

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Новосибирский
государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ОПКВК



В.П. Драгунов

2022 г.

ПРОГРАММА - МИНИМУМ
кандидатского экзамена по специальности
1.3.11 - «Физика полупроводников»
(технические науки)

Структуры полупроводников – кристаллы, поликристаллы, монокристаллы, полупроводниковые материалы.

Симметрия кристаллов. Трансверсальная симметрия кристаллов. Борис и Красинская структура. Элементарная ячейка. Прямоугольные ячейки. Ячейки Вагнера-Зенга. Радиуса Бриле. Объемная связь, изотропная и антисимметрическая связь. Образование решетки из спиралей. Зона Бриллюэна.

Принципы структурных дефектов в кристаллах и закономерности полупроводников. Химическая природа и электронные свойства кристаллов. Точечные, линейные и двухмерные дефекты.

2. Основы технологии полупроводников и методы их изучения

Новосибирск 2022

Программа обсуждена на заседании ученого совета факультета РЭФ
протокол № 11 от 21.12.2022 г.

Программу разработал

**заведующий кафедрой ППиМЭ,
к.т.н., доцент**

Д.И. Остертак

**Декан РЭФ, к.т.н.,
доцент**

С.А. Стрельцов

Ответственный за основную
образовательную программу

д.т.н., профессор

А. А. Величко

Введение

В основу настоящей программы положены основные разделы физики полупроводников, касающиеся основных физических проблем данной области, основ технологии и работы приборов на базе полупроводниковых материалов. Программа разработана экспертым советом Высшей аттестационной комиссии по физике при участии Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, ФТИ им. А.Ф.Йоффе РАН, ИФП СО РАН, ИРЭ РАН, ФИАН им. П.Н.Лебедева, ИФМ РАН (Нижний Новгород) и С.-Пб.ГТУ.

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. 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.

2. 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. Металлоорганическая 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.

3. 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. Изознергетические 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.

4. 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 и собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

5. 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.

6. 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.

7. Контактные явления в полупроводниках

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

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

Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

Варизонные полупроводники.

8. 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.

9. 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 фонах (Рамана –

Ландсберга), рассеяние на акустических фонах (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 Покельса.

Эффект Бурштейна-Мосса.

Эффекты Фарадея и Фойгта.

10.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.

11.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.

12. 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.

13. 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-структуре. 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.

Рекомендуемая основная литература

1. В.Л.Бонч-Бруевич, С.Г.Калашников. «Физика полупроводников». М.: Наука, 1979 г.
 2. Дж.Займан «Принципы теории твердого тела». М: Мир, 1974.
 3. П.С.Киреев «Физика полупроводников». М., Высшая школа, 1975.
 4. К.В.Шалимова «Физика полупроводников». М., Энергоатомиздат, 1985.
 5. С.Зи «Физика полупроводниковых приборов». М: Мир, 1984.
 6. Н.Мотт, Э.Дэвис «Электронные процессы в некристаллических веществах» М: Мир, 1974.
 7. Ю.И.Уханов «Оптические свойства полупроводников» М: Наука, 1977
- Примечание: При подготовке к экзамену по отрасли «технические науки» необходимо особое внимание обратить на раздел 13 программы.

Дополнительная программа кандидатского минимум по специальности
1.3.11. - Физика полупроводников

1. Растворная электронная микроскопия

- 1.1 Основные физические закономерности взаимодействия электронного пучка с поверхностью полупроводника.
- 1.2 Методы исследования РЭМ полупроводниковых и диэлектрических материалов
- 1.3 Рентгеновский микроанализ. Разрешающая способность методики.
- 1.4 Электронно-лучевая литография.
- 1.5 Основные физические закономерности взаимодействия ионного пучка с поверхностью твердых тел.
- 1.6 Ионное травление.
- 1.7 Ионная литография.
- 1.8 Осаждение металлов ионным пучком из металлоорганических соединений.
- 1.9 Техника безопасности при работе с электронным микроскопом

2. Фурье спектроскопия

- 2.1.Основные принципы работы Фурье спектрометра.
- 2.2.Спектральные зависимости показателей поглощения и отражения.
- 2.3. Методы определения оптических констант.

