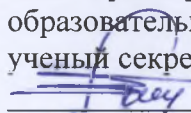


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Институт автоматики и процессов управления**  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(ИАПУ ДВО РАН)

**«СОГЛАСОВАНО»**

Зам. директора по научно-  
образовательной деятельности,  
ученый секретарь, к.т.н.

  
С.Б. Змеу  
«29» декабря 2021 г.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор ИАПУ ДВО РАН  
член-корреспондент РАН

  
Р.В. Ромашко  
«29» декабря 2021 г.

**ПРОГРАММА КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА**

по основной образовательной программе аспирантуры по научной специальности

**Физика полупроводников**

**Группа научных специальностей 1.3. – «Физические науки»,  
научная специальность 1.3.11 «Физика полупроводников»**

**Форма подготовки (очная)**

Междисциплинарная кафедра подготовки кадров высшей квалификации (МК ПКВК)  
ИАПУ ДВО РАН

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации и срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий обучающихся, утвержденными приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 20 октября 2021 № 951.

Программа кандидатского экзамена обсуждена на заседании МК ПКВК ИАПУ ДВО РАН, протокол № 3 от «17» ноября 2021 г.

Заведующий кафедрой МК ПКВК: д-р физ.- мат. наук, профессор Н.Г. Галкин

Составители: член-корр. РАН, профессор МК ПКВК А.А. Саранин и д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор МК ПКВК Н.Г. Галкин

**Оборотная сторона титульного листа программы**

**I. Программа кандидатского экзамена пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол № от «    »                      20    г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)                      (И.О. Фамилия)

**II. Программа кандидатского экзамена пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол № от «    »                      20    г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)                      (И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Программа кандидатского экзамена по научной специальности «Физика полупроводников» предназначена для обучающихся по образовательной программе высшего образования - программе подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по группе научных специальностей 1.3. – «Физические науки» и научной специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Программа составлена на основании федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по группе научных специальностей 1.3. – «Физические науки» и научной специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» и учебного плана подготовки аспирантов по научной специальности «Физика полупроводников», Типовой программы кандидатского экзамена по специальности, утвержденной приказом Минобрнауки России от 8 октября 2007 г. № 274 и рабочей программы учебной дисциплины «Физика полупроводников» в рамках основной образовательной программы аспирантуры по группе специальностей 1.3. – «Физические науки», научной специальности «Физика полупроводников», разработанной в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Кандидатский экзамен проводится в форме устного опроса.

Программа кандидатского экзамена включает в себя:

- аннотацию;
- содержание кандидатского экзамена;
- вопросы к кандидатскому экзамену;
- список рекомендуемой литературы и источников.

# I. СОДЕРЖАНИЕ КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА

## 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников

Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-Ваальсова, ионная и ковалентная связь. Структуры важнейших полупроводников – элементов  $A_{IV}$ ,  $A_{VI}$  и соединений типов  $A_{III}B_V$ ,  $A_{II}B_{VI}$ ,  $A_{IV}B_{VI}$ . Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Прimitивная ячейка. Ячейка Вигнера—Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

## 2. Основы зонной теории полупроводников

Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изозонные поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.

Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

## 3. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

#### **4. Кинетические явления в полупроводниках**

Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

#### **5. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках**

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

#### **6. Контактные явления в полупроводниках**

Эффекты Фарадея и Фойгта. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

## **9. Некристаллические полупроводники**

Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности. Легирование некристаллических полупроводников. Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта. Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос. Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

## **10. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки**

Шкалы длин в современной физике твердого тела. Размерность. Размерное квантование. Транспорт носителей при различных размерностях полупроводниковых структур. Оптические свойства в системах с пониженной размерностью. Теоретическое описание электронных состояний в двумерном электронном газе. Эксперименты по электрическому транспорту и их интерпретация. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла. Оптические свойства. Практическая реализация систем с двумерным электронным газом. Методы генерации горячих носителей: роль гетеропереходов. Электронная спектроскопия горячих электронов: транспортные и оптические методы

исследования. Структуры с переносом носителей в сильных электрических полях. Туннелирование через одиночный барьер. Туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой. Множественные туннельные барьеры. Электронная структура идеальной сверхрешетки. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки. Оптические свойства сверхрешеток (межзонное поглощение и излучательная рекомбинация). Экситоны в квантовых ямах. Блоховские осцилляции и лестницы Штарка. Измерения электрического транспорта в сверхрешетках. Применения сверхрешеток.

