внутренних напряжений. Отжиг 2-го рода (фазовая перекристаллизация). Закалка. Сущность закалки как процесса фиксации метастабильных фаз. Закалка с полиморфным превращением. Закалка без полиморфного превращения (фиксация пересыщенного твердого раствора). Отпуск – высокий, средний, низкий. Старение как

стабилизирующая обработка. Сущность изменения структуры и свойств дисперсионно-твердеющих сплавов при старении на примере сплавов системы алюминий-медь (дуралюминов). Естественное и искусственное старение. Зоны Гинье-Престона. Зонное и фазовое старение. Морфология частиц выделений, модулированные структуры. Перестаривание. Когерентные, частично когерентные и некогерентные выделения в кристаллической решетке матрицы. Сплавы упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой (на примере деформируемых алюминиевых сплавов – Al-Cu, Al-Mg, Al-Mn). Фазовые диаграммы систем, сплавы которых могут быть подвергнуты отжигу 1-го рода, отжигу 2-го рода, закалке и отпуску, закалке и старению; выбор вида и оптимального режима обработки для улучшения физико-механических свойств сплавов. Понятие о химико-термической обработке, ее сущность, ее назначение. Виды ХТО (цементация, азотирование сталей, борирование, диффузионная металлизация). Понятие о термомеханической обработке материалов.

**Тема 8.** Аустенитное и мартенситное превращения в твердых телах.

Диаграммы состояния с полиморфным превращением (на примере системы железо-углерод). Структурные составляющие системы Fe-C (аустенит, феррит, перлит, ледебурит, цементит). Аустенитное диффузионное превращение. С-образные кривые. Процесс изотермического превращения аустенита с образованием перлита, сорбита, троостита. Бейнит. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении. Критическая скорость охлаждения при закалке. Мартенсит. Мартенситное бездиффузионное превращение. Термодинамика и механизм мартенситного превращения. Мартенсит охлаждения, мартенсит напряжения и мартенсит деформации. Структура и свойства мартенсита, морфология мартенситных фаз. Отпуск, отпускная хрупкость 1-го и 2-го рода (необратимая и обратимая). Эффект сверхупругости. Эффект памяти формы и его применение. Примеры мартенситных превращений. Мартенситное превращение в стали углеродистой и безуглеродистой, титановых, медных сплавах. Изменение свойств при мартенситных превращениях. Понятие о превращениях бейнитного типа.

**Раздел 4. Физические свойства твердых тел.**

**Тема 9.** Механические свойства твердых тел.

Основные механические характеристики твердых тел - предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение, поперечное сужение, ударная вязкость и др. Диаграмма «напряжение – деформация». Методы определения механических характеристик материалов при статических и динамических испытаниях.

Упругие и релаксационные свойства твердых тел. Упругость. Закон Гука. Модули упругости, влияние различных факторов на модули упругости. Релаксационные свойства - упругое последствие и релаксация напряжений. Внутреннее трение - амплитуднозависимое и амплитуднонезависимое. Пик Бордони. Теория Гранато-Люкке. Эффект Баушингера.

Пластические и прочностные характеристики материалов. Пластичность и прочность твердых тел. Площадка текучести и «зуб» текучести. Закон Коттрелла-

