

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
С.А. Никитов
« 18 » *сентября* 2024 г.



ПРОГРАММА
кандидатского экзамена по научной специальности
1.3.11 Физика полупроводников
(физико-математические науки)

Москва, 2024

I. Общие положения

Настоящая программа предназначена для аспирантов и лиц, прикрепленных для сдачи кандидатских экзаменов без освоения программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и содержит требования к кандидатскому экзамену по специальности 1.3.11 Физика полупроводников. Программа разработана на основе типовой программы-минимум кандидатского экзамена по специальности «Физика полупроводников», утвержденной Министерством образования и науки Российской Федерации.

II. Содержание кандидатского экзамена

На кандидатский экзамен выносятся следующий перечень разделов и вопросов.

Химическая связь и атомная структура полупроводников

Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.

Структуры важнейших полупроводников - элементов A^{IV} , A^{VI} и соединений типов $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$.

Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров

Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.

Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).

Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

Методы легирования полупроводников.

Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

Основы зонной теории полупроводников

Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.

Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.

Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.

Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.

Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

Кинетические явления в полупроводниках

Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.

Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

Контактные явления в полупроводниках

Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.

Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе.

Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

Варизонные полупроводники.

8. Свойства поверхности полупроводников

Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация.

Эффект поля.

Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

Оптические явления в полупроводниках

Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса-Кронига.

Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

Поглощение света на свободных носителях заряда.

Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана - Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна - Мандельштама).

Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.

Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поккельса.

Эффект Бурштейна-Мосса.

Эффекты Фарадея и Фойгта.

Фотоэлектрические явления

Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость.

Фоторазогрев носителей заряда.

Фотоэлектромагнитный эффект.

Некристаллические полупроводники

Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники.

Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности.

Легирование некристаллических полупроводников.

Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.

Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.

Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.

Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки

Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.

Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

Принципы действия полупроводниковых приборов

Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов.

Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник

(МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.

Шумы в полупроводниковых приборах.

Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования.

Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.

Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (НЕМТ). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.

III. Список рекомендуемой литературы для подготовки к кандидатскому экзамену

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
2. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
3. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высш. шк., 1975.
4. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
6. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.
7. Мотт Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.

IV. Критерии выставления оценок на кандидатском экзамене

Оценка знаний производится по пятибалльной шкале.

Оценка **«отлично»** выставляется за обстоятельный и глубокий ответ на два вопроса из разных тематических разделов. Аспирант/экстерн грамотно использует научную терминологию, демонстрирует знание источников, выявляет основные тенденции и проблемы, свободно ориентируется в материале, относящемся к предмету.

Оценка **«хорошо»** предполагает правильные и достаточно полные ответы на два вопроса из разных тематических разделов, отсутствие грубых ошибок и упущений, если одновременно допущены отдельные ошибки и у аспиранта/экстерна возникли затруднения при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется при недостаточно полном ответе на основные вопросы, при наличии пробелов в знаниях, а также если у аспиранта/экстерна возникли серьезные затруднения при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется в случае отсутствия необходимых для ответа теоретических знаний.