



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Ж.И. АЛФЕРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по образовательной деятельности



М.В. Мишин

«11» сентября 2023 г.

**ПРОГРАММА КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

Научная специальность
1.3.11 Физика полупроводников

ОТРАСЛЬ НАУКИ
Физико-математические

Санкт-Петербург
2023 г.

Разработчики программы:
к.ф.-м.н. Шубина К. Ю.

1. Общие положения

1.1. Группа научных специальностей:

1.3 Физические науки

Наименование отрасли науки, по которой присуждаются ученые степени:

Физико-математические

Технические

Шифр научной специальности:

1.3.11 Физика полупроводников

1.2. Программа кандидатского экзамена по специальной дисциплине по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников разработана в соответствии с:

- Федеральным законом Российской Федерации от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»;
- Федеральным законом Российской Федерации от 23.08.1996 № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике»;
- Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней»;
- Приказом Минобрнауки России от 28.03.2014г. № 247 «Об утверждении порядка прикрепления лиц для сдачи кандидатских экзаменов, сдачи кандидатских экзаменов и их перечня» (в ред. Приказа Минобрнауки России от 05.08.2021 №712);
- Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.02.2021г. № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесение изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное Министерством образования и науки Российской Федерации от 10.11.2017г. № 1093»;
- Паспортом научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

1.3. Программа кандидатского экзамена регламентирует цель, задачи, содержание, организацию кандидатского экзамена, порядок работы экзаменационной комиссии, порядок оценки уровня знаний и включает перечень тем и вопросов, выносимых на кандидатский экзамен.

1.4. Кандидатские экзамены представляют собой форму оценки степени подготовленности соискателя ученой степени кандидата физико-математических/технических наук (аспиранта/прикрепленного лица) к проведению научных исследований по конкретной научной специальности и отрасли наук, по которой подготавливается диссертация.

2. Цель проведения кандидатского экзамена

Целью проведения кандидатского экзамена по специальной дисциплине является оценка степени подготовленности соискателя ученой степени кандидата наук (аспиранта/прикрепленного лица) к проведению научных исследований по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников и отрасли наук – физико-математические/технические, по которой подготавливается диссертация:

- проверка сформированности умений в области применения физики полупроводников, использования междисциплинарных установок и общенаучных понятий в решении комплексных задач теории и практики в конкретно научной исследовательской деятельности;
- владение основными методами на уровне, позволяющем получать качественные результаты при решении теоретических и прикладных задач в области физических дисциплин;
- получение практических навыков аргументации в обосновании научного статуса и актуальности конкретной исследовательской задачи, в работе с эмпирическими методами оценки выдвигаемых проблем и гипотез.

Сдача кандидатских экзаменов обязательна для прохождения промежуточной и государственной итоговой аттестации/итоговой аттестации, для присуждения ученой степени кандидата наук.

3. Задачи, решаемые в ходе сдачи кандидатского экзамена

В ходе сдачи кандидатского экзамена необходимо оценить:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области естественных наук.

4. Структура и содержание кандидатского экзамена

4.1. Кандидатский экзамен по специальной дисциплине 1.3.11 Физика полупроводников проводится в устной форме по билетам.

Экзаменационный билет включает в себя два вопроса по специальной дисциплине и третий вопрос по теме диссертационного исследования.

Продолжительность устного ответа на экзамене – 20 минут, время на подготовку к ответу на экзаменационный билет – 15 мин.

4.2. Комиссия по приему кандидатского экзамена по специальной дисциплине правомочна принять экзамен, если в ее заседании участвуют не менее 3 специалистов, имеющих ученую степень кандидата или доктора наук по научной специальности, соответствующей специальной дисциплине, в том числе 1 доктор наук.

Решение экзаменационной комиссии оформляется протоколом по установленной Университетом форме.

4.3. Университет вправе применять дистанционные образовательные технологии при проведении кандидатского экзамена.

При проведении кандидатского экзамена с применением дистанционных образовательных технологий Академический университет обеспечивает идентификацию личности аспиранта /прикрепленного лица.