Стокса. Эффект Хаазена-Келли. Дислокационные механизмы пластической деформации - скольжением, двойникованием (полюсный механизм), сбросообразованием. Закон Шмида-Боаса. Особенности пластической деформации поликристаллических материалов. Роль границ зерен при пластической деформации. Диффузионная пластичность. Идеальная и реальная прочность материалов. Влияние различных факторов на реальную прочность материалов. Сущность упрочнения. Пересечение дислокаций. Образование порогов на дислокациях. Движение дислокаций с порогом. Сила Пайерлса. Упрочнение при торможении дислокаций другими дислокациями. Упрочнение за счет торможения дислокаций границами зерен и субзерен. Зернограничные дислокации. Зернограничное проскальзывание. Дисперсионное и дисперсное упрочнение. Торможение дислокаций дисперсными частицами. Торможение дислокаций в сплавах со структурой твердого раствора. Упрочнение при легировании материалов. Торможение дислокаций примесными атмосферами Коттрелла, Снука, Сузуки. Взаимодействие дислокаций с вакансиями и междоузельными атомами. Преференс. Деформационное упрочнение. Стадии деформации, микроструктурные изменения в материалах. Наклёп. Упрочнение материалов с помощью различных видов обработки (термической, нанесением покрытий, ионным легированием, облучением и др.). Твердость, методы ее изучения. Твердость по Бринеллю, твердость по Виккерсу, твердость по Роквеллу. Микротвердость. Разрушение твердых тел, виды разрушения. Феноменологические теории хрупкого разрушения - Гриффитса, Орована. Хрупкое разрушение. Дислокационные модели зарождения трещин. Ударная вязкость. Переход от вязкого разрушения к хрупкому. Хладноломкость. Порог хладноломкости. Вязкое разрушение. Влияние различных факторов на процесс разрушения твердых тел - состояния поверхности, масштабного фактора, агрессивной среды и др. Эффекты Иоффе и Ребиндера. Влияние размера зерна. Соотношение Холла-Петча. Текстуорообразование в поликристаллах. Пилообразная деформация (эффект Портевена - Ле Шателье). Влияние нагрева на структуру и свойства пластически деформированных материалов. Жаропрочность. Анализ кривых ползучести. Предел ползучести. Неупругая ползучесть (обратимая ползучесть). Низкотемпературная ползучесть (логарифмическая ползучесть). Теория логарифмической ползучести. Высокотемпературная ползучесть. Зависимость установившейся ползучести от температуры и напряжения. Диффузионная ползучесть. Ползучесть Набарро-Херринга. Ползучесть Кобла. Разрушение при ползучести. Длительная прочность. Испытания на ползучесть и длительную прочность. Способы повышения сопротивления ползучести. Деформация при высоких температурах и с большими скоростями. Сверхпластичность, условия проявления и атомный механизм эффекта. Влияние состава и структуры сплавов на сверхпластичность. Понятие об усталости материалов. Диаграммы усталости. Выносливость, предел выносливости. Физические параметры, оказывающие влияние на усталость: амплитуда напряжения, концентраторы напряжений, температура, частота циклирования, размер зерна, влияние химических процессов. Теория усталости. Гистерезис при усталости. Усталостное разрушение. Образование и распространение усталостных трещин. Особенности



микроструктурных изменений в материалах при усталости. Экструзии и интрузии, дислокационные механизмы их образования. Термическая усталость. Контактная усталость. Способы повышения усталостной прочности. Изнашивание и износостойкость материалов. Виды изнашивания - абразивное, усталостное, адгезионное, тепловое, окислительное. Изнашивание вследствие пластического деформирования. Изнашивание при хрупком разрушении. Изнашивание в условиях агрессивного воздействия жидкой среды. Физическая природа процесса изнашивания. Испытания на износ. Микро- и нанотрибология. Способы повышения износостойкости материалов.

#### **Тема 10.** Электрические свойства твердых тел.

Основные характеристики электрических свойств материалов. Основы зонной теории твердых тел и деление веществ на металлы, полупроводники и металлы. Удельная электропроводность и удельное электросопротивление металлов, полупроводников и диэлектриков. Электрические свойства полупроводников. Собственная и примесная проводимость. Электронно-дырочный (p-n) переход, его вольт-амперная характеристика. Проводниковые и резистивные материалы, в том числе материалы для электроники и нанoeлектроники. Зависимость удельного сопротивления и удельной электропроводности металлов от различных факторов (температуры, концентрации структурных дефектов, наклепа, отжига и т.д.). Фононы. Температура Дебая. Рост сопротивления при низких температурах в металлах с магнитными примесями и квантовых точках (эффект Кондо). Электрические свойства пленок наноразмерной толщины. Контактная разность потенциалов, термоэлектродвижущая сила. Пьезорезистивный эффект и его использование в изделиях электронной техники.

