



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Физический факультет**



**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по научной работе  
и инновациям  
Анурбеков Н.А.

«29» сентября 2022 г.

**ПРОГРАММА - МИНИМУМ**  
кандидатского экзамена по подготовке кадров высшей квалификации по  
направлению 03.06.01 «Физика и астрономия»  
(физико-математические науки)

**Направленность (профиль) программы**

**1.3.5 - Физическая электроника**

**Махачкала – 2022**

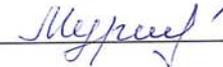
Программа – минимум кандидатского экзамена по направлению 03.06.01 – Физика и астрономия, направленность (профиль) программы 1.3.5 - «Физическая электроника» составлена в 2022 году на основе паспорта научной специальности и учебного плана ДГУ по образовательной программе подготовки аспирантов.

Разработчики кафедра физической электроники, кафедра общей физики  
Ашурбеков Н.А., д.ф.-м.н., профессор   
Курбанисмаилов В.С., д.ф.-м.н., профессор 

Программа – минимум кандидатского экзамена одобрена: на заседании ученого совета физического факультета от «30» июня 2022 г., протокол №10

Председатель совета  Курбанисмаилов В.С.  
«29» июня 2022 г

на заседании Методической комиссии физического факультета от «29» июня 2022 г., протокол №10

Председатель  Ж.Х. Мурлиева

Программа – минимум кандидатского экзамена по направлению 03.06.01 Физика и астрономия согласована с Управлением аспирантуры и докторантуры  
«26» 09 2022 г.

Начальник Управления  Э.Т. Рамазанова

ПРОГРАММА-МИНИМУМ  
кандидатского экзамена по специальности  
**1.3.5 «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.

### **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, экзоэлектронная 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, слипинг-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 р-п переходов. Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п перехода. Туннельный эффект в р-п 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 р-п 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 полидиацетилен: 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.

## Литература

### *а) основная литература*

1. Арцимович Л.А. и Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.: [Учебное пособие для физ. специальностей ун-тов]. / Арцимович Л.А. и Лукьянов С.Ю. - М.: Наука., 1972. - 224с. с илл.
2. Сборник задач и расчётов по физической электронике: [учеб. пособие для физ. и радиопиз. фак. ун-тов УССР] / Левитский, Сергей Михайлович. - Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1964. - 211 с.; 21 см. + черт. - 0-37.
3. Основы физики и техники ускорителей: учебное пособие для физ. спец. вузов, в 3-х томах. Т. 2.: Циклические ускорители / Лебедев, Андрей Николаевич, Шальнов, Александр Всеволодович. - М.: Энергоиздат, 1982. - 239 с.: ил.; 21 см. - 0-0.
4. Бродский А.М., Гуревич Ю.Я. Теория электронной эмиссии из металлов. / Бродский А.М., Гуревич Ю.Я. - М.: "Наука.", 1973. - 255с.
5. Эмиссионная электроника / Н. Н. Коваль; под ред. Ю.С. Протасова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 595 с. - (Серия Электроника. Прикладная электроника/ под общ. ред. И.Б. Федорова). - Библиогр.: с. 593. - ISBN 978-5-7038-3347-6: 1500-00.
6. Антонова О.А., Глудкина О.П. и др. Электроника и основы электроники. /Под ред. О.П. Глудкина. - М.: Высшая школа, 1993. - 445 с.

7. Валухов Д.П. Физические основы электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д.П. Валухов, Р.В. Пигулев. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2014. — 135 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/63253.html> (дата обращения: 20.10.2021).
8. Чехлова Т.К. Учебное пособие по курсу «Физическая электроника» для преподавания с использованием мультимедийных технологий [Электронный ресурс] / Т.К. Чехлова. — Электрон. текстовые данные. — М.: Российский университет дружбы народов, 2013. — 124 с. — 978-5-209-04770-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22155.html> (дата обращения: 20.10.2021).
9. Толмачев В.В. Физические основы электроники [Электронный ресурс] / В.В. Толмачев, Ф.В. Скрипник. — Электрон. текстовые данные. — Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. — 496 с. — 978-5-93972-889-8. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16656.html> (дата обращения: 20.10.2021).
10. Аристов А.В. Физические основы электроники. Сборник задач и примеры их решения [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / А.В. Аристов, В.П. Петрович. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2015. — 100 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55211.html> (дата обращения: 20.10.2021).
11. Мамыкин А.И. Контактные явления в полупроводниках. Часть 2 [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие по курсу «Физические основы электроники» / А.И. Мамыкин, А.А. Рассадина. — Электрон. текстовые данные. — СПб.: Университет ИТМО, 2014. — 38 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67224.html> (дата обращения: 20.10.2021).
12. Легостаев, Н.С. Твердотельная электроника: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. - Томск: Эль Контент, 2011. - 244 с. - ISBN 978-5-4332-0021-0; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208951> (дата обращения: 20.10.2021).
13. Электронная и ионная спектроскопия твердого тела / Под ред. Л. Фирменса. М.: Мир, 2001.

***б) дополнительная литература***

1. Капцов, Н.А. Электроника: допущено в качестве учебного пособия для гос. университетов / Н. А. Капцов. - М.: Госиздат технико-теоретической, 1953. - 467 с. - 0-0.
2. Мутаева, Гайбат Ихласовна. Лекции по эмиссионной электронике: учеб. пособие / Мутаева, Гайбат Ихласовна; Федерал. агентство по образованию, Дагест. гос. ун-т. - Махачкала: ИПЦ ДГУ, 2006. - 81 с. - 46-50.
3. Классификация и параметры катодов: учеб. пособие / [сост. Г.И. Мутаева, Х.И. Аджиева]; Федерал. агентство по образованию, Дагест.

