

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)



УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

«14» января 2025 г.

**ПРОГРАММА  
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА  
по научной специальности  
1.3.5 Физическая электроника**

Санкт-Петербург

2025 г.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'А. Селев', is located at the bottom right of the page.

## 1. Общие сведения

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

Кандидатский экзамен проводится в устной форме и состоит из 2-х вопросов по билету и презентации по теме диссертационного исследования о выполненной работе за период обучения в аспирантуре, в соответствии с индивидуальным планом работы.

## 2. Корпускулярная оптика

2.1. 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.*

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

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

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

## 3. Эмиссионная электроника

3.1. 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.

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

3.3. 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.*

3.4. Фотоэлектронная эмиссия. *Трехступенчатый механизм эмиссии.*

3.5. Автоэлектронная, экзоэлектронная и взрывная эмиссия.

## 4. Вакуумная электроника

4.1. 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, слипинг-неустойчивость.*

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

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

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



4.5. 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.*

## 5. Электроника твердого тела

### 5.1. 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.

### 5.2. 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.*

5.3. 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.

### 5.4. 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 р-п переходов. Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п перехода. Туннельный эффект в р-п переходах.

Основные представления о полупроводниковых гетеропереходах, их применение.

### 5.5. 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 не прямые 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.

5.6. 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.

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

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

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

6.3. *Особенности структуры пленок, связанные с характером зарождения*.

6.4. Текстурированные и эпитаксиальные пленки. Структурные несовершенства.

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

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

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

6.8. 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*.

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

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

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

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

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

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

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

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

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



7.9. *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.*

## **8. Функциональная электроника**

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

8.2. 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.

8.3. 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 полидиацетилен: структура, свойства, легирование. Приборы молекулярной электроники.*

8.4. 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 с высокой  $T_k$ .

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

Цифровые ячейки логики и памяти. Проблемы создания больших интегральных схем (БИС). Особенности электронных устройств на высокотемпературных сверхпроводниках.

*В программе для физико-математических наук исключаются вопросы конструкции приборов, набранные жирным шрифтом, а в программе для технических наук исключаются вопросы, набранные курсивом.*

### **Вопросы для подготовки к сдаче кандидатского экзамена:**

1. Особенности динамики электронов в идеальном твердом теле. Теорема Блоха. Волновая функция. Квазиимпульс. Зонный энергетический спектр.

2. Методы ионной спектроскопии: масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ). Стигматический и растровый режимы МСВИ.

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

4. Основные типы электростатических линз. Тонкие линзы. Линза диафрагма.

5. Статистика носителей заряда в полупроводниках. Обоснование применения статистики Ферми-Дирака к электронам в идеальном твердом теле. Примесные состояния. Невырожденные и вырожденные полупроводники.

6. Электронные микроскопы. Общие принципы работы. Особенности электронооптических систем.

7. Энергетическая диаграмма поверхности. Поверхностные состояния. Эффект поля и поверхностная проводимость.

8. Фотоэлектронная эмиссия. Трехступенчатый механизм эмиссии.

9. Автоэлектронная и взрывная эмиссия.



