

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН**

**«УТВЕРЖДАЮ»**

**И.О. Директора**

\_\_\_\_\_ **С.А. Никитов**

«    » \_\_\_\_\_ **2014 г.**

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**  
**кандидатского экзамена по специальности**  
**01.04.04 "Физическая электроника"**  
**по физико-математическим и техническим наукам**

## **Введение**

Настоящая программа базируется на основополагающих разделах физической электроники: корпускулярной оптике, эмиссионной электронике, вакуумной электронике, твердотельной электронике, электронике поверхностей и пленок и функциональной электронике.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по физике при участии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

### **1. Корпускулярная оптика**

1.1. 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\**.

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

1.3. Электронные микроскопы. Общие принципы работы. Конструкции электронных микроскопов. *Особенности электрооптических систем. Корпускулярные микроскопы.*

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

### **2. Эмиссионная электроника**

2.1. 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.

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

2.3. 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 резерфордское рассеяние. *Ионно-электронная эмиссия.*

*Потенциальная и кинетическая эмиссия. Ионно-фотонная эмиссия.*

2.4. Фотоэлектронная эмиссия. *Трехступенчатый механизм эмиссии.*

2.5. Автоэлектронная, экзоелектронная и взрывная эмиссия.

### **3. Вакуумная электроника**

3.1. 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, слиппинг-неустойчивость.*

3.2. Спонтанное и вынужденное излучение потоков заряженных частиц. Черенковское, циклотронное (синхротронное) и ондуляторное излучения. Нормальный и аномальный

эффекты Доплера. Томсоновское рассеяние.

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

3.4. Релятивистские эффекты, умножение частоты, параметрические усилители и генераторы.

3.5. 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.*

## 4. Электроника твердого тела

4.1. 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.

4.2. 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 плотности состояний вблизи краев щели подвижности.*

4.3. 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.

4.4. Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело - вакуум.

Контакт металл - полупроводник. Диоды Шоттки. Диодная и диффузионная теории выпрямления.

Электронно-дырочный переход. Количественная теория инжекции и экстракции неосновных носителей. Выпрямление и усиление с помощью *p-n* переходов. Статическая

вольт-амперная характеристика (ВАХ) *p-n* перехода. Туннельный эффект в *p-n* переходах.

Основные представления о полупроводниковых гетеропереходах, их применение.

4.5. 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 непрямые переходы. Разрешенные и запрещенные переходы. Спектральные характеристики поглощения кристаллами.

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

4.6. Нанoeлектроника. Квантовые ямы и сверхрешетки. Квантовые нити и квантовые точки. Электронные состояния в наноструктурах. *Транспортные явления в низкоразмерных системах.* Оптические свойства наноструктур. *Одноэлектронные явления в нанoeлектронных устройствах.* *Нанотехнология.* Приборы нанoeлектроники.

## **5. Физические основы электроники поверхности и пленочной электроники**

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

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

5.3. Особенности структуры пленок, связанные с характером зарождения.

5.4. Текстурированные и эпитаксиальные пленки. Структурные несовершенства.

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

5.6. Тонкие диэлектрические и полупроводниковые пленки. *Диэлектрические потери.*

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

5.8. 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.*

## **6. Методы анализа поверхности и тонких пленок**

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

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

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

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

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

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

Количественная СХПЭЭ.

6.7. Растровая электронная микроскопия. Режимы работы. Особенности формирования контраста. Рентгеновский микроанализ. Конструкции растровых электронных микроскопов и микроанализаторов.

6.8. Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы. Конструкция микроскопов. Применения.

6.9. *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.*

## 7. Функциональная электроника

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

7.2. 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.

7.3. 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 полидиациетилен: структура, свойства, легирование. Приборы молекулярной электроники.*

7.4. Кривоэлектроника. 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 с высокой  $T_k$ .

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.

## Основная литература

Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика, Л.: Наука 1968.

Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Голдстейн и др. Кн. 1, 2. М.: Мир, 1984.

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

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

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

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

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

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

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

- Епифанов Е.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986.
- Гусева М.Б., Дубинина Е.М. Физические основы твердотельной электроники. М.: Изд-во МГУ, 1986.
- 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.
- 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.
- Электронная и ионная спектроскопия твердого тела / Под ред. Л. Фирменса. М.: Мир, 1981.
- Анализ поверхности методами Оже и РФЭС / Под ред. А. Бригса, М.В. Сиха. М.: Мир, 1987.
- Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия - от рождения к юности // УФН. 1988. Т.154, вып.
- Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ВЭА. М.: Сов. радио, 1979.
- Ван Дузер Т., Тренер Ч.У. Физические основы сверхпроводящих устройств и цепей. М.: Радио и связь, 1984.
- Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость позавчера, вчера, сегодня, завтра // УФН. 2000. Т. 170.
- Максомов Е.Г. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние // УФН. 2000. Т. 170.
- Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. М., 2000.

СОГЛАСОВАНО:

Ученый секретарь ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН

\_\_\_\_\_  
И.И.Чусов

Заведующий отделом аспирантуры, докторантуры и стажировки

\_\_\_\_\_  
И.Е. Кузнецова