3. Основы сканирующей зондовой микроскопия.

- 3.1 Туннельная микроскопия
- 3.2 Атомно - силовая микроскопия.
- 3.3. Электросиловая микроскопия.
- 3.4 Магнитно-силовая микроскопия
- 3.5. Обработка СЗМ изображений.

Основная литература

1. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учебное пособие [для вузов по направлению подготовки бакалавров, магистров 010700 ""Физика"" и специальности 010701 ""Физика""] / В. Гуртов.-М.: Техносфера, 2007.- 406, [1] с.
2. Гуртов В. А. Физика твердого тела для инженеров : учебное пособие / В. А. Гуртов, Р. Н. Осауленко ; науч. ред. Л. А. Алешина.-М.: Техносфера, 2007.-518 с.

3. Пул Ч. Ч. Нанотехнологии : учебное пособие по направлению подготовки Нанотехнологии / Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс ; пер. с англ. под ред. Ю. И. Головина ; доп. В. В. Лучинина.-М.: Техносфера, 2007.- 334 с.
4. Спиридов О. П. Физические основы твердотельной электроники : [учебное пособие для вузов по техническим направлениям подготовки и специальностям] / О. П. Спиридов.-М.: Высшая школа, 2008.- 190, [1] с
5. Драгунов В. П. Наноструктуры: физика, технология, применение : учебное пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2010. - 354

Дополнительная литература

- 1 М. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Изд. «Техносфера», Москва, 2004г. 145 с.
- 2 В. Неволин. Зондовые нанотехнологии в электронике.изд. «Техносфера», Москва 2005г.
- 3 Т.И. Данилова, К.И. Смирнова, В.А. Илюшин. Процессы микро- и нанотехнологии [учебное пособие для вузов по техническим направлениям подготовки и специальностям] / Томск, 2005
- 4 Игнатов А. Н. Основы электроники : [учебное пособие для вузов по направлению "Телекоммуникации"] / А. Н. Игнатов [и др.] ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики [и др.]. - Новосибирск, 2005. - 323 с. : ил.
- 5 Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники. В 2 т.. Т. [учебник для вузов по направлению подготовки бакалавров, магистров и специалистов "Электроника и микроэлектроника"] / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. - М., 2006. - 439, [1] с. : ил., табл.
- 6 Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников : [учебное пособие для вузов по физическим и техническим направлениям и специальностям] / А. И. Ансельм. - СПб. [и др.], 2008. - 618 с. :
- 7 Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Пер. с англ. А. А. Гусева, А. В. Пахнева; Под общ. ред. А. А. Гусева. - М., 1978. - 791 с.
- 8 Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. -М., Высшая школа, 1986.
- 9 Викулин И.М., Стafeев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М., Радио и связь, 1990.
- 10 Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника. Под ред. Федорова Н.Д. –М., Радио и связь, 1998.

Правила аттестации:

Оценка знаний аспиранта осуществляется в виде кандидатского экзамена по билетам. В билеты включаются вопросы из основной и дополнительной

частей программы кандидатского экзамена по специальности. По результатам ответа на вопросы по билету и при необходимости на дополнительные вопросы аспирант может получить следующие оценки:

Отлично – на все вопросы в билете даны правильные ответы, полностью раскрывающие суть вопросов, и на дополнительные вопросы, заданные комиссией аспирант ответил правильно и полностью.

Хорошо – на вопросы даны правильные, но не полные ответы. Раскрыта суть рассматриваемого процесса, но не приведены примеры. На дополнительные вопросы, заданные комиссией аспирант ответил правильно и полностью.

Удовлетворительно – только на часть из вопросов дан правильный ответ, но на дополнительные вопросы, заданные комиссией поступающий в аспирантуру ответил правильно и полностью.

Неудовлетворительно – на вопросы по билету аспирант ответил не правильно