

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского»

«Утверждаю»

Проректор по научной работе

\_\_\_\_\_ П.В. Прудников

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**Программа вступительного испытания**  
в аспирантуру по специальности

**1.3.11. Физика полупроводников**

Омск

2022

## Раздел I. Общая физика

### 1. Механика

**1.1. Основные законы механики.** Пространство и время в физике. Материальная точка. Инерциальная система отсчета. Явление инерции. Первый закон Ньютона. Движение материальной точки под действием силы. Масса как мера инертности. Второй закон Ньютона. Взаимодействие материальных точек. Третий закон Ньютона. Гравитационное поле. Масса как источник гравитационного поля. Закон всемирного тяготения. Равенство гравитационной и инертной масс. Движение материальной точки относительно неинерциальных систем отсчета. Сила инерции. Сила Кориолиса. Движение абсолютно твердого тела. Вращательное движение. Угловая скорость. Плоское движение. Движение вокруг закрепленной точки. Углы Эйлера. Тензор инерции. Главные оси инерции тела. Уравнения Эйлера.

**1.2. Законы сохранения в механике.** Импульс материальной точки. Закон сохранения импульса. Столкновение тел. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. Момент силы. Движение под действием момента сил. Механическая работа. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия системы материальных точек тела и системы тел. Закон сохранения механической энергии. Связь законов сохранения со свойствами пространства-времени. Роль законов сохранения в механике.

**1.3. Принцип относительности в механике.** Принцип относительности Галилея. Преобразование Галилея. Сложение скоростей в классической физике. Принцип относительности Эйнштейна. Преобразования Лоренца. Сокращение длин и замедление времени. Сложение скоростей в релятивистской физике. Эквивалентность массы и энергии. Импульс и энергия релятивистской частицы. Релятивистское уравнение движения.

**1.4. Механические колебания и волны.** Условие возникновения колебаний. Малые колебания. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс. Колебания в системах связанных тел. Собственные частоты. Волны. Продольные и поперечные волны. Частота, длина волны, закон дисперсии, скорость, поляризация. Плоские и сферические волны. Волновые пакеты. Фазовая и групповая скорости. Элементы акустики.

### 2. Молекулярная физика. Термодинамика и статистическая физика

**2.1. Основные понятия и постулаты термодинамики.** Макроскопическая система. Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества. Термодинамический и статистический методы описания. Термодинамическое состояние и его функции. Состояние термодинамического равновесия. Постулаты термодинамики. Установление термодинамического равновесия в изолированной системе. Равновесные и неравновесные процессы.

**2.2. Начала термодинамики.** Внутренняя энергия, теплота и работа. Первое начало термодинамики. Теплоемкости и скрытые теплоты. Изопроецессы и газовые законы на примере идеального газа и газа Ван дер Ваальса. Циклические процессы, тепловая и холодильная машины. Второе начало термодинамики. Энтропия. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса. Третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста). Поведение термодинамических величин при температуре, стремящейся к абсолютному нулю.

**2.3. Термодинамические потенциалы, условия равновесия и фазовые переходы.** Внутренняя энергия, свободная энергия, потенциал Гиббса, энтальпия. Термодинамические потенциалы для систем с переменной массой. Химический потенциал. Основное соотношение равновесной термодинамики. Условия

термодинамического равновесия. Гомогенная и гетерогенная системы. Общие условия термодинамического равновесия. Необходимые условия равновесия двухфазной однокомпонентной системы. Условия устойчивости равновесия однофазной системы. Принцип Ле Шателье. Фазовые переходы первого рода. Поведение термодинамических величин при фазовых переходах первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Плавление. Сублимация. Испарение и кипение, давление насыщенного пара. Краевой угол. Смачивание. Капиллярные явления. Метастабильные состояния. Тройная точка. Критическая точка. Правило фаз Гиббса. Фазовые переходы второго рода. Поведение физических величин при фазовых переходах второго рода.

