

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Политехнический институт  
Факультет приборостроения, информационных технологий и электроники



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ПИ

Д. В. Артамонов

«01» Октября 2014 г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР»

А1.В.ДВ.2.1

Направление подготовки: 03.06.01 — «Физика и астрономия»

Направленность (профиль) Физика полупроводников

Квалификация: **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

Форма обучения: **очная**

Пенза – 2014

Рабочая программа составлена в соответствии с ФГОС ВО по направлению 03.06.01 — «Физика и астрономия» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (уровень подготовки кадров высшей квалификации)

Программу составил:


Кревчик В. Д., д. ф.-м. н., профессор, декан ФПИТЭ



Программа обсуждена на заседании кафедры «Физика»

Протокол № 1.1 от « 1 » октября 2014 года

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_



Семенов М. Б.

Программа согласована с деканом факультета ФПИТЭ

Декан факультета \_\_\_\_\_



Кревчик В. Д.

Программа одобрена методической комиссией факультета ФПИТЭ

Протокол № 1 от « 1 » октября 2014 года

Председатель методической комиссии факультета ФПИТЭ



Задера А. В.

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы**

# **1. Цели и задачи дисциплины, её место в системе подготовки аспиранта, требования к уровню освоения содержания дисциплины**

## **1.1 Цели и задачи изучения дисциплины**

**Цель изучения дисциплины** – формирование представления о предмете, объектах, теоретических и практических достижениях современной физики полупроводников и оптики полупроводниковых наноструктур, а также развитие способностей применять полученные знания для решения задач моделирования, создания и экспериментального исследования полупроводниковых структур и приборов.

### **Задачи дисциплины:**

- изучить строение, физико-химические свойства, кристаллическую структуру полупроводников;
- изучить теорию, описывающую основные свойства полупроводников;
- сбор, изучение и систематизация отечественной и иностранной научно-технической литературы по тематике исследования в области оптики полупроводниковых наноструктур;
- моделирование и расчёт характеристик полупроводниковых структур и приборов;
- изучение сфер применения материалов, компонентов полупроводниковой электроники при создании новых систем функционального назначения.

## **1.2 Место дисциплины в структуре ООП аспиранта**

Дисциплина «Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур» относится к дисциплинам по выбору аспиранта вариативной части учебного плана ООП по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия, профилю – Физика полупроводников.

## **1.3 Связь с предшествующими и последующими дисциплинами**

Курс предполагает наличие у аспирантов знаний по курсам «Общая физика», «Теоретическая физика», «Квантовая механика», «Дополнительные главы математической физики», «Избранные разделы физики конденсированного состояния». Знания и навыки, полученные аспирантами при изучении данного курса, могут быть применены при подготовке и написании диссертации по специальности – Физика полупроводников.

## 2. Компетенции аспиранта, формируемые в результате освоения программы дисциплины «Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур».

Процесс освоения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО по данному направлению подготовки

Коды компетенции	Наименование компетенции	Структурные элементы компетенции (в результате освоения дисциплины обучающийся должен знать, уметь, владеть)
1	2	3
ПК-4	Способность в теоретических и экспериментальных исследованиях использовать достижения современной полупроводниковой наноэлектроники.	<b>Знать:</b> современные данные о достижениях полупроводниковой наноэлектроники и их теоретическое объяснение.
		<b>Уметь:</b> применять теоретические методы расчёта, современные достижения информационных технологий и новейшее оборудование для решения актуальных задач физики полупроводников
		<b>Владеть:</b> навыками теоретических расчётов оптических характеристик структур полупроводниковой наноэлектроники и процессов, протекающих в полупроводниках при заданных условиях

## 3. Структура и содержание дисциплины «Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур»

### 3.1 Структура дисциплины «Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур»

Общая трудоёмкость дисциплины 3 зачётных единицы, 108 часов, в том числе 72 часов подготовки к экзамену.

