

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

ПРОГРАММА
кандидатского экзамена по специальности
01.04.04 «Физическая электроника»
(физико-математические науки)

Москва, 2021

I. Общие положения

Настоящая программа предназначена для аспирантов и лиц, прикрепленных для сдачи кандидатских экзаменов без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и содержит требования к кандидатскому экзамену по специальности 01.04.04 «Физическая электроника». Программа разработана на основе типовой программы-минимум кандидатского экзамена по специальности 01.04.04 «Физическая электроника», утвержденной Министерством образования и науки Российской Федерации.

II. Содержание кандидатского экзамена

На кандидатский экзамен выносятся следующий перечень разделов и вопросов.

Корпускулярная оптика

Законы движения заряженных частиц в статических электрических и магнитных полях. Показатель преломления в корпускулярной оптике. Оптический и механический подходы при решении задач корпускулярной оптики. Законы подобия. Параксиальные пучки. Основные свойства аксиально симметричных электростатических и магнитных полей. Теорема Буша и закон сохранения углового момента. Теорема Лагранжа- Гельмгольца и ее следствия.

Основные типы электростатических линз. Тонкие линзы. Линза-диафрагма. Одиночная линза, иммерсионный объектив и иммерсионная линза. Магнитные линзы. Расчет фокусных расстояний. Линза Глазера. Аберрации линз.

Электронные микроскопы. Общие принципы работы. Особенности электрооптических систем. Корпускулярные микроскопы.

Динамика заряженной частицы в переменных во времени полях; движение частиц в полях электромагнитных волн, захват и ускорение, ускорение на биениях.

Эмиссионная электроника

Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ). Работа выхода. Основное уравнение ТЭЭ. Термоэмиссионный метод прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Вакуумный диод с термокатодом и его вольт-амперная характеристика.

Эмиссия под воздействием частиц. Взаимодействие электронов подпороговых энергий с твердым телом. Упругие взаимодействия, сечения процессов. Спектры вторичных электронов. Оже-электроны. Электронно-стимулированная десорбция.

Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Распыление. Механизмы распыления. Формула Зигмунда для коэффициента распыления. Вторичная ионная эмиссия. Коэффициент вторичной ионной эмиссии. Рассеяние ионов низких и средних энергий. Обратное резерфордовское

рассеяние. Ионно-электронная эмиссия. Потенциальная и кинетическая эмиссия. Ионно-фотонная эмиссия.

Фотоэлектронная эмиссия. Трехступенчатый механизм эмиссии.

Автоэлектронная, экзоэлектронная и взрывная эмиссия.

Вакуумная электроника

Формирование электронных пучков большой плотности. Пушка Пирса. Ограничение тока пространственным зарядом. Предельный ток нейтрализованных пучков – ток Пирса. Устойчивость пучков в дрейфовом пространстве, неустойчивости Пирса, диокотронная и токово-конвективная неустойчивости, слипинг-неустойчивость.

Спонтанное и вынужденное излучение потоков заряженных частиц. Черенковское, циклотронное (синхротронное) и ондуляторное излучения. Нормальный и аномальный эффекты Допплера. Томсоновское рассеяние.

Источники СВЧ-излучения, основанные на вынужденном излучении потоков заряженных частиц: лампа бегущей волны (ЛБВ), магнетроны, гиратроны, убитроны, виркаторы, лазеры на свободных электронах.

Релятивистские эффекты, умножение частоты, параметрические усилители и генераторы.

Волны пространственного заряда. Пространственная и энергетическая группировки потоков частиц. Нелинейные механизмы насыщения излучения – захват частиц в волнах пространственного заряда, сдвиг резонансной частоты излучения. КПД СВЧ-источников излучения.

Электроника твердого тела

Физические основы электроники твердого тела. Особенности динамики электрона в идеальном твердом теле. Волновая функция, квазиимпульс, зоны Бриллюэна, зонный энергетический спектр, закон дисперсии. Энергетический спектр электрона в кристалле во внешних полях (электрическом и магнитном). Полуклассическая модель динамики электрона в кристалле, границы применимости. Дырки как способ описания ансамбля электронов, свойства и законы движения дырок.

Энергетический спектр электрона в ограниченном кристалле. Условия локализации. Локализованные состояния Тамма. Поверхностные состояния Шокли.

Особенности энергетического спектра электронов в тонких пленках (квантовый размерный эффект).