**2.4. Основные положения статистической физики.** Фазовое пространство. Ансамбль Гиббса (статистический ансамбль). Функция распределения. Теорема Лиувилля. Микроканоническое распределение. Каноническое распределение Гиббса. Связь статистической суммы со свободной энергией. Распределение Максвелла-Больцмана. Теорема о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы. Теплоемкость классического идеального газа. Неидеальные газы. Газ Ван-дер-Ваальса. Большое каноническое распределение Гиббса. Квантовая статистика. Распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Общие свойства ферми-газов.

**2.5. Физическая кинетика.** Частичные функции распределения. Кинетическое уравнение Больцмана. Диффузия. Законы Фика. Вязкость. Закон Ньютона. Механизмы внутреннего трения (вязкости) в газах, жидкостях, твердых телах. Сверхтекучесть. Теплопроводность. Закон Фурье. Механизмы теплопроводности в газах, жидкостях, твердых телах. Электропроводность. Формула Друде-Лоренца для электропроводности.

### 3. Электричество и магнетизм

**3.1. Основные законы физики электромагнитных явлений.** Электрический заряд и его свойства. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Теорема Гаусса. Обобщение закона Кулона в виде дифференциального уравнения. Потенциальность электрического поля неподвижных зарядов. Потенциал поля точечного заряда. Потенциал системы зарядов. Электрический ток. Магнитное поле тока. Закон Био-Савара-Лапласа. Ток смещения. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Правило Ленца.

**3.2. Электрические цепи.** Сопротивление. Закон Ома. Емкость. Конденсатор. Конденсатор в цепи переменного тока. Сопротивление конденсатора переменному току (емкостное сопротивление). Само- и взаимная индукция. Индуктивность в цепи переменного тока. Индуктивное сопротивление. Электрические цепи. Правила Кирхгофа для постоянных и переменных токов. Сопротивление цепи переменному току. Мощность переменного тока. Переменный ток и его применение. Колебательный контур.

**3.3. Электромагнитные волны.** Волновое уравнение для электромагнитного поля. Плоские монохроматические электромагнитные волны и их основные свойства (частота и волновое число, связь частоты с волновым числом (закон дисперсии), скорость распространения, ориентация полей). Плотность энергии и плотность потока энергии электромагнитного поля. Излучение ЭМВ диполем Герца. Сферические волны.

**3.4. Взаимодействие зарядов и токов с электромагнитным полем.** Сила Лоренца. Движение заряда в электрическом поле. Движение заряда в магнитном поле. Ускорители заряженных частиц. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле (сила Ампера). Магнитный момент замкнутого тока. Взаимодействие магнитного момента с полем. Преобразование энергии в поле переменных токов. Электродвигатели и генераторы переменного тока

**3.5. Материальные среды в электромагнитном поле.** Макроскопические электромагнитные поля в средах. Уравнения Максвелла. Материальные уравнения.

Диэлектрическая и магнитная проницаемости. Диэлектрики. Связанные заряды. Поляризация диэлектриков в электрическом поле. Вектор поляризации. Электрическая восприимчивость (поляризуемость). Полярные и неполярные диэлектрики. Особенности их поведения в постоянных и переменных полях. Магнитные свойства вещества. Вектор намагниченности. Молекулярные токи. Диа-, пара- и ферромагнетики. Магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость. Природа диамагнетизма. Диамагнетизм Ландау. Спиновый магнитный момент. Природа пара- и ферромагнетизма. Применение пара- и ферромагнетизма. Сверхпроводимость. Электрические и магнитные свойства сверхпроводников. Высокотемпературная сверхпроводимость.

## 4. Оптика

**4.1. Геометрическая оптика и фотометрия.** Законы геометрической оптики. Построение изображений в собирающих и рассеивающих тонких линзах. Поперечное увеличение оптических приборов. Оптические приборы: глаз, лупа, микроскоп, телескоп. Геометрическая оптика как предел волновой. Основные фотометрические величины: поток света, сила света, яркость, светимость, освещенность, интенсивность света.