Сверхпроводимость и сверхпроводящие материалы. Низкотемпературная сверхпроводимость и низкотемпературные сверхпроводящие материалы. Основные свойства сверхпроводников. Эффект Мейснера. Сверхпроводники I и II рода. Вихри Абрикосова. Теория низкотемпературной сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Электрон-фононное взаимодействие. Куперовские пары. Бозоны. Эффект Джозефсона. Сквида. Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП). ВТСП-материалы, их структура. Практическое применение сверхпроводящих материалов.

#### **Тема 11.** Диэлектрические свойства твердых тел.

Общая характеристика диэлектриков. Характеристики диэлектрических материалов и связь между ними. Поляризация диэлектриков. Характеристики поляризации. Классификация диэлектриков. Полярные и неполярные молекулы диэлектриков. Дипольный момент, вектор поляризации. Диэлектрическая проницаемость. Электрическая индукция, вектор электрической индукции. Поляризуемость, поляризованность. Линейные (пассивные) и нелинейные (активные) диэлектрики. Неполярные, полярные и ионные диэлектрики. Виды поляризации диэлектриков – упругая (электронная, ионная), релаксационная (дипольно-релаксационная, электронно-релаксационная, ионно-релаксационная, миграционная). Время релаксации.

Поляризация диэлектриков в электрическом поле. Спонтанная (самопроизвольная) поляризация. Зависимость диэлектрической проницаемости от различных факторов. Диэлектрические потери в постоянном и переменном электрическом поле. Характеристики диэлектрических потерь, тангенс угла диэлектрических потерь, активная мощность потерь, коэффициент диэлектрических потерь. Удельная активная проводимость диэлектрика. Виды диэлектрических потерь. Диэлектрические потери на электропроводность. Релаксационные потери, их температурная и частотная зависимости. Диэлектрический гистерезис. Электрическая прочность твердых диэлектриков. Виды пробоя в твердых диэлектриках. Электрический пробой. Тепловой (электротепловой) пробой. Другие виды пробоя – электрохимический, ионизационный, электромеханический. Влияние различных факторов на электрическую прочность. Эксплуатационные свойства диэлектриков. Классификация диэлектриков. Твердые органические электроизоляционные и конденсаторные материалы. Сегнетоэлектрики, их свойства и практическое применение. Пьезоэффект. Пьезоэлектрики, их свойства и применение. Электреты, их свойства и применение.

#### **Тема 12.** Магнитные свойства твердых тел.

Основные характеристики магнитных свойств твердых тел. Классификация материалов по магнитным свойствам. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, их свойства. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри. Антиферромагнетики. Точка Нееля. Ферримагнетики. Ферриты. Спиновые волны, магноны. Доменная структура ферромагнетиков и влияние различных факторов на магнитные свойства ферромагнитных материалов. Магнитная анизотропия. Петля гистерезиса. Остаточная магнитная индукция, коэрцитивная сила. Магнитные свойства материалов в переменных полях. Зависимость магнитных свойств от температуры. Магнитострикционный эффект. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы. Спиновые волны. Цилиндрические магнитные домены.

#### **Тема 13.** Оптические и магнитооптические свойства твердых тел.

Виды взаимодействия света с твердым телом. Поглощение и отражение света кристаллами, коэффициенты поглощения и отражения. Собственное поглощение. Экситонное поглощение. Поглощение свободными носителями, примесное поглощение. Рекомбинационное излучение в полупроводниках.

Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра). Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

#### **Раздел 5. Основные положения радиационной физики твердого тела.**

#### **Тема 14.** Радиационное дефектообразование в твердых телах.

Этапы процесса радиационной повреждаемости твердых тел. Определение энергии первично выбитого атома. Потенциалы взаимодействия. Сечение взаимодействия. Каскад столкновений. Образование и развитие каскада. Влияние эффектов фокусировки атомных столкновений и каналирования частиц в кристаллах на каскадную функцию. Структура

каскада. Атомные перестройки в каскаде. Энергетические потери движущихся частиц. Образование и отжиг точечных радиационных дефектов в твердых телах.

