

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Декан радиофизического факультета


_____ А.Г.Коротаев

« 30 » 01 2025 г.

ПРОГРАММА

вступительного испытания по специальной дисциплине
соответствующей научной специальности программы подготовки научных и
научно-педагогических кадров в аспирантуре

1.3.11. Физика полупроводников

Томск – 2025

Авторы-разработчики:



*Коханенко Андрей Павлович, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры
квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета, руководитель
ОП*

1. Общие положения

1.1. Программа вступительного испытания по специальной дисциплине соответствующей научной специальности программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

1.3.11. Физика полупроводников

шифр и наименование научной специальности

(далее – Программа) сформирована на основе требований федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования к программам магистратуры (специалитета) по соответствующим направлениям (специальностям) подготовки. Программа разработана для поступления на обучение в аспирантуру НИ ТГУ.

Программой устанавливается:

- форма, структура, процедура сдачи вступительного испытания;
- шкала оценивания;
- максимальное и минимальное количество баллов для успешного прохождения вступительного испытания;
- критерии оценки ответов.

Вступительное испытание проводится на русском языке или на английском языке для абитуриентов из стран дальнего зарубежья, поступающих на программу, реализуемую на английском языке.

Форма, процедура сдачи вступительного испытания, а также шкала оценивания и критерии оценки ответов экзаменуемого, установленные Программой, не зависят от языка проведения вступительного испытания.

1.2. Организация и проведение вступительного испытания осуществляется в соответствии с Правилами приема, утвержденными приказом ректора НИ ТГУ, действующими на текущий год поступления.

1.3. По результатам вступительного испытания, поступающий имеет право подать на апелляцию о нарушении, по мнению поступающего, установленного порядка проведения вступительного испытания и (или) о несогласии с полученной оценкой результатов вступительного испытания в порядке, установленном Правилами приема, действующими на текущий год поступления.

2. Форма, структура, процедура, программа вступительного испытания и шкала оценивания ответов

2.1. Вступительное испытание по специальной дисциплине проводится в форме экзамена (письменно, устно или сочетанием обеих форм) в соответствии с перечнем тем и (или) вопросов, установленных данной Программой.

Структура экзамена.

Экзамен проводится по билетам.

2.2. Процедура проведения экзамена представляет собой сдачу экзамена в очной форме и (или) с использованием дистанционных технологий (при условии идентификации поступающих при сдаче ими вступительных испытаний):

очно и дистанционно.

Для дистанционных вступительных испытаний используются платформа «Среда электронного обучения iDO» и другие программы для организации видеоконференций. Для наблюдения за участниками экзамена и идентификации их личности в НИ ТГУ создана система прокторинга. Проктор (наблюдатель) перед началом каждого экзамена при помощи веб-камеры поступающего проводит инструктаж и собеседование по вопросам организации и проведения экзамена, идентификацию личности путем сравнения фото в паспорте и лица сдающего (поступающий показывает в веб-камеру свой паспорт в развернутом виде рядом со своим лицом).

Видео, транслируемое с веб-камеры участника экзаменов, доступно проктору для наблюдения и записывается на сервер для дальнейшего просмотра при возникновении спорных ситуаций.

2.3. Результаты проведения вступительного испытания оформляются протоколом, в котором фиксируются вопросы экзаменаторов к поступающему. На каждого поступающего ведется отдельный протокол.

2.4. Программа экзамена.

Примерный перечень тем и вопросов для подготовки к сдаче экзамена

1. Зонная теория твердого тела

Уравнение Шредингера для кристалла, одноэлектронное приближение. Решение уравнения Шредингера для абсолютно свободных, абсолютно связанных и сильно связанных электронов. Зоны разрешенных значений энергии электрона в кристалле. Заполнение разрешенных зон энергии электронами, деление веществ на металлы, диэлектрики и полупроводники. Зоны Бриллюэна. Движение электронов и дырок в кристалле под действием внешних полей, понятие эффективной массы. Элементарная теория примесных состояний.

2. Статистика электронов в полупроводнике

Функция распределения в статистике Ферми-Дирака, уровень Ферми. Статистика Максвелла-Больцмана для невырожденного полупроводника. Концентрация свободных носителей заряда и положение уровня Ферми в примесном и собственном полупроводниках. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда и уровня Ферми. Компенсированные полупроводники.

3. Дефекты в кристаллах

Вакансии, межузельные атомы, антиструктурные дефекты, атомы примесей, дислокации. Электрическая активность дефектов.

4. Электропроводность полупроводников

Элементарная теория электропроводности, время релаксации, длина свободного пробега. Подвижность и ее температурная зависимость. Температурная зависимость электропроводности.

5. Рекомбинация в полупроводниках

Избыточные носители тока в полупроводнике. Генерация и межзонная рекомбинация носителей, время жизни. Рекомбинация через локальные центры (теория Шокли-Рида). Зависимость времени жизни от концентрации равновесных носителей заряда. Температурная зависимость времени жизни. Уравнение непрерывности.