## **11. Современные методы исследования поверхности полупроводников**

Представления о высоком и сверхвысоком вакууме. Современные методы исследования поверхности твердого тела и их классификация. Физические основы ЭОС. Анализ состава поверхности твердого тела методом ЭОС. Послойный анализ с применением метода ЭОС. Фотоэлектронная эмиссия. Источники фотонов. Спектры РФЭС для анализа состава поверхности. Изучение наружной энергетической полосы проводников методом РФЭС. РФЭС - как спектроскопия для анализа состава поверхности. Физические основы метода спектроскопии ХПЭ. Плазмоны. Спектроскопия ХПЭ для анализа поверхности. Определение структуры поверхности методами ДМЭ. Физические основы метода ДОБЭ. Применение метода ДОБЭ для изучения эпитаксиального роста полупроводников и других процессов на многослойных поверхностях. УФЭС как метод исследования электронной структуры твердых тел. Физические основы метода СТМ. Концепция сканирования. СВВ установка для сканирующей туннельной микроскопии OMICRON MULTIPROBE. Применение метода СТМ для анализа структуры поверхности твердого тела и поверхностных фаз.

## ВОПРОСЫ К КАНДИДАТСКОМУ ЭКЗАМЕНУ ПО НАУЧНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

1. Кристаллические и аморфные тела. Трансляционная симметрия. Элементарная ячейка. Решетка Браве. Точечные и пространственные группы.
2. Особенности распространения волн в периодических структурах. Закон Брегга.
3. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна.
4. Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии. Атомы внедрения. Комбинации атомных дефектов.
5. Краевые и винтовые дислокации. Вектор Бюргерса. Энергия дислокаций. Переползание и скольжение. Размножение дислокаций.
6. Влияние радиационных, механических, термических воздействий на реальную структуру твердых тел.
7. Структурные и физические особенности ионных, ковалентных, металлических и молекулярных.
8. Описание энергетического состояния кристалла при помощи газа квазичастиц. Фотоны, магноны, экситоны, плазмоны и др. Электроны в металле как квазичастицы. Квазиимпульс. Закон дисперсии.
9. Теорема Блоха. Граничные условия. Плотность состояний. Статистика газа квазичастиц. Бозоны и фермионы. Взаимодействие частиц.
10. Колебание решетки – фононы. Теплоемкость решетки. Ангармонизм и тепловое расширение.
11. Одноэлектронная модель. Приближение сильной и слабой связи. Зонная схема и типы твердых тел.
12. Вырожденный электронный газ. Электронная теплоемкость, поверхности Ферми. Электроны и дырки. Циклотронная масса.
13. Времена релаксации. Механизмы рассеяния электронов. Рассеяние на примесях и дефекты.
14. Электрон-фононные столкновения. Нормальные процессы и процессы переброса. Магнитосопротивление и эффект Холла.



15. Электронная структура типичных полупроводников. Германий. Узкозонные полупроводники. Примесные уровни. Доноры и акцепторы. Температурная зависимость проводимости.
16. P-n переходы. Фотопроводимость. Рекомбинация и релаксация неравновесных носителей. Горячие носители. Эффект Ганна.
17. Зависимость ширины запрещенной зоны от типа химической связи. Примеры изоэлектронного ряда полупроводников (строка в таблице Менделеева). Задачи.
18. Зависимость ширины запрещенной зоны от порядкового номера  $Z$  элемента, входящего в состав полупроводников (столбец в таблице Менделеева). Задачи.
19. Диффузия носителей заряда в полупроводнике. Определение. Диффузионный ток дырок, одномерный и трехмерный случай. Диффузионный ток электронов. Диффузионная длина. Время жизни.
20. Дрейф носителей заряда. Определение. Подвижность. Дрейфовый ток дырок, электронов.
21. Полный ток в полупроводнике (формула).
22. Уравнение непрерывности для дырок, для электронов. Одномерный и трехмерный случаи. Стационарное состояние.
23. Волновые свойства микрочастиц. Гипотеза де Бройля. Экспериментальные доказательства волновых свойств частиц.
24. Состояния электрона в кристалле. Волновой вектор. Правила его квантования. Условие Борна-Кармана.
25. Приближение сильной связи. Образование энергетических зон в кристалле. Число уровней. Ширина зоны. Вырожденные и гибридные зоны.
26. Зависимость  $E(k)$  для простой кубической решетки. Общие свойства функции  $E(k)$ . Период функции  $E(k)$ . Зоны Бриллюэна.
27. Эффективная масса электронов и дырок. Зависимость энергии электрона от квазиимпульса вблизи краев зон.
28. Водородоподобная модель примесного центра.

