



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

Физико-технический факультет

Утверждена на Ученом совете
ФГБОУ ВО «Дагестанский
государственный университет»

прот. № 5 от 29.01 2026 г.

Ректор университета
Рабаданов М.Х.




ПРОГРАММА -МИНИМУМ
кандидатского экзамена в аспирантуру по подготовке научных и
научно-педагогических кадров
(физико-математические науки)

Направленность (профиль) программы

1.3.5 Физическая электроника

Махачкала - 2026

Программа – минимум кандидатского экзамена по направлению 03.06.01 – Физика и астрономия, направленность (профиль) программы 1.3.5 - **Физическая электроника** составлена в 2025 году на основе паспорта научной специальности и учебного плана ДГУ по образовательной программе подготовки аспирантов.

Разработчики кафедры 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 физико-технического факультета от «26» декабря 2025 г., протокол №4

Председатель совета  В.С. Курбанисмаилов

На заседании Методической комиссии физико-технического факультета от «24» декабря 2025 г., протокол №4

Председатель  Ж.Х. Мурлиева

Программа – минимум кандидатского экзамена по направлению 03.06.01 Физика и астрономия согласована с Управлением аспирантуры и докторантуры «23» 12 2025 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. Одиочная 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. 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, 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 радиофиз. 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. Валюхов, Д. П. Физические основы электроники: учебное пособие / Д. П. Валюхов, Р. В. Пигулев. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2014. — 135 с. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/63253.html> (дата обращения: 21.01.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

8. Чехлова, Т. К. Учебное пособие по курсу «Физическая электроника» для преподавания с использованием мультимедийных технологий / Т. К. Чехлова. — Москва : Российский университет дружбы народов, 2013. — 124 с. — ISBN 978-5-209-04770-4. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/22155.html> (дата обращения: 21.01.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

9. Толмачёв, В. В. Физические основы электроники / В. В. Толмачёв, Ф. В. Скрипник. — 2-е изд. — Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. — 496 с. — ISBN 978-5-4344-0753-3. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/92021.html> (дата обращения: 21.01.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

10. Аристов, А. В. Физические основы электроники. Сборник задач и примеры их решения: учебно-методическое пособие / А. В. Аристов, В. П. Петрович. — Томск: Томский политехнический университет, 2015. — 100 с. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/55211.html> (дата обращения: 21.01.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

11. Легостаев, Н. С. Твердотельная электроника: учебное пособие / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов. — Томск: Эль Контент, 2011. — 244 с. — Режим доступа: по подписке. — URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208951> (дата обращения: 21.01.2025). — ISBN 978-5-4332-0021-0. — Текст: электронный.

12. 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; Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). – Томск: ТУСУР, 2013. – 139 с. : ил., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480528> (дата обращения: 21.01.2025). – Библиогр. в кн. – Текст: электронный.

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). Лицензионный договор № 6984/20 на электронно-библиотечную систему IPRbooks от 01.10.2025 г. Срок действия договора со 01.10.2025 г. по 01.10.2026 г.

2. Электронно-библиотечная система (ЭБС) «Университетская библиотека онлайн»: www.biblioclub.ru. Договор об оказании информационных услуг № 131-09/2010 от 29.09.2025г. Срок действия договора с 29.09.2025 по 30.09.2026 г. 1757 наименований.

3. Электронно-библиотечная система «ЭБС ЛАНЬ» <https://e.lanbook.com/>. Договор №32515578602-ЕП на электронно-библиотечную систему ЛАНЬ от 29.12.2025 г. Срок действия договора с 29.12.2025 г. по 29.12.2026г.

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. Национальная электронная библиотека <https://нэб.рф/>. Договор №101/НЭБ/101/НЭБ/1597 о предоставлении доступа к Национальной электронной библиотеке от 1 августа 2020 г. Срок действия договора с 16.12.2020 г. без ограничения срока. Договор может пролонгироваться неограниченное количество раз, если ни одна из сторон не желает его расторгнуть.

5. Springer Nature. Письмо РЦНИ от 17.10.2022 г. № 1354 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных издательства Springer Nature на условиях национальной подписки. Доступ к журналам – бессрочно. <http://link.springer.com/>

6. Журнал «Успехи физических наук». Письмо РЦНИ от 09.11.2022 № 1471 о предоставлении лицензионного доступа к электронной версии журнала "Успехи физических наук" в 2022 г. на условиях централизованной подписки. Доступ к ресурсу до 30.12.2030 г. <https://ufn.ru/>

7. МИАН. Полнотекстовая коллекция математических журналов Письмо РЦНИ от 01.11.2022 № 1424 о предоставлении лицензионного доступа к электронной версии журнала МИАН в 2022 г. на условиях централизованной подписки. Доступ к ресурсу до 30.12.2030 г. <http://www.mathnet.ru/>

8. Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН). Письмо РЦНИ от 22.12.2022 № 1424 о предоставлении лицензионного доступа к электронной версии журнала «Квантовая электроника» в 2022 г. на условиях централизованной подписки. Доступ к ресурсу до 30.12.2030 г. <https://quantum-electron.lebedev.ru/arhiv/>

9. Вузовская электронная библиотека (собственная). <http://eor.dgu.ru/>

10. <http://np.icc.dgu.ru/>

11. CNKI Academic Reference. Письмо РЦНИ от 23.08.2023 г. № 1253 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных издательства Tongfang knowledge network technology co., ltd. <http://www.publishersglobal.com/>

12. Springer Nature 2023 eBook. Collections Письмо РЦНИ от 29.12.2022 г. № 1947 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных издательства. Доступ активен до 31.12.2030 г. <https://www.springernature.com/gp/librarians/products/ebooks/ebookcollection>

13. Life Sciences Package и базы данных Springer Nature Письмо РЦНИ от 29.12.2022 № 1950 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных издательства. Доступ активен до 31.12.2030 г. <http://www.springernature.com/>

14. AIP Publishing Письмо РЦНИ от 31.10.2022 № 1404 о предоставлении лицензионного доступа к содержанию баз данных AIPP E-Book Colection1+ Colection2 издательства AIP Publishing на условиях централизованной подписки. Доступ активен – бессрочно. <https://www.scitation.org/?ref=website-popularity>

15. Согласно лицензионному договору между Российским Центром Научной Информации (РЦНИ) и Российской Академии Наук (РАН) пользователям ДГУ 28.08.2025 предоставлен доступ к 140 наименований электронных версии журналов РАН по разным научным направлениям, выпущенных в 2025 г. <https://journals.rcsi.science/>