6. Гальваномагнитные явления

Элементарная теория эффекта Холла (случай примесной и смешанной проводимости). Эффект Эттингсгаузена. Изменение электропроводности в магнитном поле.

7. Термоэлектрические явления

Элементарная теория термоэдс. Явление Томсона, эффект Пельтье.

8. Полупроводниковые диоды

Образование электронно-дырочного перехода, контактная разность потенциалов. Толщина и емкость области пространственного заряда. Вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода, диодная теория выпрямления. Зависимость тока насыщения от температуры и от параметров полупроводника. Влияние генерационно-рекомбинационных центров на прямой и обратный токи в $p-n$ -переходе (рекомбинационная и генерационная составляющие тока).

9. Биполярные транзисторы

Принцип действия биполярного транзистора. Выражения для постоянных токов, протекающих в транзисторе типа $p-n-p$, коэффициент переноса в базе неосновных носителей заряда; эффективность эмиттера. Коэффициент передачи тока транзистора в схеме с общей базой.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одночастичное приближение Хартри-Фока.
2. Волновая функция Блоха, ее свойства.
3. Решение уравнения Шредингера для электронов в кристалле методом Кронига-Пени (приближения, используемые в данном методе).
4. Зонный характер энергетического спектра для электронов в кристалле.

- Деление веществ на металлы, диэлектрики и полупроводники.
5. Понятие эффективной массы. Связь энергии носителей заряда с эффективной массой (электроны в зоне проводимости).
 6. Плотность квантовых состояний в разрешенных зонах (зона проводимости).
 7. Элементарная теория примесных состояний (донорная примесь).
 8. Функция распределения Ферми-Дирака; ее зависимость от энергии и температуры.
 9. Концентрация носителей заряда. Интеграл Ферми. Формулы для расчета концентрации носителей заряда в невырожденных и вырожденных полупроводниках.
 10. Концентрация равновесных носителей заряда в разрешенной зоне (электроны в зоне проводимости).
 11. Температурная зависимость уровня Ферми и концентрации носителей заряда в невырожденном полупроводнике n -типа.
 12. Элементарная теория электропроводности; дрейфовая скорость и дрейфовая подвижность носителей заряда в полупроводниках. Выражение для удельной электропроводности в кристаллах со смещенным типом проводимости.
 13. Основные механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках и металлах. Температурная зависимость времени релаксации подвижности и проводимости для различных механизмов рассеяния.
 14. . Эффект Холла в ограниченном полупроводнике в области примесной, смешанной и собственной проводимости в слабых магнитных полях.
 15. Термоэлектрические эффекты (эффекты Зеебека, Пельтье, Томсона).
 16. Понятие рекомбинации, виды рекомбинации в полупроводниках; межзонная рекомбинация.
 17. Время жизни носителей заряда при межзонной излучательной рекомбинации. Зависимость времени жизни от положения уровня Ферми в полупроводниках.
 18. Рекомбинация носителей заряда через локальные уровни в запрещенной зоне. Записать выражение для $-dn/dt$.
 19. Зависимость времени жизни носителей заряда от положения уровня Ферми в полупроводнике в случае рекомбинации Шокли-Рида.
 20. Зависимость времени жизни носителей заряда от температуры в случае рекомбинации Шокли-Рида.
 21. Вывод уравнения непрерывности.
 22. Построить энергетическую диаграмму p - n -перехода, у которого p - и n -области являются невырожденными полупроводниками, получить выражение для контактной разности потенциалов.
 23. Диодная теория выпрямления диода с полуограниченной базой. Сформулировать исходные приближения. Дать физическую картину протекания тока. Записать выражение для плотности тока и дать анализ её зависимости от напряжения.

24. Описать принцип действия биполярного $p-n-p$ -транзистора в качестве усилителя мощности. Дать определение коэффициента передачи тока в схеме с общей базой и установить его связь с эффективностью эмиттера, коэффициентом переноса дырок, коэффициентом умножения коллектора.

2.5. Шкала оценивания ответов на экзамене:

неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	отлично
до 59 баллов	60 – 75 баллов	76 – 84 баллов	85 – 100 баллов

Общая продолжительность экзамена составляет 45 минут.

Максимальное количество баллов за экзамен – 100. Минимальное количество баллов для успешного прохождения экзамена – 60. Поступающий, набравший менее 60 баллов за экзамен, не может быть зачислен в аспирантуру.

Таблица критериев оценки устных и письменных ответов (при наличии)

Вид деятельности		
Оценка	Балл	Уровень владения темой
неудовлетворительно	до 59	Неполный объем ответов, наличие ошибок и пробелов в знаниях или отсутствие необходимых знаний.
удовлетворительно	60-75	Недостаточно полный объем ответа, наличие ошибок и пробелов в знаниях
хорошо	76-84	Правильный, не содержащий существенных ошибок ответ. Оценка может быть снижена за отдельные несущественные ошибки.
отлично	85-100	Полный безошибочный ответ с правильным применением понятий и определений.

Вступительное испытание проводится экзаменационной комиссией, действующей на основании приказа ректора.

Итоговая оценка за экзамен определяется как средний балл, выставленный всеми членами экзаменационной комиссии.