Типы точечных дефектов в кристаллах. Акцепторные и донорные примеси в полупроводниках. Водородоподобная модель примесного центра.

Неупорядоченные системы – аморфные полупроводники. Понятие идеального аморфного твердого тела (идеального стекла). Случайная структура и случайное поле. Энергетический спектр неупорядоченных систем (без случайного поля и со случайным полем). Дефекты в аморфных материалах.

Статистика носителей заряда в полупроводниках. Обоснование

применения статистики Ферми–Дирака к электронам в твердом теле (идеальном). Статистика примесных состояний. Невырожденные и вырожденные полупроводники. Уровень электрохимического потенциала и концентрация свободных и связанных носителей в вырожденных полупроводниках: в собственном, с одним типом примеси, в частично компенсированном. Явление компенсации.

Явления переноса заряда в твердом теле.

Интеграл столкновений. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электропроводность полупроводников и металлов. Электропроводность в сильных электрических полях. Эффект Ганна. Классический и квантовый размерный эффекты в электропроводности.

Электропроводность в неупорядоченных системах. Прыжковая проводимость по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми (закон Мотта) и хвостах плотностисостояний вблизи краев щели подвижности.

Неравновесные носители заряда в полупроводниках и диэлектриках. Генерация и рекомбинация. Механизмы рекомбинации.

Диффузия и дрейф неравновесных носителей, соотношение Эйнштейна. Плотность тока и градиент уровня Ферми. Уравнение непрерывности, анализ частных случаев локального возбуждения и инжекции.

Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело – вакуум.

Контакт металл – полупроводник. Диоды Шоттки. Диодная и диффузионная теория выпрямления.

Электронно-дырочный переход. Количественная теория инжекции и экстракции неосновных носителей. Выпрямление и усиление с помощью р-п переходов. Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п перехода. Туннельный эффект в р-п переходах.

Основные представления о полупроводниковых гетеропереходах, их применение.

Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках

Поглощение и испускание света полупроводниками. Механизмы поглощения. Поглощение и отражение электромагнитных волн свободными носителями заряда. Поглощение и излучение при оптических переходах зона–зона. Прямые и не прямые переходы. Разрешенные и запрещенные переходы. Спектральные характеристики поглощения кристаллами.

Спонтанное и вынужденное излучение. Полупроводниковые лазеры. Оптические свойства аморфных полупроводников. Фотоэффект в р-п переходах. Солнечные батареи. Преобразование электрических сигналов в световые.

Наноэлектроника. Квантовые ямы и сверхрешетки. Квантовые нити и квантовые точки. Электронные состояния в наноструктурах. Транспортные явления в низкоразмерных системах. Оптические свойства наноструктур. Одноэлектронные явления в наноэлектронных устройствах. Нанотехнология. Приборы наноэлектроники.

Физические основы электроники поверхности и пленочной электроники

Энергетическая диаграмма реальной поверхности. Поверхностные состояния. Эффект поля и поверхностная проводимость. Влияние адсорбированных частиц на поверхностную проводимость. Полевые транзисторы.

Проблема микроминиатюризации элементов микроэлектроники. Полупроводниковые, пленочные и гибридные интегральные схемы. Фотолитография, рентгеновская и электронная литографии.

Особенности структуры пленок, связанные с характером зарождения.

Текстурированные и эпитаксиальные пленки. Структурные несовершенства.

Явления переноса в тонких металлических пленках. Дисперсные пленки. Сплошные пленки. Размерные эффекты в пленках.

Тонкие диэлектрические и полупроводниковые пленки. Диэлектрические потери.

Токопрохождение через диэлектрические слои. Туннелирование. Надбарьерная эмиссия электронов. Токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ).

Пленочные активные элементы. Использование неравновесных (горячих) электронов в металлических пленках. Активные элементы, основанные на использовании характеристик с отрицательным сопротивлением. Аналоговые триоды на основе ТОПЗ в диэлектриках. Пленочный полевой триод.

Методы анализа поверхности и тонких пленок

Методики определения плотности поверхностных состояний, основанные на эффекте поля (C-V метод и метод, основанный на изменении поверхностной проводимости).

Основы энергоанализа заряженных частиц. Основные типы энергоанализаторов. Методы регистрации частиц. Вторичный электронный умножитель. Детекторы для быстрых частиц (поверхностно-барьерный детектор).

