

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

**ПОСЛЕВУЗОВСКОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ  
(АСПИРАНТУРА)**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе

\_\_\_\_\_ Шелупанов А.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

**ПРОГРАММА**

Кандидатского экзамена по специальности  
**01.04.10 ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

РАССМОТРЕНА И ОДОБРЕНА на заседании обеспечивающей кафедры физической электроники факультета электронной техники ТУСУР.  
протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

Программа СОГЛАСОВАНА с факультетами, кафедрами, реализующими основные образовательные программы по специальностям аспирантуры.

Декан ФЭТ \_\_\_\_\_ А.И. Воронин

Зав. выпускающей кафедрой ФЭ \_\_\_\_\_ П.Е. Троян

Зав. выпускающей кафедрой ЭП \_\_\_\_\_ С.М. Шандаров

Зав. выпускающей кафедрой Физики \_\_\_\_\_ Е.М. Окс

Зав. ОППО \_\_\_\_\_ И.А. Ярымова

Томск 2012

**1. ПРОГРАММА-МИНИМУМ**  
**кандидатского экзамена по специальности**  
**01.04.10 ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**  
по физико-математическим и техническим наукам

**Тема 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников**

Основные вопросы темы:

1.1. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-Ваальсова, ионная и ковалентная связь.

1.2. Структуры важнейших полупроводников – элементов  $A^{IV}$ ,  $A^{VI}$  и соединений типов  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$ .

1.3. 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.

1.4. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

**Тема 2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров**

Основные вопросы темы:

2.1. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.

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

2.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

2.4. Методы легирования полупроводников.

2.5. 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.

**Тема 3. Основы зонной теории полупроводников**

Основные вопросы темы:

3.1. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.

3.2. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.

3.3. 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.

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

#### **Тема 4. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках**

##### Основные вопросы темы:

4.1. 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.

4.2. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

#### **Тема 5. Кинетические явления в полупроводниках**

##### Основные вопросы темы:

5.1. Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.

5.2. 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.

#### **Тема 6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках**

##### Основные вопросы темы:

6.1. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Время жизни. Фотопроводимость.

6.2. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

6.3. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

#### **Тема 7. Контактные явления в полупроводниках**

##### Основные вопросы темы:

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

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

7.3. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

7.4. Варизонные полупроводники.

## **Тема 8. Свойства поверхности полупроводников**

### Основные вопросы темы:

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

8.2. Эффект поля.

8.3. Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

## **Тема 9. Оптические явления в полупроводниках**

### Основные вопросы темы:

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

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

9.3. Поглощение света на свободных носителях заряда.

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

9.5. 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.

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

9.7. Эффект Бурштейна-Мосса.

9.8. Эффекты Фарадея и Фойгта.

## **Тема 10. Фотоэлектрические явления**

### Основные вопросы темы:

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

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

10.3. Фоторазогрев носителей заряда.

10.4. Фотоэлектромагнитный эффект.

## **Тема 11. Некристаллические полупроводники**

### Основные вопросы темы:

11.1. Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники.

11.2. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности.

11.3. Легирование некристаллических полупроводников.

11.4. Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.

11.5. Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.

11.6. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.

11.7. Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

## **Тема 12. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки**

### Основные вопросы темы:

12.1. 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.

12.2. 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.

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

## **Тема 13. Принципы действия полупроводниковых приборов**

### Основные вопросы темы:

13.1. Вольтамперная характеристика  $p-n$  перехода. Приборы с использованием  $p-n$  переходов.

13.2. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

13.3. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.

13.4. Шумы в полупроводниковых приборах.

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

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

13.7. 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.

## ЛИТЕРАТУРА

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. – Изд-во «Лань», 2008. – 624 с. – [электронный ресурс]. – <http://e.lanbook.com/view/book/693/>
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник для вузов. – 4-е изд. стер. – С.-П.: Лань, 2010. – 384 с. – [электронный ресурс]. – [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=648](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648)
3. Троян П.Е. Микроэлектроника. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 346 с. **(50)**