29. Функции Ферми-Дирака. Уровень Ферми.
30. Плотность состояний в свободной и валентной зонах.
31. Концентрация электронов и дырок в полупроводнике, общий случай (вывод формулы).
32. Невырожденный полупроводник. Вырожденный полупроводник. Положение уровня Ферми, формулы для Концентрации носителей заряда.
33. Собственный невырожденный полупроводник. Зависимость уровня Ферми и концентрации носителей от температуры. Собственный вырожденный полупроводник.
34. Невырожденный полупроводник N-типа. Случай низких температур.
35. Невырожденный полупроводник N-типа. Случай высокой температуры.
36. Зависимость концентрации электронов и уровня Ферми от температуры в полупроводнике N-типа в широком диапазоне температур.
37. Зависимость концентрации дырок и уровня Ферми от температуры в полупроводнике P-типа в широком диапазоне температур.
38. Концентрация неосновных носителей в полупроводнике. Закон «действующих масс» для невырожденного полупроводника.
39. Контактная разность потенциалов. Ее происхождение, величина, способ измерения.
40. Двойной заряженный слой на контакте двух кристаллов. Толщина заряженных слоев в металле и в полупроводнике (оценка).
41. Контакт металла и полупроводника N-типа, два случая. Проводимость приконтактного слоя полупроводника.
42. Контакт металла и полупроводника P-типа, два случая. Запорный и антизапорный слои.
43. Электрическое поле в P-N переходе. Зависимость напряженности и потенциала от координаты. Изгиб энергетических уровней свободной и валентной зон.
44. Толщина заряженных слоев в P-N переходе. Толщина P-N перехода.

45. Гетеропереход. Зонная диаграмма. Основное отличие гетероперехода от гомоперехода.
46. Оптические методы исследования. Возможности, связанные с использованием лазерных источников света.
47. Атомная структура поверхности и динамика поверхности атомов. Поверхностные структуры и реконструкция поверхности.
48. Колебания поверхностных атомов. Дефекты на поверхности.
49. Электронная структура поверхности. Поверхностные электронные состояния. Электронная плотность вблизи поверхности. Поверхностные плазмоны.
50. Адсорбция физическая и химическая. Десорбция. Субмонослои, монослои и многослойная адсорбция. Двумерные фазовые переходы.
51. Поверхностная и приповерхностная диффузия.
52. Методы получения атомарно-чистой поверхности.
58. Механизм и кинетика роста тонких пленок. Гетерогенное и гомогенное зародышеобразование. Диффузия. Реакция на межфазной границе. Диаграммы состояния.
59. Структура пленок. Аморфные, поликристаллические и монокристаллические пленки. Дефекты. Несоответствие решеток на границе раздела.
60. Морфология тонких пленок. Коалесценция, миграция и диффузионное перераспределение. Островковые пленки.
61. Методы получения тонких пленок осаждением в вакууме. Молекулярная и твердофазная эпитаксия.
62. Масс-спектрометрия вторичных ионов.
63. Электронная оже-спектрометрия.
64. Дифракция медленных электронов.
65. Спектрометрия энергетических потерь электронов.
66. Фотоэлектронная спектрометрия.
67. Методы электронной микроскопии.
68. Спектрометрия рассеянных ионов.