Дифракция медленных и быстрых электронов (на просвет и отражение) как методы исследования структуры поверхности.

Электронная Оже-спектроскопия. Основное уравнение. Методы количественной Оже-спектроскопии.

Фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС и УФЭС). Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС или ЭСХА - электронная спектроскопия для химического анализа) и конструкции приборов. Химические сдвиги уровней. Количественная РФЭС.

Спектроскопия характеристических потерь энергии (СХПЭЭ). Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в твердом теле. Количественная СХПЭЭ.

Растровая электронная микроскопия. Режимы работы. Особенности

формирования контраста. Рентгеновский микроанализ.

Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы. Применения.

Методы ионной спектроскопии. Масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ). Стигматический и растровый режим МСВИ. Ионно-нейтрализационная спектроскопия. Обратное резерфордское рассеяние. Спектроскопия рассеяния ионов низких и средних энергий.

Функциональная электроника

Магнетоэлектроника. Цилиндрические магнитные домены. Магнитные запоминающие устройства: на ферритах и на тонких пленках.

Акустоэлектроника: взаимодействие электронов с длинно-волновыми акустическими колебаниями решетки, акустоэлектрический эффект, усиление ультразвуковых волн. Акустоэлектрические явления на поверхностных волнах и их практические применения – малогабаритные линии задержки, усилители и генераторы электрических колебаний.

Молекулярная электроника. Основные принципы молекулярной электроники. Электронные возбуждения, используемые для передачи и хранения информации в молекулярных системах. Перспективы одномерных и квазиодномерных систем, структурная неустойчивость одномерных проводников, переходы Пайерлса и Мотта-Хаббарда. Электронные возбуждения в одномерных системах, солитонная проводимость. Фотопроводимость, нелинейные оптические свойства. Молекулярные полупроводники – полиацетилен и полидиацетилен: структура, свойства, легирование. Приборы молекулярной электроники.

Криоэлектроника. Электронные свойства твердых тел (металлы, диэлектрики, полупроводники) при низких температурах. Явление сверхпроводимости. Эффект Мейснера. Особенности туннелирования в условиях сверхпроводимости.

Высокотемпературная сверхпроводимость. Свойства и параметры сверхпроводников высокой T_c .

Макроскопические квантовые эффекты сверхпроводимости. Квантование магнитного потока. Эффект Джозефсона. Типы джозефсоновских переходов. Аналоговые устройства на эффектах Джозефсона. Стандарты напряжения, сквиды, приемные СВЧ-устройства.

Цифровые ячейки логики и памяти. Проблемы создания больших интегральных схем

(БИС). Особенности электронных устройств на высокотемпературных сверхпроводниках.

III. Список рекомендуемой литературы для подготовки к кандидатскому экзамену

1. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика, Л.: Наука 1968.
2. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский

микроанализ / Дж. Голдстейн и др. Кн. 1, 2. М.: Мир, 1984.

3. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.

4. Жеребцов И.П. Основы электроники. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

5. Добрецов Л.Н., Гомаюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.

6. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984.

7. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков / А.А. Рухадзе и др. М.: Атомиздат, 1980.

8. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987.

9. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Вынужденное излучение сильноточных релятивистских электронных пучков // УФН. 1987. Т. 152. Вып. 2.

10. Епифанов Е.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986.

11. Гусева М.Б., Дубинина Е.М. Физические основы твердотельной электроники. М.: Изд-во МГУ, 1986.

12. Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М.: Мир, 1982. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972. Палатник Л.С., Папилов И.И. Эпитаксиальные пленки. М.: Наука, 1971.

13. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. Методы анализа поверхности. Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. Гл. 3 – 5. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978.

14. Электронная и ионная спектроскопия твердого тела / Под ред. Л. Фирменса. М.: Мир, 1981.

15. Анализ поверхности методами Оже и РФЭС / Под ред. А. Бригса, М.В. Сиха. М.: Мир, 1987.

16. Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности // УФН. 1988. Т.154, вып.

17. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ВЭА. М.: Сов. радио, 1979.

18. Ван Дузер Т., Тренер Ч.У. Физические основы сверхпроводящих устройств и цепей. М.: Радио и связь, 1984.

19. Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость позавчера, вчера, сегодня, завтра // УФН. 2000. Т. 170. Максомов Е.Г. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние // УФН. 2000. Т. 170.

20. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. М., 2000.

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 серьёзные затруднения при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

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