



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
и инновациям
Ашурбеков Н.А.



Ашурбеков марта 2020 г.

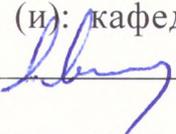
ПРОГРАММА - МИНИМУМ
кандидатского экзамена по подготовке кадров высшей квалификации
по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия»
(физико-математические науки)

Направленность (профиль) программы

01.04.10 - Физика полупроводников

Махачкала – 2020 г.

Программа – минимум кандидатского экзамена по направлению 03.06.01 – Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации), направленность (профиль) программы «Физика полупроводников» составлена в 2020 году в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО), утвержденным приказом Минобрнауки РФ от «30» июля 2014 г. № 867.

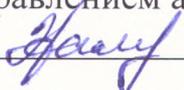
Разработчик (и): кафедра инженерной физики, Садыков С.А., д.ф.-м.н., профессор 

Программа – минимум кандидатского экзамена одобрена: на заседании ученого совета физического факультета от « 28 » 02 20 20 г., протокол № 6

Председатель совета  Курбанисмаилов В.С.
« 28 » 02 20 г.

на заседании Методической комиссии физического факультета от « 27 » 02 20 г., протокол № 6

Председатель  Ж.Х. Мурлиева

Программа – минимум кандидатского экзамена по направлению 03.06.01 – Физика и астрономия согласована с Управлением аспирантуры и докторантуры « 26 » марта 2020 г.  Э.Т. Рамазанова

ПРОГРАММА-МИНИМУМ
кандидатского экзамена по специальности
01.04.10 "Физика полупроводников"
по физико-математическим наукам

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.

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. 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.

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. Изоэнергетические 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 в 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. Вольт-амперная 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 фононах (Рамана - Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна - Манделъштама).
- 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.

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 $p-n$ перехода. Приборы с использованием $p-n$ 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.

Основная литература

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Лань, 2010. – (62 экз.).
2. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2009. - 335 с. (20 экз.).
3. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М., Наука 2-е издание. 1990 г, 688 с. – (5 экз.).
4. Орешкин П.П. Физика полупроводников и диэлектриков: учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по специальности "Полупроводники и диэлектрики. М.: Высшая школа, 1977. - 448 с. (17 экз.).
5. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов: учебное пособие / А.И. Лебедев. - Москва: Физматлит, 2008. - 488 с. – (31 экз.)

Дополнительная литература

6. Горбачев, В.В. Физика полупроводников и металлов: учебник для вузов / В. В. Горбачев, Л. Г. Спицина. - изд. 2-е перераб. и допол. - М.: Металлургия, 1982. - 336 с. – (2 экз.).

7. Ю, Питер. Основы физики полупроводников: Пер. с англ. / Ю, Питер; Мануэль Кардона; Под ред. Б.П.Захарчени. - М.: Физматлит, 2002. - 560 с (3 экз.)
8. Гольдаде, В.А. Физика конденсированного состояния: пособие / В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук; ред. Н.К. Мышкина. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309> (06.10.2018).
9. Гуртов, В.А. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко ; науч. ред. Л.А. Алешина. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Техносфера, 2012. - 560 с. - (Мир физика и техники). - ISBN 978-5-94836-327-1; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233466> (06.10.2018).

Интернет- ресурсы.

1. ЭБС IPRbooks: <http://www.iprbookshop.ru/>
2. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн» www.biblioclub.ru.
3. Электронной библиотека на <http://elibrary.ru>.
4. Электронный каталог НБ ДГУ [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о всех видах лит, поступающих в фонд НБ ДГУ/Дагестанский гос. ун-т. – Махачкала, 2010 – Режим доступа: <http://elib.dgu.ru>.
5. Moodle [Электронный ресурс]: система виртуального обучением: [база данных] / Даг. гос. ун-т. – Махачкала, г. – Доступ из сети ДГУ или, после регистрации из сети ун-та, из любой точки, имеющей доступ в интернет. – URL: <http://moodle.dgu.ru/>
6. Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов» <http://school-collection.edu.ru>.
7. Сайт образовательных ресурсов Даггосуниверситета <http://edu.icc.dgu.ru>
8. <http://www.phys.msu.ru/rus/library/resources-online/> - электронные учебные пособия, изданные преподавателями физического факультета МГУ.
9. <http://www.phys.spbu.ru/library/> - электронные учебные пособия, изданные преподавателями физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.
10. Springer. <http://link.springer.com>, <http://materials.springer.com/>
11. Scopus: <https://www.scopus.com>
12. Web of Science: webofknowledge.com