10. Законы движения заряженных частиц в статических и магнитных полях. Показатель преломления в корпускулярной оптике. Параксиальные пучки.
11. Квантовые ямы, нити и сверхрешетки. Электронные состояния в наноструктурах.
12. Магнитные линзы. Расчет фокусных расстояний. Аберрации линз.
13. Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело-вакуум.
14. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Распыление. Механизм распыления. Формулы для коэффициента распыления.
15. Ионно-электронная эмиссия. Потенциальная и кинетическая эмиссия.
16. Основные свойства аксиально-симметричных электростатических и магнитных систем электронной и ионной оптики.
17. Особенности энергетического спектра электронов в тонких пленках (квантовый размерный эффект).
18. Основы энергоанализа заряженных частиц. Основные типы энергоанализаторов.
19. Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ). Работа выхода. Основное уравнение ТЭЭ. Термоэмиссионный метод прямого преобразования энергии в электрическую.
20. Основные типы анализаторов энергии заряженных частиц и методы диагностики на их основе. Обратное Резерфордское рассеяние.
21. Поглощение и испускание света полупроводниками. Механизмы поглощения. Поглощение и излучение при оптических переходах зона-зона.
22. Методы регистрации частиц. Вторичный электронный умножитель. Детекторы для быстрых частиц (поверхностно-барьерный детектор).
23. Спонтанное и вынужденное излучение. Полупроводниковые лазеры.
24. Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы и конструкции микроскопов.
25. Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в атомах и твердом теле.
26. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Химические сдвиги уровней. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА).
27. Взаимодействие электронов с твердым телом. Спектры вторичных электронов. Оже-электроны. Электронно-стимулированная десорбция.
28. Дифракция медленных электронов как метод исследования структуры поверхности.
29. Зоны Бриллюэна. Зонный энергетический спектр твердых тел. Закон дисперсии.
30. Электронная Оже-спектроскопия. Основное уравнение. Методы количественной Оже-спектроскопии.
31. Строение атома. Принцип Паули. Классификация уровней в атоме. Электронные переходы в атоме: излучательные переходы, автоионизация, Ожэ-эффекты.
32. Исследование структуры кристаллов методом Резерфордского рассеяния ионов и атомов.
33. Основные типы элементарных процессов при столкновениях электронов и ионов с атомами. Упругое рассеяние, возбуждение, ионизация.
34. Исследования переходов между уровнями в атомах методами оптической и электронной спектроскопии.
35. Классификация уровней двухатомной молекулы. Колебательное и вращательное возбуждение. Электронные переходы в молекуле. Энергия диссоциации.
36. Методы описания элементарных процессов столкновений атомных частиц при разных энергиях: борновское приближение, адиабатическое приближение, атомный и молекулярный базис.
37. Фотопроцессы. Взаимодействие квантов излучения с атомами и молекулами.
38. Модель квазимолекулы для столкновения атомных частиц (ионов, атомов) друг с другом при малых энергиях. Корреляционные диаграммы Фано-Лихтена. Неадиабатические переходы в квази-молекуле.
39. Модели межатомных потенциалов. Обратная задача рассеяния.



40. Экспериментальные методы исследования элементарных процессов атомных столкновений: Анализ зарядовых состояний и потерь энергии, электронная спектроскопия, методы совпадений.

41. Столкновения электронов с атомами и молекулами. Возбуждение, ионизация. Мультипольности переходов, автоионизационные состояния. Пороговое поведение сечений процессов.

42. Методы исследования элементарных процессов взаимодействия частиц путём использования пересекающихся, совмещённых, догоняющих пучков. Создание газовых мишеней: струйной, атомарной из молекулярных газов. Обеспечение условий однократности столкновений.

### Литература

1. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика, Наука, Л., 1968, 486 с.
2. Голдстейн Дж. И др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ, кн. 1 и 2, Мир, 1984.
3. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии, М., Мир, 1985, 494 с.
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, 432 с.
7. Рухадзе А.А. и др. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков, М., Атомиздат, 1980.
8. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах, М., Мир, 1987, 238 с.
9. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Вынужденное излучение сильноточных релятивистских электронных пучков. УФН, 1987, т.152, вып.2, 285-316 с.
10. Епифанов Е.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника, М., Высшая школа, 1986, 303 с.
11. Гусева М.Б., Дубинина Е.М. Физические основы твердотельной электроники, М., МГУ, 1986, 311 с.
12. Аморфные полупроводники. Под ред. М. Бродски, М., Мир, 1982.
13. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках, М., Мир, 1972, 435 с.
14. Палатник Л.С., Папилов И.И. Эпитаксиальные пленки, М., Наука, 1971, 480 с.
15. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах, М., Мир, 1973.
16. Методы анализа поверхности. Под ред. Зандерны А., М., Мир, 1979, гл.3,4,5.
17. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц, Наука, 1978.
18. Электронная и ионная спектроскопия твердого тела. Под. Ред. Фирменса Л., М., Мир, 1981.
19. Анализ поверхности методами Оже и РФЭС. Под ред. Бригса А. И Сиха М.В., м., Мир, 1987.
20. Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности, УФН. 1988, т.154, вып.
21. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ВЭА, М., Советское радио, 1979, 352 с.
22. Ван Дусер Т., Тренер Ч.У. Физические основы сверхпроводящих устройств и цепей, М., Радио и связь, 1984.
23. Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость позавчера, вчера, сегодня, завтра. Успехи физических наук, т. 170, с. 619-630 (2000).
24. Максомов Е.Г. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние. Успехи физических наук, т. 170, с. 1033-1061 (2000).
25. Шмидт. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ. МНО. Москва, 2000.