- гос. ун-т. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Махачкала: Изд-во ДГУ, 2009. - 28 с. - 19-00.
4. Инжекционная газовая электроника / [Ю.И. Бычков, Ю.Д. Королев, Г.А. Месяц и др.]; Отв. ред. О.Б. Евдокимов; [Предисл. Г.А. Месяца]. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. - 239 с.: ил.; 21 см. - Библиогр.: с. 220-237 (301назв.). - В пер.: 2-70.
  5. Давыдов, В.Н. Физические основы оптоэлектроники: учебное пособие / В.Н. Давыдов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники (ТУСУР). - Томск: ТУСУР, 2013. - 139 с.: ил., схем. - Библиогр. в кн.; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480528> (дата обращения: 26.06.2018).
  6. Максомов Е.Г. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние // УФН. 2000. Т. 170.
  7. Анализ поверхности методами Оже и РФЭС / Под ред. А. Бригса, М.В. Сиха. М.: Мир, 1987.
  8. Пермин Е.В., Сейдман А.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2010 г.
  9. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984.

#### **в) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы**

1. Электронно-библиотечная система (ЭБС) IPRbooks ([www.iprbookshop.ru](http://www.iprbookshop.ru)). Лицензионный договор № 6984/20 на электронно-библиотечную систему IPRbooks от 02.10.2020 г. Срок действия договора со 02.10.2020 г. по 02.10.2021 г.
2. Электронно-библиотечная система (ЭБС) «Университетская библиотека онлайн»: [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru). Договор об оказании информационных услуг № 131-09/2010 от 01.10.2020г. Срок действия договора с 01.10.2020 до 30.09.2021 г. 537 наименований.
3. Электронно-библиотечная система «ЭБС ЛАНЬ <https://e.lanbook.com/>. Договор №СЭБ НВ-278 на электронно-библиотечную систему ЛАНЬ от 20.10.2020 г. Срок действия договора со 20.10.2020 г. по 31.12.2023г.
4. Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru>. Лицензионное соглашение № 844 от 01.08.2014 г. Срок действия соглашения с 01.08.2014 г. без ограничения срока.
5. Национальная электронная библиотека <https://нэб.рф/>. Договор №101/НЭБ/101/НЭБ/1597 о предоставлении доступа к Национальной электронной библиотеке от 1 августа 2016 г. Срок действия договора с 01.08.2016 г. без ограничения срока. Договор может пролонгироваться неограниченное количество раз, если ни одна из сторон не желает его расторгнуть.
6. **Web of Science:** Web of Science Core Collection базы данных Clarivate. Срок действия до 31.01.2021 г. Письмо РФФИ от 07.07.2020 г. № 692 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных Clarivate в 2020 г. [webofknowledge.com](http://webofknowledge.com)

7. **ProQuest Dissertation Theses Global** База данных ProQuest Dissertations and Theses Global Full Text компании ProQuest. Срок действия до 31.01.2021 г. Письмо РФФИ от 10.11.2020 г. № 1268 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию базы данных ProQuest Dissertations and Theses Global Full Text компании ProQuest в 2020 г. <http://search.proquest.com/>
8. **Wiley Online Library**  
Коллекция журналов Freedom Collection издательства Elsevier. Срок действия до 31.01.2021 г. Письмо РФФИ от 17.07.2010 г. № 742 о предоставлении лицензионного доступа к электронному ресурсу Freedom Collection издательства Elsevier в 2020 г. <https://onlinelibrary.wiley.com/>
9. **Международное издательство Springer Nature**  
Коллекция журналов, книг и баз данных издательства Springer Nature. Срок действия до 31.01.2021 г. Письмо РФФИ от 17.07.2020 г. № 743 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных издательства Springer Nature в 2020 г. на условиях национальной подписки <https://link.springer.com/>
10. **ЭР Кембриджского центра структурных данных.** Базы данных CSD-Enterprise компании The Cambridge Crystallographic Data Centre Срок действия до 31.01.2021 г. Письмо РФФИ от 02.11.2020 г. № 1226 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных компании The Cambridge Crystallographic Data Centre в 2020 г. на условиях национальной подписки <http://webedsd.ccdc.cam.ac.uk/>.
11. **Журнал Science (AAAS)** <http://www.sciencemag.org/>
12. **Журналы издательства SAGE Publications** <http://journals.sagepub.com/>
13. **Библиотека РФФИ** <http://www.rfbr.ru/rffi/ru/library>
14. **Университетская информационная система РОССИЯ**  
<https://uisrussia.msu.ru/>
15. **Единое окно** <http://window.edu.ru/>
16. **Дагестанский региональный ресурсный центр** <http://rrc.dgu.ru/>
17. **Нэикон** <http://archive.neicon.ru/>
18. **Федеральный портал «Российское образование»** <http://www.edu.ru/> (единое окно доступа к образовательным ресурсам).
19. **Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов»** <http://school-collection.edu.ru/>
20. **Российский портал «Открытого образования»** <http://www.openet.edu.ru>
21. **Сайт образовательных ресурсов Даггосуниверситета** <http://edu.icc.dgu.ru>
22. **Информационные ресурсы научной библиотеки Даггосуниверситета** <http://elib.dgu.ru> (доступ через платформу Научной электронной библиотеки elibrary.ru).