**Тема 15.** Особенности взаимодействия различных видов ионизирующих излучений с твердыми телами.

Взаимодействие твердых тел с нейтронами. Взаимодействие твердых тел с ускоренными ионами - образование атомных смещений, пробеги ионов и профили их распределения в твердых телах, влияние эффекта каналирования. Эффект теней (блокировки). Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при воздействии высокоэнергетических ионов. Взаимодействие твердых тел с высокоэнергетическими электронами. Взаимодействие твердых тел с гамма-квантами.

**Тема 16.** Радиационно-стимулированные и радиационно-индуцированные процессы в твердых телах.

Радиационно-стимулированная диффузия. Ионное перемешивание и имплантация атомами отдачи. Эффект дальнего действия. Процессы сегрегации и сепарации компонентов сплавов. Термическая поверхностная сегрегация (сегрегация Гиббса). Радиационно-индуцированная сегрегация. Радиационно-индуцированная сепарация атомов в сплавах. Потееющие сплавы. Радиационно-индуцированные и радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в сплавах. Трансмутационные эффекты и ядерное (трансмутационное) легирование материалов. Радиационная электризация диэлектрических материалов. Радиационное набухание материалов - влияние температуры и дозы облучения, влияние скорости введения радиационных дефектов и типа бомбардирующих частиц, влияние дислокационной структуры и двумерных дефектов, влияние напряженного состояния материала, влияние газовых примесей. Образование решетки пор в структуре облученного материала. Пути подавления радиационного набухания материалов. Влияние радиационного воздействия на прочность и пластичность твердых тел - механизмы радиационного упрочнения, зависимость радиационного упрочнения от дозы облучения, влияние температуры облучения и испытания материалов на радиационное упрочнение. Низкотемпературное радиационное охрупчивание (НТРО). Восстановление механических свойств облученных материалов при пострadiационном отжиге. Высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО). Радиационная ползучесть материалов, влияние на неё различных факторов. Распыление твердых тел при облучении. Теория распыления. Коэффициент распыления и его зависимость от различных параметров. Преимущественное (селективное) распыление. Ионное травление поверхности материала при распылении. Распыление материалов под действием нейтронов. Химическое распыление. Радиационная эрозия материалов при образовании униполярных дуг. Радиационный блистеринг, теория блистеринга и влияние на него различных факторов - дозы и температуры облучения, энергии бомбардирующих ионов, кристаллографической ориентации мишени и угла падения ионов, напряженного состояния при облучении и термомеханической обработки материала. Особенности водородного блистеринга. Синергетические эффекты. Влияние

блистеринга на радиационно-стимулированное испарение материалов. Способы подавления блистеринга. «Smart cut» - технология создания КНИ (кремний-на-изоляторе) - структур. Проблемы выбора и эксплуатации материалов для ядерной и термоядерной энергетики. Понятие о малоактивируемых материалах.

### 3. Оценивание

#### Формы контроля знаний студентов

Тип контроля	Форма контроля	1 год, модуль		Параметры
		3	4	
Текущий	Контроль активности на семинарах	*	*	Ответы на вопросы, правильность разбора кейсов, решение типовых задач, активность в дискуссиях.
Текущий	Контрольная работа		*	Письменная работа в течение 80 минут. Срок проведения – 19 неделя
Итоговый	Экзамен		*	Устный экзамен, 2 вопроса в билете.

Текущий контроль предусматривает:

- учет активности студентов в ходе проведения семинарских занятий, правильность ответов на вопросы и разбора кейсов, выступления, активность в дискуссиях и т.п.;

- контрольную работу;

Блокирующие элементы не предусмотрены.

Промежуточный контроль не предусмотрен.

Итоговый контроль в форме экзамена проводится в устной форме.