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Физика твердого тела. Под редакцией Верещагина И.К. – М.: Высшая школа, 2001. – 238 с. **(14)**
5. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие / ред.: Л.А. Алешина. – М.: Техносфера, 2007. – 518 с. **(1)**
6. Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. Твердотельная электроника. – Изд. МГТУ им. Баумана, 2003. – 189 с. **(2)**
7. Чупрунов Е.В. Кристаллография: Учебник для вузов / Е.В. Чупрунов, А.Ф. Хохлов, М.А. Фадеев. – М.: Физматлит, 2000. – 496 с. **(1)**
8. Агафонников В.Ф. Физика полупроводниковых структур: учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 198 с. **(41)**
9. Павлов П.В. Физика твердого тела: Учебник для вузов / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2000. – 496 с. **(60)**
10. Епифанов Г.И. Физика твердого тела: Учебное пособие. – 4-е изд., стер. – СПб.: Изд-во Лань, 2011. – 288 с. – [электронный ресурс]. – [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2023](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2023)
11. Смирнов С.В. Физика твердого тела: учебное пособие: в 2-х ч. – Томск: ТМЦДО, 2002 – Ч. 2: Физика полупроводников. – Томск: ТМЦДО, 2002. – 127 с **(11)**
12. Смирнов С.В. Физика твердого тела: учебное пособие. – Томск: ТМЦДО, 2000. – 89 с. **(16)**
13. Смирнов С.В. Физика твердого тела: учебное пособие. – Томск: Издательство научно-технической литературы, 2003. – 276 с. **(8)**
14. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа, 2006. – 480 с.
15. Щука А.А. Электроника. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 800 с.
16. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 488 с.
17. Драгунов, В.П. Основы наноэлектроники: учебное пособие для вузов / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. – М.: Физматкнига, 2006; М.: Логос, 2006; М.: Университетская книга, 2006. – 494 с. **(31)**

**Примечание.** При подготовке к экзамену по техническим наукам необходимо особое внимание обратить на раздел 13 программы.

**2. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА**  
**кандидатского экзамена по специальности**  
**01.04.10 ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**  
по физико-математическим и техническим наукам

**Тема 1. Размерное квантование и квантово-размерные структуры**

Основные вопросы темы

1.1. Принцип размерного квантования. Потенциальная яма цепочки атомов. Условия наблюдения размерных эффектов. Плотность состояний. Двумерный случай. Трехмерный случай Одномерный случай. Типы низкоразмерных систем. Треугольная квантовая яма. Прямоугольная квантовая яма. Структуры с туннельнопрозрачными барьерами.

1.2. Квантовая механика простейших структур. Прямоугольная потенциальная яма. Треугольная потенциальная яма. Двойная квантовая яма. Сверхрешетки. Образование минизон.

**Тема 2. Технология низкоразмерных систем**

Основные вопросы темы

2.1. Требования к технологии создания гетеропереходов. Химические аналоги. Близость постоянных решетки. Резкость гетерограницы.

2.2. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений. Методы нанолитографии.

2.3. Самоорганизация квантовых точек и нитей. Режимы роста гетероэпитаксиальных структур. Рост наноструктур на фасетированных поверхностях. Трехмерные массивы когерентно-напряженных островков.

**Тема 3. Статистика электронов. Свободные и связанные электроны**

Основные вопросы темы

3.1. Статистика носителей в низкоразмерных структурах. Экранирование. Трехмерный случай. Двумерный случай.

3.2. Примесные состояния и экситоны в низкоразмерных структурах. Водородоподобный центр двумерный случай. Водородоподобный центр одномерный случай. Экситон. Двумерный случай.

**Тема 4. Оптика квантово-размерных структур**

Основные вопросы темы

4.1. Вероятность перехода в поле электромагнитной волны. Межзонное поглощение. Межуровневые переходы. Оптическая ионизация квантовых ям. Эффекты деполяризации.

**Тема 5. Сильные магнитные поля и квантовый эффект Холла**

Основные вопросы темы

5.1. Спектр и динамика двумерных электронов в сильном магнитном поле. Определение g-фактора 2d-системы методом совпадений. Целочисленный квантовый эффект Холла. Эффекты локализации и их роль в КЭХ. Дробный КЭХ.

**Тема 6. Свойства квантовых нитей и точек**

Основные вопросы темы

6.1. Баллистическая проводимость нитей. Кулоновская блокада.

## **Тема 7. Применение квантово-размерных структур в приборах микро- и наноэлектроники**

### Основные вопросы темы

- 7.1. Лазеры с квантовыми ямами и точками.
- 7.2. Оптические модуляторы.
- 7.3. Фоточувствительные *piri*-структуры. Фотоприемники на квантовых ямах. Лавинные фотодиоды.
- 7.4. Транзисторы с высокой подвижностью носителей. Транзисторы на горячих электронах. Резонансно-туннельный транзистор на квантовой точке.
- 7.5. Приборы на основе баллистического транспорта.
- 7.6. Одноэлектронный транзистор. Устройства на основе одноэлектронных транзисторов.
- 7.7. Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика.

## **Тема 8. Суперионные проводники**

### Основные вопросы темы

- 8.1. Открытие и классификация суперионных проводников. СИП с кристаллическим каркасом.
- 8.2. Аморфные или стеклообразные СИП. Полимерные СИП.
- 8.3. AgI.  $\beta$ -PbF<sub>2</sub>.

