Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ
Директор
_____ С.В. Иванов
«_14_» _января_ 2025 г.

ПРОГРАММА
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ
по научной специальности
1.3.11 Физика полупроводников

Санкт-Петербург

2025 г.

1. Общие сведения

В основу настоящей программы положены основные разделы физики полупроводников, касающиеся основных физических проблем данной области, основ технологии и работы приборов на базе полупроводниковых материалов.

Кандидатский экзамен проводится в устной форме и состоит из 2-х вопросов по билету и презентации по теме диссертационного исследования о выполненной работе за период обучения в аспирантуре, в соответствии с индивидуальным планом работы.

2. 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. Примитивная 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.

3. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров

Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.

Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).

Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

Методы легирования полупроводников.

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.

4. 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. Изоэнергетиче-ские 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. Водородопо-добные примесные центры.

5. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

Функция распределения электронов. Концентрация электронов 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.

6. Кинетические явления в полупроводниках

Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла и тер-мо-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 фоно-нами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

7. 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.

8. Контактные явления в полупроводниках

Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.

Энергетическая диаграмма *p-n* перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в *p-n* переходе.

Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Варизонные полупроводники.

9. Свойства поверхности полупроводников

Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация.

Эффект поля.

Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

10. Оптические явления в полупроводниках

Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса-Кронига.

Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

Поглощение света на свободных носителях заряда.

Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана-Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна-Мандельштама).

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.

Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поккельса.

Эффект Бурштейна-Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта.

11. Фотоэлектрические явления

Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость.

Фоторазогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект.

12. 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.

13. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки

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.

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.

Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

14. Принципы действия полупроводниковых приборов

Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов.

Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник

(МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.

Шумы в полупроводниковых приборах.

Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования.

Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.

Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (НЕМТ). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.

Вопросы для подготовки к кандидатскому экзамену:

1. Кристаллические решетки. Трансляционная симметрия. Решетки Бравэ. Сингония.
2. Аморфные и стеклообразные полупроводники.
3. Зонная структура полупроводников (A^3B^5,A^2B^6,A^4)
4. Диэлектрическая проницаемость однородного электронного газа в полупроводниках.
5. Основные методы определение параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, уровней примесей и дефектов.
6. Собственная и примесная фотопроводимость.

7.Связь структуры кристаллов с характером химической связи. Типы сил связи. Энергия связи.

8. Плазменные колебания.

9. Упругие свойства кристаллической решетки. Тензор деформаций и тензор напряжений. Модули упругости и упругие постоянные кристаллов разных классов.

10. Механизмы рассеяния носителей заряда.

11.Колебания кристаллической решетки. Акустические и оптические ветви колебаний. Фононы.

12. Основные экспериментальные методы измерения диэлектрических потерь в переменном электрическом поле.

13. Волновая функция электрона в периодическом поле кристаллической решетки. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

14. Пъезоэлектрические явления в кристаллах.

15. Метод сильной связи. Зоны дисперсии. Металлы и полупроводники.

16. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами. Правила отбора для межзонных и внутризонных переходов.

17. Метод эффективной массы. Зонная структура полупроводников. Электроны и дырки.

18. Оптические свойства прямозонных и непрямозонных полупроводник. Полупроводниковые структуры пониженной размерности. Энергетический спектр электронов в этих системах.

19. Поглощение электромагнитных волн колебаниями решетки.

20. Движение носителей в постоянном, однородном магнитном поле (классическая теория.). Циклотронный резонанс.

21. Фотолюминесценция полупроводников.

22. Движение носителей в постоянном, однородном магнитном поле (квантовая теория). Эффекты Шубникова-де Газа и квантовый эффект Холла.

23. Рекомбинационное излучение в диэлектриках и полупроводниках.

24. Движение и энергетический спектр носителей в постоянном электрическом поле.

25. Оптические квантовые генераторы (лазеры) и принципы их действия.

26. Статистика электронов. Распределение Ферми-Дирака.

27. Концентрация электронов и дырок. Вырожденные и невырожденные полупроводники.

28. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах.

29. Распределение Гиббса.

30. Поглощение света свободным носителями. Плазменное отражение.

31. Уровень Ферми в собственном полупроводнике и в полупроводнике с примесью одного типа.

32. Магнитооптические явления. Эффекты Фарадея и Фохта.

33. Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Поверхностная рекомбинация.

34. Электрооптические явления. Эффекты Поккельса,Керра,Франца-Келдыша.

35. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов. Интеграл столкновений. Приближение времени релаксации.

36. Нелинейная оптика: генерация второй гармоники.

37. Кинетические эффекты: проводимость, постоянная Холла и термоэдс.

38. Междузонные оптические переходы в сильно легированных полупроводниках. Эффект Бурштейна-Мосса.

39. Подвижность носителей в полупроводниках и диэлектриках.

40. Фотопроводимость и фотоэлектромагнитный эффект.

41. Прыжковая проводимость.

42. Теплопроводность кристаллов.

43. Горячие электроны. Доменная неустойчивость.

44. Дефекты по Френкелю и Шоттки.

45. Неравновесные электроны и дырки. Механизмы рекомбинации неравновесных носителей заряда.

46. Поляроны большого и малого радиуса.

47. п-р-переход и его свойства. Туннельный эффект в п-р-переходе. Туннельный диод. Биполярный транзистор.

48. Экситон.

49. Гетеропереход и его свойства. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

50. Теплоемкость кристаллов. Теории Дебая, Эйнштейна, Борна.

51. Контактные явления. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Распределение концентрации и потенциала в слое объемного заряда.

52. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах (гетеролазер, гетеротранзистор, резонансно-туннельный диод).

53. Механизмы переноса тока в тонких диэлектрических пленках в системе металл-диэлектрик-металл. Контакт металл - полупроводник. Барьер Шоттки.

54. Экспериментальное определение типа, концентрации и подвижности носителей заряда.

55. Типы процессов рекомбинации.

56.Выпрямление в контакте металл-полупроводник. Диффузионная и диодная теория.

57. Поверхностные электронные состояния.

58. Экспериментальное определение энергетических уровней и концентрации примесных атомов из электрических измерений.

59. Фотоэлементы и фотодиоды.

60. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электронов в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха.

61. Сильнолегированные полупроводники. Хвосты плотности состояний. Методы легирования полупроводников.

62.Фотолюминесценция.Электролюминесценция.

63. Явление пробоя, Типы пробоев. Ударная ионизация.

64. Методы выращивания эпитаксиальных пленок. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

65. Лавинный и туннельный пробой в р-п-переходе в полупроводниках. Использование пробоя в приборах.

66. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

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. Мотт Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.