5. Перечень тем, вынесенных на кандидатский экзамен

1. Химическая связь и атомная структура полупроводников
2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров
3. Основы зонной теории полупроводников
4. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках
5. Кинетические явления в полупроводниках
6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках
7. Контактные явления в полупроводниках
8. Свойства поверхности полупроводников
9. Оптические явления в полупроводниках
10. Фотоэлектрические явления
11. Некристаллические полупроводники
12. Полупроводниковые структуры пониженной размерности
13. Принципы действия полупроводниковых приборов

6. Перечень вопросов для проведения кандидатского экзамена

1. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-Ваальсова, ионная и ковалентная связь.
2. Структуры важнейших полупроводников – элементов A^{IV} , A^{VI} и соединений типов $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$.
3. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера—Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов,

направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

4. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.
5. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.
6. Методы выращивания эпитаксиальных пленок. Эпитаксия из жидкой и газовой фазы. Молекулярно-пучковая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
7. Методы легирования полупроводников.
8. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.
9. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.
10. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.
11. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле.
12. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса.
13. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.
14. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.
15. Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний.
16. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.
17. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

18. Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.
19. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами.
20. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.
21. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.
22. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.
23. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.
24. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.
25. Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
26. Энергетическая диаграмма p - n перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в p - n переходе.
27. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.
28. Варизонные полупроводники.
29. Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация.
30. Эффект поля.
31. Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.
32. Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига.
33. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.
34. Поглощение света на свободных носителях заряда.
35. Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана –

Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна – Мандельштама).

36. Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.
37. Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поккельса.
38. Эффект Бурштейна-Мосса.
39. Эффекты Фарадея и Фойгта.
40. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.
41. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость.
42. Фоторазогрев носителей заряда.
43. Фотоэлектромагнитный эффект.
44. Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники.
45. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности.
46. Легирование некристаллических полупроводников.
47. Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.
48. Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.
49. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.
50. Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.
51. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

52. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.
53. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.
54. Вольтамперная характеристика $p-n$ перехода. Приборы с использованием $p-n$ переходов.
55. Туннельный диод. Диод Ганна.
56. Биполярный транзистор. Тиристор.
57. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.
58. Шумы в полупроводниковых приборах.
59. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования.
60. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.
61. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (HEMT).
62. Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками.
63. Резонансное тунелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод.
64. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.

7. Порядок оценки уровня знаний

7.1. Оценка уровня знаний соискателя ученой степени кандидата наук определяется экзаменационной комиссией по пятибалльной системе: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

7.2. При оценке знаний и уровня подготовки экзаменационная комиссия по приему кандидатского экзамена определяет:

- уровень освоения материала, предусмотренного программой кандидатского экзамена;
- умение использовать теоретические знания при выполнении практических задач;
- обоснованность, четкость, краткость изложения ответа.

7.3. Общими критериями, определяющими оценку за кандидатский экзамен, являются:

- для оценки «отлично»: наличие глубоких и исчерпывающих знаний в объеме пройденного программного материала, грамотное и логически стройное изложение материала при ответе, знание дополнительно рекомендованной литературы;
- для оценки «хорошо»: наличие твердых и достаточно полных знаний программного материала, незначительные ошибки при освещении заданных вопросов;
- для оценки «удовлетворительно»: наличие твердых знаний программного материала, изложение ответов с ошибками, уверенно исправляемыми после дополнительных вопросов, необходимость наводящих вопросов;
- для оценки «неудовлетворительно»: наличие грубых ошибок в ответе, непонимание сущности излагаемого вопроса, неуверенность и неточность ответов на дополнительные вопросы.

8. Методические указания по подготовке к сдаче кандидатского экзамена

8.1 При подготовке к кандидатскому экзамену рекомендуется:

- внимательно прочесть источники в списке рекомендуемой литературы и проанализировать информацию;
- сделать выписки (конспект) необходимой информации в соответствии с темами и перечнем вопросов;
- систематизировать и классифицировать полученные данные по тематическим разделам и вопросам;
- составить рабочие записи – ключевые опорные пункты в соответствии с логикой ответа на экзаменационные вопросы;
- подобрать необходимую иллюстрированную информацию по содержанию ответа.

9. Перечень рекомендуемой литературы и ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Основная литература:

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
2. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
3. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высш. шк., 1975.
4. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
6. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.

7. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.

Дополнительная литература:

1. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников. М.:Физматлит, 2002.
2. Трушин Ю.В. Физические основы материаловедения. СПб.:Издательство Академического университета, 2015.
3. Жуков А.Е. Основы физики и технологии полупроводниковых лазеров. СПб.:Издательство Академического университета, 2016.