### 3.2 Содержание дисциплины (Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур)

№ п / п	Наименование разделов и тем дисциплины (модуля)	Семестр	Недели семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Формы текущего контроля успеваемости (неделя)	
				Аудиторная работа			Самостоятельная Работа				
				Всего	Лекция	Практические занятия	Всего	Подготовка к семинару	Подготовка к экзамену		Оценка работы на семинаре
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	<b>Раздел 1. Введение</b>										
	<b>Тема 1.1</b> Химическая связь и атомная структура полупроводников	1	1	1	1	-	4	2	2	2	
	<b>Тема 1.2</b> Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров	1	2	1	1	-	4	2	2	3	
	<b>Раздел 2. Строение, химический состав и электронные процессы в полупроводниках</b>										
	<b>Тема 2.1.</b> Основы зонной теории полупроводников	1	3-4	4	2	2	8	4	4	5	
	<b>Тема 2.2.</b> Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках	1	5	3	1	2	4	2	2	6	
	<b>Тема 2.3.</b> Кинетические явления в полупроводниках	1	6	3	1	2	4	2	2	7	
	<b>Тема 2.4</b> Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках	1	7	3	1	2	4	2	2	8	
	<b>Тема 2.5</b> Контактные явления в полупроводниках		8	3	1	2	4	2	2	9	
	<b>Тема 2.6</b> Свойства поверхности полупроводников		9	2	2	-	2	1	1	10	
	<b>Тема 2.7</b> Оптические явления в полупроводниках		10-11	3	2	1	4	2	2	11	

Тема 2.8 Фотоэлектрические явления		11-12	3	2	1	4	2	2	12
<b>Раздел 3. Виды полупроводниковых структур и приборов на их основе.</b>									
Тема 3.1. Некристаллические полупроводники		13-14	4	2	2	8	4	4	14
Тема 3.2. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки.	1	15-16	4	2	2	8	4	4	16
Тема 3.3. Принципы действия полупроводниковых приборов. Лазеры.	1	17-18	4	2	2	8	4	4	18
<b>Общая трудоемкость, в часах</b>			<b>36</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>72</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	Пром. аттест.
									Форма Сем
									Зач —
									Экз 1

## Раздел 1. Введение

### Тема 1.1. 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.

### Тема 1.2. 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.

## **Раздел 2. Строение, химический состав и электронные процессы в полупроводниках**

### **Тема 2.1. 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.

### **Тема 2.2. 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.

### **Тема 2.3. 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.

#### **Тема 2.4. 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.

#### **Тема 2.5. 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.

#### **Тема 2.6. 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.

#### **Тема 2.7. 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 Поккельса. Эффект Бурштейна – Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта.

### **Тема 2.8. 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.

## **Раздел 3 Виды полупроводниковых структур и приборов на их основе**

### **Тема 3.1. 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.

### **Тема 3.2. 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. Легирование. 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.

### **Тема 3.3. Принципы действия полупроводниковых приборов.**

#### **Лазеры.**

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.

### **3.3 Особенности организации изучения дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья**

Организация изучения дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется в соответствии с:

1. ст.79, 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»

2. Раздел IV, п.п. 46-51 приказа Минобрнауки России от 19.11.2013 № 1259 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)»

3. Методические рекомендации по организации образовательного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в образовательных организациях высшего образования, в том числе оснащенности образовательного процесса (утверждены заместителем Министра образования и науки РФ А.А.Климовым от 08.04.2014 г. № АК-44/05 вн)

#### **4. Образовательные технологии**

В процессе освоения дисциплины «Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур» при проведении аудиторных занятий используются следующие образовательные технологии:

1. Технология развития критического мышления реализуется в ходе проведения следующих видов учебной работы:

1.1 *Проблемные лекции*, предполагающие диалоговый тип лекционного преподавания, предметом которого выступает вводимый лектором материал и система познавательных задач, отражающих основное содержание темы. В виде проблемных лекций реализуются занятия 2.2, 2.5, 3.2, 3.3.

1.2. *Семинары – круглые столы*, в ходе которых происходит групповое обсуждение аспирантами учебной проблемы под руководством преподавателя. В ходе проведения круглого стола аспиранты приобретают навыки устного изложения заранее подготовленного материала, умение выслушивать коллег-сокурсников, делать заключения. В виде семинаров – круглых столов реализуются темы 1.2, 2.7, 2.8, 3.2.

1.3. *Семинары-дискуссии*, в ходе которых обсуждается проблема, поставленная преподавателем, а аспиранты защищают различные точки зрения на поставленную проблему. В ходе проведения дискуссии аспиранты приобретают умение излагать и аргументированно отстаивать точку зрения, обоснованно критиковать оппонентов, сопоставлять различные подходы к решению проблемы, делать выводы. В виде семинаров-дискуссий реализуются темы 2.7, 2.8, 3.3.

2. Медиатехнология реализуется в ходе проведения следующих видов учебной работы:

2.1. *Проблемные лекции*, в ходе которых используются презентации, видео-фрагменты, изображающие физические модели, методы получения наноструктур, схемы устройств, основные этапы вычислений, графическое представление результатов исследований. В виде проблемных лекций с использованием медиатехнологий реализуются темы 1.1 – 2.1, 2.5 – 2.8, 3.1 – 3.3.