69. Образование силицидов на кремнии. Профиль концентрации на границе раздела и фазовая диаграмма состояний. Кинетика и механизм роста силицидов.
70. Электронная и атомная структура границы раздела металл-кремний на начальных стадиях формирования.
71. Эпитаксиальный рост силицидов на кремнии и структура границы раздела силицид-кремний.
72. Контакт металл-полупроводник.
73. Тонкие пленки силицидов в микроэлектронике.
92. Метод просвечивающей электронной микроскопии.
93. Метод электронной оже- спектроскопии.
94. Метод дифракции электронов.
95. Метод характеристических потерь энергии электронами.
96. Метод сканирующей электронной микроскопии.
97. Атомная силовая микроскопия.
98. Шкалы длин в современной физике твердого тела. Размерность. Размерное квантование.
99. Транспорт носителей при различных размерностях полупроводниковых структур. Оптические свойства в системах с пониженной размерностью.
100. Теоретическое описание электронных состояний в двумерном электронном газе. Эксперименты по электрическому транспорту и их интерпретация.
101. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза.
102. Общее представление о квантовом эффекте Холла (целочисленном и дробном).
103. Оптические свойства. Практическая реализация систем с двумерным электронным газом.
104. Методы генерации горячих носителей: роль гетеропереходов.
105. Электронная спектроскопия горячих электронов: транспортные и оптические методы исследования.

106. Структуры с переносом носителей в сильных электрических полях
107. . Туннелирование через одиночный барьер. Туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой.
108. Множественные туннельные барьеры. Электронная структура идеальной сверхрешетки.
109. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки. Оптические свойства сверхрешеток (межзонное поглощение и излучательная рекомбинация).
110. Экситоны в квантовых ямах. Блоховские осцилляции и лестницы Штарка.
111. Измерения электрического транспорта в сверхрешетках. Применения сверхрешеток.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ

### Основная литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. Учебник. 4-е изд., стер. - СПб.: Издательство «Лань», 2010. - 400 с.
2. Яценко О.Б., Чудотворцев И.Г., Шаров М.К. Основы физики и химии полупроводников: Учебное пособие. Ч.2. - Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2007. - 50 с. <http://window.edu.ru/resource/282/59282>
3. Плотников В.П. Физика проводников и диэлектриков. Учебное пособие. - Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. - 80 с. <http://window.edu.ru/resource/782/21782>
4. Бормонтов Е.Н., Хухрянский М.Ю. Статистика электронов и дырок в полупроводниках: Учебное пособие по лекционному курсу "Физика полупроводников". - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. - 31 с. <http://window.edu.ru/resource/207/27207>
5. Зегря Г.Г. Основы физики полупроводников [*Электронный ресурс*]: учебное пособие/ Зегря Г.Г., Перель В.И.— Электрон. текстовые

- данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.— 336 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12941>. — ЭБС «IPRbooks».
6. Румянцев А.В. Введение в физику конденсированного состояния вещества [*Электронный ресурс*]: учебное пособие/ Румянцев А.В.— Электрон. текстовые данные.— Калининград: Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, 2012.— 119 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/23770> .— ЭБС «IPRbooks».
  7. Горшков А.П., Тихов С.В. Физика Поверхности Полупроводников. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Учебное пособие, 2013 – 101 с.
  8. Алешкин В.Я. Современная физика полупроводников: курс лекций. Н. Новгород: ННГУ, 2011. - 88 с.

#### Дополнительная литература

1. Квантовый эффект Холла. Под ред. Р. Пренджа и С. Гирвина. М.: Мир, 1989. – 404 с.
2. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов [*Электронный ресурс*]/ Лебедев А.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.— 488 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12950>. — ЭБС «IPRbooks».
3. Заводинский В.Г. Компьютерное моделирование наночастиц и наносистем. М.: Физматлит, 2013. – 175 с.
4. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1987, 239с.
5. Бормонтов Е.Н., Быкадорова Г.В., Гаврилов А.Е. Моделирование зонной структуры полупроводников: Учебное пособие по лекционному курсу "Физика полупроводников". - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. - 33 с. <http://window.edu.ru/resource/241/40241>
6. Перлин Е.Ю., Вартамян Т.А., Федоров А.В. Физика твердого тела.

Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. - 216 с.  
<http://window.edu.ru/resource/408/54408>

7. Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 195 с.  
<http://window.edu.ru/resource/740/63740>
8. Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур: Учебное пособие. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 347 с. <http://window.edu.ru/resource/346/63346>
9. Борисенко С.И. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - 115 с. <http://window.edu.ru/resource/927/73927>
10. Басс Ф.Г., Булгаков А.А., Тетервов А.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. - 288 с.
11. Шик А.Я. Двумерные электронные системы. Учебное пособие. СПб, СПбГТУ, 1993. - 76 с.
12. Питер Ю., Кардона М. Основы физики полупроводников. 3-е изд., испр. и доп. - М.: Физматлит, 2002. - 560 с.
13. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир 1989 г. 240 с.