## **Тема 9. Физические методы исследования поверхности твердого тела и тонких пленок**

### Основные вопросы темы:

- 9.1. Электронная оже-спектроскопия.
- 9.2. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами.
- 9.3. Фотоэлектронная спектроскопия.
- 9.4. Спектроскопия рассеяния медленных ионов. Спектроскопия резерфордского обратного рассеяния и спектроскопия рассеяния ионов средних энергий.
- 9.5. Инфракрасная Фурье-спектроскопия.
- 9.6. Дифракция быстрых электронов. Дифракция медленных электронов. Рентгеновская дифракция под скользящими углами.
- 9.7. Полевая эмиссионная микроскопия. Полевая ионная микроскопия.
- 9.8. Просвечивающая электронная микроскопия.
- 9.9. Отражательная электронная микроскопия.
- 9.10. Микроскопия медленных электронов.
- 9.11. Сканирующая электронная микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия.
- 9.12. Атомно-силовая микроскопия.



## ЛИТЕРАТУРА

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля: Учебное пособие для вузов: Пер. с англ.; ред. пер.: С.Л. Баженов; авт. дополнения: О. В. Егорова. – М.: Техносфера, 2006. – 377 с. (5)
2. Щука А.А. Электроника. Учебное пособие под ред. А.С. Сигова. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 800 с.
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник для вузов. – 4-е изд. стер. – С.-П.: Лань, 2010. – 384 с. – [электронный ресурс]. – [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=648](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648)

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. – Изд-во «Лань», 2008. – 624 с. – [электронный ресурс]. – <http://e.lanbook.com/view/book/693/>
2. Погосов В.В. Введение в физику зарядовых и размерных эффектов. Поверхность, кластеры, низкоразмерные системы. – Физматлит, 2006. – 328 с.
3. Троян П.Е. Микроэлектроника. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 346 с. (50)
4. Воронов В.К., Подоплелов А.В. Современная физика: Конденсированное состояние. – ЛКИ, 2008. – 336 с.
5. Калинин В.В., Белянкова Т.И. Динамика поверхности неоднородных сред. – Физматлит, 2009. – 312 с.
6. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности: учебник-монография. – Интеллект, 2008. – 568 с.
7. Лифшиц В.Г. Основы физики поверхности полупроводников: уч. пособие. – ИАПУ ДВО РАН, 1999. – 132 с.
8. Чеботкевич Л.А. Физические основы технологии и формирования конденсированных сред: уч. пособие. – Владивосток: ДВГУ, 2001. – 264 с.
9. Гусев А.И. Нестехиометрия, беспорядок, ближний и дальний порядок в твердом теле. – Физматлит, 2007. – 856 с.
10. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. – Физматлит, 2007. – 632 с.
11. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. – М.: Мир, 2003. – 683 с.
12. Ципенюк Ю.М. Квантовая макро- и микрофизика. – Физматкнига, 2006. – 640 с.
13. Цвелик А.М. Квантовая теория поля в физике конденсированного состояния. Пер.с англ. – Физматлит, 2002. – 320 с.
14. Миронова Г.А. Конденсированное состояние вещества: от структурных единиц до живой материи. Том 1. – Физический факультет МГУ, 2004. – 532 с.

15. Миронова Г.А. Конденсированное состояние вещества: от структурных единиц до живой материи. Том 2. – Физический факультет МГУ, 2006. – 840 с.
16. Лифшиц В.Г., Репинский С.М. Процессы на поверхности твердых тел. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 704 с.
17. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие / ред.: Л.А. Алешина. – М.: Техносфера, 2007. – 518 с. (1)
18. Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. Твердотельная электроника. – Изд. МГТУ им. Баумана, 2003. – 189 с. (2)
19. Чупрунов Е.В. Кристаллография: Учебник для вузов / Е.В. Чупрунов, А.Ф. Хохлов, М.А. Фадеев. – М.: Физматлит, 2000. – 496 с. (1)
20. Епифанов Г.И. Физика твердого тела: Учебное пособие. – 4-е изд., стер. – СПб.: Изд-во Лань, 2011. – 288 с. – [электронный ресурс]. – [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2023](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2023)
21. Смирнов С.В. Физика твердого тела: учебное пособие. – Томск: Издательство научно-технической литературы, 2003. – 276 с. (8)
22. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа, 2006. – 480 с.
23. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 488 с.
24. Драгунов, В.П. Основы наноэлектроники: учебное пособие для вузов / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. – М.: Физматкнига, 2006; М.: Логос, 2006; М.: Университетская книга, 2006. – 494 с. (31)