**4.2. Волновая оптика.** Электромагнитная природа света. Поперечность электромагнитных волн. Поляризация, виды поляризации световой волны. Поляризаторы. Закон Малюса. Интерференция света, Двухлучевая и многолучевая интерференция. Когерентность. Оптическая разность хода. Методы получения и расчета интерференционной картины. Классические интерференционные опыты. Интерферометры. Дифракция. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракция Френеля. Дифракция Френеля на круглых отверстиях и препятствиях. Зоны Френеля. Дифракция Фраунгофера. Дифракционные решетки. Расчет дифракционной картины света на решетке.

**4.3. Излучение света.** Классическая физическая модель излучения света. Естественная ширина спектральной линии. Формы спектральной линии. Уширение спектральных линий. Законы Кирхгофа для теплового излучения. Спектральная плотность излучения. Понятие абсолютно черного тела и законы его излучения. Квантовая физическая модель излучения света. Формула Планка для излучения абсолютно черного тела. Спонтанное и вынужденное излучение света атомами.

**4.4. Квантовая оптика.** Фотоны. Фотоэффект, законы фотоэффекта. Формула Эйнштейна для фотоэффекта. Эффект Комптона и его объяснение. Источники когерентного излучения - лазеры. Активная среда. Понятие об отрицательной температуре. Лазер и его принципиальное устройство. Применение лазеров.

**4.5. Распространение света в различных средах.** Отражение света от границы раздела двух изотропных сред: теория Френеля, угол Брюстера. Полное внутреннее отражение. Световоды. Дисперсия света. Электронная теория дисперсии света. Фазовая и групповая скорости света. Закон Бугера. Рассеяние света, рэлеевское рассеяние света. Распространение света в анизотропных средах. Оптические оси. Двойное лучепреломление и его применение. Оптически активные среды, эффект Фарадея в магнитных средах. Нелинейные среды. Эффекты в распространении света в нелинейных средах.

## 5. Атомная физика и квантовая механика

**5.1. Возникновение и развитие квантовых представлений.** Излучение абсолютно черного тела. Квантовая гипотеза Планка. Кванты света. Фотоэффект. Постоянная Планка. Опыты Резерфорда. Классические представления о строении атома, их несостоятельность. Атом водорода по Бору. Пространственное квантование и опыты Штерна-Герлаха. Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де-Бройля. Эффект Комптона. Опыты

Дэвиссона и Джермера. Невозможность классического описания движения микрочастиц. Принцип неопределенности Гейзенберга, его эвристическая ценность.

**5.2. Основные постулаты и принципы квантовой механики.** Наблюдаемые величины и состояния. Волновая функция, ее статистическая интерпретация. Принцип суперпозиции. Матричная механика Гейзенберга. Операторы в квантовой механике. Понятие измерения. Среднее значение физической величины.

**5.3. Эволюция состояний квантовых систем.** Уравнение Шредингера, его стационарные решения. Свойства стационарных состояний. Плотность вероятности, плотность потока вероятности. Симметрия и законы сохранения в квантовой механике.

**5.4. Простейшие и точно решаемые задачи квантовой механики.** Одномерное движение. Туннелирование. Гармонический осциллятор. Движение частицы в центральном поле. Пространственный ротатор. Нерелятивистская теория атома водорода.

**5.5. Теория возмущений.** Стационарная теория возмущений. невырожденный уровень. Вырожденный уровень. Квантовые переходы, вероятность перехода. «Золотое» правило Ферми. Закон сохранения энергии и соотношение неопределенностей энергия-время.

