

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ



УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ

/ В.В. Белокуров /

«21» марта 2024 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

1.3.11 Физика полупроводников

Шифр и наименование области науки

1. Естественные науки

Наименование отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени

Физико-математические науки

Москва 2024

I. Описание программы

Программа-минимум кандидатского экзамена, разработана Физическим факультетом Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова на основе паспорта научной специальности, утвержденного Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 1.3.11 Физика полупроводников, в отрасли физико-математических наук.

II. Основные разделы и вопросы к экзамену

Тема 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников

Электронная структура многоэлектронных атомов. Образование химической связи в твердых телах. Ковалентная, ионная, водородная связи. Взаимодействие Ван-дер-Ваальса.

Кристаллическая структура важнейших полупроводников: элементарных (Si, Ge, P, As, Se, Te) 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.

Дефекты в полупроводниковых материалах. Собственные дефекты (точечные, линейные и двумерные дефекты). Примеси (доноры, акцепторы, амфотерные и изоэлектронные). Химическая природа и электронные свойства примесей.

Тема 2. Основы технологии полупроводников и низкоразмерных структур. 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. Рост из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (MOCVD).

Методы легирования полупроводников.

Методы получения низкоразмерных структур. Методы, основанные на использовании сканирующих зондов. Методы нанолитографии (рентгеновская, электронно-лучевая, ионная, зондовая). Нанопечать. Самоорганизация квантовых точек и нитей при эпитаксии.

Планарная технология (фотолитография, локальная диффузия, ионная имплантация, лазерный отжиг, плазменное травление).

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.

Тема 3. 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.

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.

Тема 4. 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.

Тема 5. 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.

Тема 6. 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.

Тема 7. 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 p - n перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в p - n переходе.

Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

Варизонные структуры.

Тема 8. Свойства поверхности полупроводников

Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация. Примесные состояния в приповерхностных слоях. Осцилляции Фриделя. Оборванные связи. Релаксация и реконструкция поверхностей.

Эффект поля.

Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

Тема 9. 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. Особенности Ван-Хова. 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.

Тема 10. 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.

Тема 11. 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.

Тема 12. Физические явления в низкоразмерных полупроводниковых структурах

Размерное квантование. Квантовые пленки, нити и точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

Баллистический транспорт носителей заряда. Баллистическая проводимость нитей. Универсальная баллистическая проводимость. Квантовая единица проводимости.

Квантовый эффект Холла. Целочисленный квантовый эффект Холла и эффекты локализации. Общее представление о дробном квантовом эффекте Холла. Спиновый эффект Холла.

Одноэлектронное туннелирование. Кулоновская блокада. Эквивалентная схема и вольтамперная характеристика одно- и двухбарьерной структуры. Особенности туннелирования через примесное состояние. Отрицательная туннельная проводимость. Одноэлектронный транзистор.

Структуры с вертикальным переносом. Резонансное туннелирование. вольтамперная характеристика двухбарьерной резонансно-туннельной структуры.

Элементы спинтроники. Спиновая поляризация электронов. Гигантское магнитосопротивление. Спиновый вентиль. Спин-зависимое туннелирование. Расщепление состояний с разной ориентацией спинов. Инжекция, перенос и регистрация спинполяризованных носителей. Общее представление о топологических изоляторах.

Низкоразмерные структуры. Структуры с двумерным электронным газом. Полупроводниковые и полуметаллические пленки. МДП-структуры. Модуляционно-легированные и дельта-легированные структуры. Квантовые ямы. Изопериодические, напряженные и релаксированные сверхрешетки СР. Периодические СР (композиционные, легированные, композиционно-легированные СР). Структуры с одномерным электронным газом. Структуры с нуль-мерным электронным газом.

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 и в квантовых точках, квантово-размерный эффект Штарка.

Тема 13. Принципы действия полупроводниковых приборов

Потенциальный барьер в $p-n$ переходе. Вольтамперная характеристика $p-n$ перехода. Контакт металл-полупроводник. Вольтамперная характеристика барьера Шоттки.

Туннельный диод. Туннелирование в прямозонных и непрямоzonных полупроводниках.

Гетеропереходы и варизонные структуры. Сверхрешетки. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод.

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 солнечной энергии, 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.

Тема 14. Современные полупроводниковые наноструктурные материалы

Наноматериалы. Основные физические причины особенностей свойств наноматериалов.

Квазидвумерные материалы. Графен. Двухслойный графен. Графеновые наноленты. Получение, свойства, применение. Полупроводниковые двумерные кристаллы. Дихалькогениды переходных металлов. Гетероструктуры на основе двумерных материалов.

Углеродные нанотрубки. Получение, свойства, применение.

Фуллерены. Фуллериты. Получение, свойства, применение.

Пористые материалы. Пористый кремний. Получение, свойства, применение. Основные характеристики пористого материала. Пористый оксид алюминия. Свойства и применение.

III. Критерии оценивания

| Критерии и показатели оценивания ответа на экзамене | | | |
|--|--|---|--|
| Неудовлетворительно | Удовлетворительно | Хорошо | Отлично |
| Фрагментарные знания в области физики полупроводников | Неполные знания в области физики полупроводников | Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания в области л физики полупроводников | Сформированные и систематические знания в области физики полупроводников |

IV. Рекомендуемая основная литература

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
2. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.
5. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.
6. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2008.
7. Случинская И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. М.: МИФИ, 2002.
8. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М., «Логос», 2000.
9. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем. СПб.: Наука, 2001.
10. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Данилюк А.Л., Уткина Е.А. Нанoeлектроника: теория и практика. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013.
11. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику. М.: Физматлит, 2002.

V. Рекомендуемая дополнительная литература

1. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высш. школа., 1975.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
3. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
4. Данилина Т.И., Чистоедова И.А. Оборудование для создания и исследования свойств объектов нанoeлектроники. В-Спектр, Томск, 2011.
5. Киреев В.Ю. Нанотехнологии в микроэлектронике. Нанолитография: процессы и оборудование. М.: Издательский дом «Интеллект», 2016.
6. Губин С.П., Ткачев С.В. Графен и родственные нанoформы углерода. М.: URSS ЛИБРОКОМ, 2012
7. Чернозатонский Л.А., Сорокин П.Б. Углеродные нанотрубки: от фундаментальных исследований к нанотехнологиям. Под. ред. Бубнова Ю.Н. М.: Наука, 2007. с. 154-174.
8. Макарова Т.Л., Захарова И.Б. Электронная структура фуллеренов и фуллеритов. С.Петербург. Изд-во «Наука», 2001.
9. Трегулов В.В. Пористый кремний: технология, свойства, применение. Рязань, 2011.
10. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие для студентов старших курсов / Институт физики микроструктур РАН. - Нижний Новгород, 2004.
11. Ivchenko E.L. Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures. Alpha Science International, Ltd. 2005.