#### Критерии оценки знаний, умений и навыков

Активность на семинарах оценивается по следующим критериям, соответствующим компетенциям в разделе 3:

- ответы на вопросы, предлагаемые преподавателем;
- разбор ситуаций у доски;
- решение задач;
- участие в дискуссии по предложенной проблематике;
- активность в проводимых обсуждениях;

Контрольная работа оценивается по следующим критериям, соответствующим компетенциям в разделе 3:

- соблюдение структуры работы согласно заданию;
- правильность, полнота и обоснованность решения 2-х задач, предложенных преподавателем;
- грамотность и аккуратность выполнения работы; грамматические ошибки снижают ее оценку;

Оценки по всем формам текущего контроля выставляются по 10-ти балльной шкале.

Текущий контроль осуществляется в конце 4 модуля по активности студента на семинарах и по выполнению контрольной работы.

Итоговый экзамен по дисциплине проводится в форме устного экзамена в конце изучения курса после 4 модуля в присутствии преподавателя. На экзамене студент выбирает экзаменационный билет, который составляется с учетом пройденного материала - как на лекционных, так и на семинарских занятиях - и содержит два теоретических вопроса. Ответы на предложенные вопросы излагаются в устной форме. После ответа студента преподаватель может ему задать уточняющие вопросы по тематике билета.

Использование на экзамене каких-либо текстов, калькуляторов, телефонов и др. средств связи запрещается. Время подготовки к ответу на вопросы экзамена – 20 мин. По желанию студента и согласию преподавателя возможен досрочный ответ.

Оценки по всем формам текущего и итогового контроля выставляются по 10-ти балльной шкале.

#### **Порядок формирования оценок по дисциплине**

Итоговая оценка формируется как взвешенная сумма оценки, накопленной в течение курса, и оценки за экзамен.

*Накопленная оценка* ( $O_{\text{нак}}$ ) учитывает активность студентов на семинарских занятиях, проводимых в форме дискуссии, разборе кейсов, решении задач, качество ответов на вопросы преподавателя на занятиях, уровень выполнения контрольной работы. Оценки за работу на семинарских занятиях выставляются преподавателем в рабочую ведомость и доводятся до сведения студента. Переписывание контрольной работы или написание контрольной работы в дополнительное время не допускается.

*Накопленная оценка* ( $O_{\text{нак}}$ ) (максимум 10 баллов) включает оценку за активность на семинарах ( $O_{\text{сем}}$ ) и выполнение контрольной работы ( $O_{\text{кр}}$ ) и формируется по следующему правилу:

$$O_{\text{нак}} = 0,5O_{\text{сем}} + 0,5O_{\text{кр}}$$

Оценка  $O_{\text{сем}}$  выставляется как среднее арифметическое (с учетом правил округления до целого числа баллов) оценок за каждое практическое занятие ( $O_{\text{сем}i}$ ):

$$O_{\text{сем}} = \frac{\sum_{i=1}^N O_{\text{сем}i}}{N},$$

где  $N$  – количество семинарских занятий.

Студенты, пропустившие по уважительной причине занятие, на котором выполнялась контрольная работа, имеют возможность повторной сдачи этого элемента контроля.

Накопленная оценка по 10-ти балльной шкале определяется перед сессией и доводится до сведения студента на последнем занятии 4-го модуля.

*Итоговый экзамен* ( $O_{\text{экз}}$ ) (максимум 10 баллов): устный экзамен

Результующая оценка ( $O_{рез}$ ) (максимум 10 баллов) по курсу определяется с учетом накопленной оценки  $O_{нак}$  (с весовым коэффициентом 0,5) и оценки за экзамен в конце курса  $O_{экз}$  (с весовым коэффициентом 0,5) по следующей формуле:

$$O_{рез} = 0,5O_{нак} + 0,5O_{экз}$$

Пересдача по курсу ( $O_{п}$ ) (первая, вторая) представляет собой устный экзамен, за который выставляется оценка (максимум 10 баллов).

Результующая оценка по курсу после пересдачи ( $O_{рез пер}$ ) (первой, второй) определяется с учетом накопленной оценки  $O_{нак}$  (с весом 0,5) и оценки за пересдачу  $O_{п}$  (с весом 0,5) по следующей формуле:

$$O_{рез пер} = 0,5 \cdot O_{нак} + 0,5 \cdot O_{п}$$

Оценки по всем формам текущего и итогового контроля выставляются по 10-ти балльной шкале и качественной шкале.