**5.6. Системы тождественных частиц.** Спин. Спиновые волновые функции. Уравнение Паули. Тождественные частицы в квантовой механике. Принцип Паули. Перестановочная симметрия волновых функций. Бозоны и фермионы. Атом гелия. Строение многоэлектронных атомов. Электронные конфигурации. Периодическая система химических элементов. Термы. Правило Хунда. Проявление спин-орбитального взаимодействия. Мультиплетное расщепление термов. Молекула водорода, возникновение химической связи. Перекрытие атомных орбиталей, ковалентность. Связывающие и антисвязывающие молекулярные орбитали. Обменное взаимодействие.

## Раздел II. Физика полупроводников

**1. Зонная теория твердого тела.** Уравнение Шредингера для кристалла, одноэлектронное приближение. Решение уравнения Шредингера для абсолютно свободных, абсолютно связанных и сильно связанных электронов. Зоны разрешенных значений энергии электрона в кристалле. Заполнение разрешенных зон энергии электронами, деление веществ на металлы, диэлектрики и полупроводники. Зоны Бриллюэна. Движение электронов и дырок в кристалле под действием внешних полей, понятие эффективной массы. Элементарная теория примесных состояний.

**2. Статистика электронов в полупроводнике.** Функция распределения в статистике Ферми-Дирака, уровень Ферми. Статистика Максвелла-Больцмана для невырожденного полупроводника. Концентрация свободных носителей заряда и положение уровня Ферми в примесном и собственном полупроводниках. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда и уровня Ферми. Компенсированные полупроводники.

**3. Дефекты в кристаллах.** Вакансии, межузельные атомы, антиструктурные дефекты, атомы примесей, дислокации. Электрическая активность дефектов.

**4. Электропроводность полупроводников.** Элементарная теория электропроводности, время релаксации, длина свободного пробега. Подвижность. Температурная зависимость электропроводности.

**5. Рекомбинация в полупроводниках.** Избыточные носители тока в полупроводнике. Генерация и межзонная рекомбинация носителей, время жизни. Рекомбинация через локальные центры (теория Шокли-Рида). Зависимость времени жизни от концентрации равновесных носителей заряда. Температурная зависимость времени жизни. Уравнение непрерывности.

**6. Гальваномагнитные и термоэлектрические явления.** Элементарная теория эффекта Холла (случаи примесной и смешанной проводимости). Эффект Эттингсгаузена. Изменение электропроводности в магнитном поле. Элементарная теория термоэдс. Явление Томсона, эффект Пельтье.

**7. Полупроводниковые приборы.** Образование электронно-дырочного перехода, контактная разность потенциалов. Толщина и емкость области пространственного заряда. Вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода, диодная теория выпрямления. Зависимость тока насыщения от температуры и от параметров полупроводника. Принцип действия биполярного транзистора. Выражения для постоянных токов, протекающих в транзисторе типа р-п-р, коэффициент переноса в базе неосновных носителей заряда; эффективность эмиттера.

### Литература

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие : в 5 томах / Д. В. Сивухин. — 6-е изд., стереот. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2020 — Том 1 : Механика — 2020. — 560 с. — ISBN 978-5-9221-1512-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185713> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие : в 5 томах / Д. В. Сивухин. — 6-е изд., стереот. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2021 — Том 2 : Термодинамика и молекулярная физика — 2021. — 544 с. — ISBN 978-5-9221-1514-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185719> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие : в 5 томах / Д. В. Сивухин. — 6-е изд., стереот. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2020 — Том 3 : Электричество — 2020. — 565 с. — ISBN 978-5-9221-1643-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185725> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие / Д. В. Сивухин. — 3-е изд., стер. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, [б. г.]. — Том 4 : Оптика — 2002. — 792 с. — ISBN 5-9221-0228-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2314> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие : в 5 томах / Д. В. Сивухин. — 3-е изд., стереот. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2020 — Том 5 : Атомная и ядерная физика — 2020. — 784 с. — ISBN 978-5-9221-0645-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185730> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
6. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие для вузов : в 5 томах / И. В. Савельев. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022 — Том 1 : Механика — 2022. — 340 с. — ISBN 978-5-8114-9196-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/187811> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
7. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие для вузов : в 5 томах / И. В. Савельев. — 6-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022 — Том 3 : Молекулярная физика и термодинамика — 2022. — 212 с. — ISBN 978-5-8114-9197-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/187739> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
8. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 т. Том 2. Электричество и магнетизм : учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. — 6-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань,