2.2. *Семинары – круглые столы*, в ходе которых аспиранты делают краткие сообщения по рассматриваемой проблематике с использованием презентации. В результате использования этой технологии аспиранты учатся лаконично и четко представлять информацию в аудитории. В виде семинаров – круглых столов с использованием медиатехнологий реализуются темы 1.2, 2.4, 2.6, 2.7, 2.8, 3.2, 3.3.

При организации **самостоятельной работы** используются следующие технологии:

1. Технология систематизации имеющейся информации (работа с конспектом лекции для подготовки к экзамену; темы 1.1 – 3.3)

2. Технология поиска и сбора новой информации (работа на компьютере с целью поиска информации в базах данных, работа с учебной, справочной и научной литературой с целью подготовки к семинарам: темы 1.1 – 3.3);

3. Технология анализа и представления новой информации (работа по подготовке устных сообщений на семинарах – круглых столах (темы 1.2, 2.7, 2.8, 3.3, по подготовке для выступлений презентациями на семинарах-дискуссиях (темы 2.7, 2.8, 3.3), по подготовке к экзамену).

В целях реализации индивидуального подхода к обучению аспирантов, осуществляющих учебный процесс по собственной траектории в рамках индивидуального рабочего плана, изучение данной дисциплины базируется на следующих возможностях: обеспечение внеаудиторной работы с аспирантами, в том числе в электронной образовательной среде с использованием соответствующего программного оборудования, дистанционных форм обучения, возможностей интернет-ресурсов, индивидуальных консультаций.

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов**

### **5.1. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости:**

***Виды самостоятельной работы по темам: темы 1.1. - 3.4 Подготовка к семинару – круглому столу (4 часа). Подготовка к экзамену (4 часа).***

## **5.2. Контрольные работы и промежуточное тестирование**

Не предусмотрены.

## **5.3. Поддержка самостоятельной работы:**

Литература и источники для обязательного прочтения. Регулярные консультации. Интернет-ресурсы: Базы данных: ELSEVIER – ScinceDirect; EBSCO – Host; Scopus; ProQuest; LexisNexis; ELIBRARY.RU; SpringerLink; OXFORD-Reference.

## **5.4. Тематика рефератов**

Не предусмотрены.

## **5.5. Промежуточный контроль.**

*Вопросы к экзамену:*

1. Основные кристаллографические свойства полупроводников.
2. Зона Бриллюэна. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.
3. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
4. 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.
5. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Законы дисперсии для важнейших полупроводников.
6. Изознергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы.
7. Влияние электрического поля на искривление энергетических зон. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.
8. Примесные центры в полупроводниках. Виды примесных центров. Влияние ионизованных примесей на свойства полупроводников. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.
9. Равновесная статистика электронов. Вырожденный и невырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрация электронов и дырок в зонах. Факторы вырождения примесных состояний. Положение уровня

- Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках.
10. Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла.
  11. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке.
  12. Основные механизмы рассеяния носителей заряда в кристалле. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость.
  13. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.
  14. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания.
  15. Оже-рекомбинация. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.
  16. Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
  17. Энергетическая диаграмма *p-n*-перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в *p-n*-переходе. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Варизонные полупроводники.
  18. Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация. Эффект поля. Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.
  19. Оптические характеристики вещества. Комплексный показатель преломления. Показатель поглощения. Соотношения Крамерса-Кронига.
  20. Виды оптических переходов в полупроводниках. Оптическое поглощение.
  21. Оптические явления в полупроводниках во внешних полях. Эффект Франца – Келдыша. Эффект Поккельса. Эффект Бурштейна – Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта.
  22. 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.
  23. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных

- состояний. Щель подвижности. Легирование некристаллических полупроводников. Механизмы переноса носителей заряда.
24. Прыжковая проводимость. Закон Мотта. Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.
  25. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки. Легирование.
  26. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.
  27. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах.
  28. 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.
  29. Вольтамперная характеристика  $p-n$ -перехода. Приборы с использованием  $p-n$ -переходов. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.
  30. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.
  31. Шумы в полупроводниковых приборах. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений.
  32. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах.
  33. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (HEMT). 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.
  34. Принцип действия и особенности светодиодов. Эффективность светодиодов. Способы улучшения параметра оптического вывода излучения. Спектр излучения и яркость. Цветовые характеристики светодиодов. Конструкция и основные параметры светодиодов. Диаграмма направленности.
  35. Светодиоды для волоконно-оптических линий связи. Белые светодиоды.