Полученные при суммировании значения оценок округляются по арифметическим правилам:

$\geq x,5$  – оценка округляется в большую сторону ( $x+1$ );

$< x,5$  – оценка округляется в меньшую сторону ( $x$ ).

Количество набранных баллов	Оценка по десятибалльной шкале	Оценка по качественной шкале
9,5-10	10	отлично
8,5-9,4	9	отлично
7,5-8,4	8	отлично
6,5-7,4	7	хорошо
5,5-6,4	6	хорошо
4,5-5,4	5	удовлетворительно
3,5-4,4	4	удовлетворительно
2,5-3,4	3	неудовлетворительно
1,5-2,4	2	неудовлетворительно
0–1,4	1	не удовлетворительно

#### 4. Оценочные средства

##### *Примеры контрольных работ*

##### **Контрольная работа №1**

1. Определите дрейфовую скорость электронов проводимости в серебре, если его удельное электросопротивление равно  $1,54 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а концентрация электронов проводимости равна  $5,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Напряженность электрического поля принять равной 100 В/м.

2. Экспериментальные определения относительной концентрации вакансий в меди дали значения  $8 \cdot 10^{-5}$  при  $980^\circ\text{C}$  и  $16 \cdot 10^{-5}$  при  $1060^\circ\text{C}$ . По этим данным необходимо рассчитать энергию образования и энтропию  $S_k$  вакансии в меди.

### Контрольная работа №2

1. Найдите минимальную энергию, необходимую для образования пары «электрон-дырка» в кристалле арсенида галлия, если его электропроводность изменяется в 10 раз при понижении температуры от  $20^\circ\text{C}$  до  $-3^\circ\text{C}$ .
2. Вычислите температуру, при которой атомы меди при самодиффузии совершают один скачок в секунду. Период ГЦК решетки меди составляет 0,35 нм. Учтите, что атомы меди совершают элементарный скачок в одном из направлений плотной упаковки типа  $\langle 110 \rangle$ . Энергию активации самодиффузии меди  $E$  принять равной 47100 кал/(г-атом);  $D_0 = 0,20 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $R = 1,987 \text{ кал}/(\text{K} \cdot \text{г-атом})$ .

Контрольная работа должна быть выполнена на стандартных листах белой бумаги формата А4 и иметь сквозную нумерацию страниц.

### Вопросы для оценки качества освоения дисциплины

1. Понятие об аморфных и кристаллических твердых телах.
2. Понятие об идеальном и реальном кристаллах. Классификация дефектов кристаллической решетки.
3. Точечные дефекты, их типы, образование, миграция, равновесная и неравновесная концентрации.
4. Понятие о дислокациях. Образование и размножение дислокаций. Краевая, винтовая и смешанная дислокации, их движение. Дислокации Ломер-Коттрелла. Вектор Бюргерса, его свойства. Плотность дислокаций в кристаллах.
5. Атмосферы Коттрелла, Снука, Сузуки.
6. Дефекты упаковки внедрения и вычитания. Энергия дефектов упаковки.
7. Монокристаллические и поликристаллические твердые тела. Зерна и субзерна. Границы зерен и субзерен. Атомное строение малоугловых и высокоугловых границ.
8. Особенности поведения точечных дефектов в ионных кристаллах. Центры окраски. Экситоны.
9. Дислокации в ионных кристаллах, их влияние на электрические свойства твердых тел.
10. Собственные и примесные точечные дефекты в полупроводниковых кристаллах. Комплексы точечных дефектов. Стехиометрические дефекты.
11. Дислокации в полупроводниковых кристаллах.  $60^\circ$ -ные дислокации. Плотность и подвижность дислокаций в полупроводниковых кристаллах.
12. Диффузия, законы Фика. Атомные механизмы диффузии в твердых телах. Эффект Киркендалла.