2022. — 344 с. — ISBN 978-5-8114-9248-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/189298> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
9. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие для вузов : в 5 томах / И. В. Савельев. — 6-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022 — Том 4 : Волны. Оптика — 2022. — 252 с. — ISBN 978-5-8114-9198-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/187737> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
10. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие : в 5 томах / И. В. Савельев. — 5-е изд. — Санкт-Петербург : Лань, 2021 — Том 5 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц — 2022. — 384 с. — ISBN 978-5-8114-1211-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210611> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
11. Шалимова, К. В. Физика полупроводников : учебник / К. В. Шалимова. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 384 с. — ISBN 978-5-8114-0922-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210524> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
12. Бурбаева, Н. В. Основы полупроводниковой электроники : учебное пособие / Н. В. Бурбаева. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 312 с. — ISBN 978-5-9221-1379-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/5261> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
13. Лебедев, А. И. Физика полупроводниковых приборов / А. И. Лебедев. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 488 с. — ISBN 978-5-9221-0995-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2244> (дата обращения: 28.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

## **Регламент вступительного испытания в аспирантуру по специальности «Физика полупроводников»**

Настоящий Регламент устанавливает порядок проведения вступительного экзамена, структуру экзаменационного билета, время, отводимое на подготовку, и критерии оценивания ответов.

### **I. Порядок проведения**

1. Дата проведения экзамена устанавливается приемной комиссией ОмГУ.
2. Экзамен проходит в устной форме по вопросам, представленным в программе вступительного экзамена.
3. Экзаменационный билет содержит два вопроса – по одному из двух разделов программы.
4. Время, отводимое на подготовку ответов – 1 астрономический час.
5. На экзамене исключается использование справочной литературы, конспектов лекций и помощь коллег.
6. Во время подготовки не разрешается пользоваться средствами передачи и обработки информации (мобильные телефоны, калькуляторы, ноутбуки и т.д.).

## **II. Оценивание ответов**

Критерии оценивания:

Оценка выставляется по 100 бальной шкале. За каждый из вопросов максимальная оценка составляет 50 баллов. Общая оценка определяется суммированием оценок за два вопроса.

Для получения оценки 40-60 баллов экзаменуемый должен изложить ответ на один из двух вопросов билета и знать основные понятия по второму вопросу.

Для получения оценки 60-80 баллов экзаменуемый должен изложить ответы на два вопроса билета. При этом могут отсутствовать выводы основных законов, примеры, иллюстрирующие описываемые явления и т.д.

Для получения оценки 80-100 баллов абитуриент должен полно, последовательно изложить ответы на все вопросы билета.

Критерием для выставления итоговой оценки менее 40 баллов является полное отсутствие ответа хотя бы на один вопрос или незнание основных законов по обоим вопросам билета.

Оценка дифференцируется в указанных пределах в зависимости от полноты ответа, наличия ответов на дополнительные вопросы по темам, обозначенным в билете, умения оперировать расчетными формами и т.д. При выставлении оценки принимаются во внимание профессиональная грамотность ответа, правильное использование понятий, умение полно, структурированно и логично изложить материал.

1. Выставленные оценки заверяются подписями членов экзаменационной комиссии. После оформления протокола экзамена оценки доводятся до сведения поступающих в аспирантуру и даются пояснения по суммарному баллу.
2. Получившие оценки от 30 баллов и выше считаются успешно сдавшими вступительный экзамен