13. Кристаллизация, энергетические условия и механизмы процесса кристаллизации. Ликвация.
14. Возврат, полигонизация, первичная, собирательная и вторичная рекристаллизация, текстура.
15. Понятие о фазовых переходах 1-го и 2-го рода. Полиморфные превращения в твердом состоянии. Магнитные превращения.
16. Компонент, фаза, механическая смесь. Виды кристаллических твердых фаз. Твердые растворы внедрения и замещения. Сверхструктуры. Промежуточные фазы – валентные и электронные соединения, фазы внедрения, фазы Лавеса
17. Термодинамические основы построения диаграмм фазового равновесия (диаграмм состояния). Правило фаз Гиббса. Правило рычага.
18. Диаграмма состояния - с неограниченной растворимостью компонентов.
19. Диаграмма состояния с ограниченной растворимостью эвтектического типа.
20. Диаграмма состояния с химическим соединением.
21. Диаграммы состояния с полиморфным превращением на примере системы железо-карбид железа. Структурные составляющие системы Fe-C.
22. Модифицирование структуры и свойств твердых тел термической обработкой. Отжиг, закалка, отпуск, старение (зонное и фазовое).
23. Аустенитное превращение в сплавах, его кинетика. С-образные кривые.
24. Мартенситное превращение в сплавах. Структура и свойства мартенсита, морфология мартенситных фаз
25. Понятие об эффекте сверхупругости и эффекте памяти формы.
26. Основные механические характеристики материалов. Диаграмма «напряжение – деформация». Зуб текучести.
27. Упругость, модули упругости. Закон Гука. Влияние различных факторов на модули упругости.
28. Релаксационные явления в твердых телах – упругое последствие, релаксация напряжения, внутреннее трение.
29. Эффект Баушингера.
30. Пластическая деформация скольжением и двойникованием. Закон Шмида-Боаса.
31. Механизмы упрочнения материалов. Деформационное упрочнение.
32. Деформационное старение. Эффект Портевена – Ле Шателье.
33. Теоретическая и реальная прочность материалов.
34. Разрушение – хрупкое и вязкое. Дислокационные модели зарождения трещин. Закон Холла-Петча. Вязко-хрупкий переход. Ударная вязкость. Хладноломкость.
35. Ползучесть, виды ползучести. Предел ползучести. Длительная прочность.
36. Сверхпластичность.
37. Усталость материалов. Выносливость, предел выносливости. Виды усталости и влияние различных факторов на усталостное разрушение.



38. Основные характеристики электрических свойств материалов. Проводниковые и резистивные материалы
39. Основы зонной теории твердых тел и деление веществ на металлы, полупроводники и металлы.
40. Электрические свойства полупроводников. Собственная и примесная проводимость. Электронно-дырочный (p-n) переход, его вольт-амперная характеристика.
41. Зависимость удельного сопротивления и удельной электропроводности металлов от различных факторов (температуры, концентрации структурных дефектов, наклепа, отжига и т.д.). Эффект Кондо. Фононы. Температура Дебая.
42. Низкотемпературная сверхпроводимость и сверхпроводящие материалы.
43. Основные свойства сверхпроводников. Эффект Мейснера. Сверхпроводники I и II рода. Вихри Абрикосова.
44. Эффект Джозефсона.
45. Высокотемпературные сверхпроводящие материалы (ВТСП).
46. Электрические свойства пленок наноразмерной толщины.
47. Контактная разность потенциалов, термоэлектродвижущая сила.
48. Поляризация диэлектриков – самопроизвольная и в присутствии электрического поля. Характеристики поляризации – поляризуемость, поляризованность, диэлектрическая проницаемость.
49. Механизмы поляризации диэлектриков в электрическом поле (упругая поляризация, релаксационная поляризация). Релаксационные виды поляризации.
50. Диэлектрические потери. Характеристики диэлектрических потерь. Виды диэлектрических потерь – потери на электропроводность, релаксационные потери.
51. Электрическая прочность твердых диэлектриков и влияние на нее различных факторов.. Виды пробоя диэлектриков – электрический, тепловой, электрохимический, ионизационный, электромеханический).
52. Сегнетоэлектрики, их свойства и практическое применение.
53. Пьезоэлектрики, их свойства и применение.
54. Электреты, их получение и применение.
55. Основные характеристики магнитных свойств материалов.
56. Диа- и парамагнетизм.
57. Доменная структура ферромагнетиков. Обменные силы. Магнитная анизотропия.
58. Намагничивание и перемагничивание ферромагнетиков. Петля гистерезиса. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.
59. Магнитные свойства материалов в переменных полях. Вихревые токи. Скин-эффект.
60. Зависимость магнитных свойств материалов от температуры. Точка Кюри.

61. Антиферромагнитные материалы, ферримагнетики. Ферриты.
62. Магнитострикция.
63. Спиновые волны.
64. Цилиндрические магнитные домены.
65. Виды взаимодействия света с твердым телом. Поглощение и отражение света кристаллами, коэффициенты поглощения и отражения.
66. Собственное поглощение. Экситонное поглощение. Поглощение свободными носителями, примесное поглощение. Рекомбинационное излучение в полупроводниках.
67. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).
68. Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты.

## 5. Ресурсы

### 5.1. Рекомендуемая основная литература

п/п	Наименование
	1. Гуртов В.А. Физика твердого тела для инженеров: Учебное пособие. – М.: Техносфера, 2007. – 520 с. 2. Бондаренко Г.Г., Кабанова Т.А., Рыбалко В.В. Основы материаловедения: Учебник для студентов вузов (под ред. Г.Г. Бондаренко). – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2014. – 760 с.

### 5.2. Рекомендуемая дополнительная литература

п/п	Наименование
	1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1977. – 288 с. 2. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела: Учебное пособие. – М.: МГТУ, 2008. – 360 с. 3. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учебник для студентов вузов. – СПб.: Лань, 2003. – 367 с. 4. Бондаренко Г.Г. Радиационная физика, структура и прочность твердых тел: Учебное пособие. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 462 с.

### 5.3. Программное обеспечение

п/п	Наименование	Условия доступа/скачивания
1.	Microsoft Windows 10	Из внутренней сети университета (договор)

2.	Microsoft Office Professional Plus 2010	Из внутренней сети университета (договор)
----	---	---

#### 5.4. Профессиональные базы данных, информационные справочные системы, интернет-ресурсы (электронные образовательные ресурсы)

№ п/п	Наименование	Условия доступа/скачивания
	Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы	
1.	Библиотека НИУ ВШЭ	URL: <a href="https://library.hse.ru/">https://library.hse.ru/</a>
	Интернет-ресурсы (электронные образовательные ресурсы)	
2.	Открытое образование	URL: <a href="https://openedu.ru/">https://openedu.ru/</a>

#### 5.5. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Учебные аудитории для занятий по дисциплине обеспечивают использование и демонстрацию тематических иллюстраций, соответствующих программе дисциплины в составе:

- ПЭВМ с доступом в Интернет (операционная система, офисные программы, антивирусные программы);
- мультимедийный проектор с дистанционным управлением.

#### 6. Особенности организации обучения для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

В случае необходимости, обучающимся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья (по заявлению обучающегося) а для инвалидов также в соответствии с индивидуальной программой реабилитации инвалида, могут предлагаться следующие варианты восприятия учебной информации с учетом их индивидуальных психофизических особенностей, в том числе с применением электронного обучения и дистанционных технологий:

6.1.1. *для лиц с нарушениями зрения:* в печатной форме увеличенным шрифтом; в форме электронного документа; в форме аудиофайла (перевод учебных материалов в аудиоформат); в печатной форме на языке Брайля; индивидуальные консультации с привлечением тифлосурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации.

6.1.2. *для лиц с нарушениями слуха:* в печатной форме; в форме электронного документа; видеоматериалы с субтитрами; индивидуальные консультации с привлечением сурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации.

6.1.3. *для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:* в печатной форме; в форме электронного документа; в форме аудиофайла; индивидуальные задания и консультации.