36. Виды полупроводниковых лазеров. Лазеры на двойных гетероструктурах. Основные характеристики полупроводниковых инжекционных лазеров. Пространственные и спектральные характеристики. Расчет пороговой плотности тока и выходной мощности. Вывод излучения и диаграмма направленности. Надежность инжекционных лазеров.
37. Фоторезисторы. Параметры фоторезисторов. Спектральные и вольт-амперные характеристики фоторезисторов.
38. Фотодиоды на основе р-п-переходов. Режимы работы фотодиода. Вольт-амперные, спектральные и частотные характеристики фотодиодов на основе р-п-переходов.

## **6. Рекомендуемая литература:**

### **6.1. Основная литература**

1. [Ансельм А. И.](#) Введение в теорию полупроводников : учебное пособие. - 3-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2016. - 624 с. <https://e.lanbook.com/book/71742> (20 экз)
2. Байков Ю.А. Физика конденсированного состояния: учеб. пособие / Ю.А. Байков, В.М. Кузнецов. — Москва: Издательство "Лаборатория знаний", 2015. — 296 с. <https://e.lanbook.com/book/70766>
3. Брандт Н.Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния: учеб. пособие / Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. — Москва: Физматлит, 2010. — 632 с. <https://e.lanbook.com/book/59598>
4. Владимиров Г.Г. Физика поверхности твердых тел: учеб. пособие — Санкт-Петербург: Лань, 2016. — 352 с. <https://e.lanbook.com/book/71707>
5. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах — Москва: Физматлит, 2013. — 288 с. <https://e.lanbook.com/book/91178>
6. Елифанов, Г.И. Физика твердого тела: учеб. пособие — Санкт-Петербург: Лань, 2011. — 288 с. <https://e.lanbook.com/book/2023>
7. Зегря Г.Г. Основы физики полупроводников: учеб. пособие / Г.Г. Зегря, В.И. Перель.— Москва : Физматлит, 2009. — 336 с. <https://e.lanbook.com/book/2371>
8. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов. — Москва: Физматлит, 2008. — 488 с. <https://e.lanbook.com/book/2244>
9. Перлин Е.Ю. Физика твердого тела. Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов: учеб. пособие / Е.Ю. Перлин, Т.А. Вартанян, А.В.



- Федоров. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2008. — 216 с.  
<https://e.lanbook.com/book/43431>
10. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учеб. — Санкт-Петербург: Лань, 2010. — 384 с. <https://e.lanbook.com/book/648>
11. [Медведев С. П.](#) Физика полупроводниковых и микроэлектронных приборов (биполярные приборы): учеб. пособие / Пенз. гос. ун-т. - Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. - 160 с.
12. Ландау Л Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 2010. (3 экз)
13. [Демиховский В. Я.](#), Вугальтер Г. А. Физика квантовых низкоразмерных структур. - М. : Логос, 2000. - 248 с. (5 экз)
14. [Гинзбург И. Ф.](#) Введение в физику твердого тела. Основы квантовой механики и статистической физики с отдельными задачами физики твердого тела: учебное пособие / И. Ф. Гинзбург. - СПб. : Лань, 2007. - 544 с. (20 экз)
15. [Смирнов Ю. А.](#) Физические основы электроники: учеб. пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. - Москва: Лань, 2013. - 560 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_cid=25&p11\\_id=5856](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=5856)

## 6.2 Дополнительная литература

- 1 Акципетров О. А. Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур: монография / О.А. Акципетров, И.М. Баранова, К.Н. Евтюхов. — Москва: Физматлит, 2012. — 544 с.  
<https://e.lanbook.com/book/5255>
- 2 Кульчин Ю. Н. Современная оптика и фотоника нано- и микросистем — Москва: Физматлит, 2015. — 488 с. <https://e.lanbook.com/book/72018>
- 3 Тимофеев В. Б. Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур: учеб. пособие — Санкт-Петербург: Лань, 2015. — 512 с.  
<https://e.lanbook.com/book/56612>

## 6.3 Интернет-ресурсы

К рекомендуемым интернет-ресурсам по данной дисциплине относятся интернет-ресурсы ведущих российских и зарубежных журналов, а также образовательные порталы и сайты ведущих российских университетов.

Интернет-ресурсы ведущих российских журналов по данной тематике:

[www.journals.ioffe.ru/ft](http://www.journals.ioffe.ru/ft) — «Физика твёрдого тела»

[www.journals.ioffe.ru/ftp](http://www.journals.ioffe.ru/ftp) — «Физика и техника полупроводников»

[www.journals.ioffe.ru/pjtf](http://www.journals.ioffe.ru/pjtf) — «Письма в журнал технической физики»

[www.journals.ioffe.ru / jtf](http://www.journals.ioffe.ru/jtf) — «Журнал технической физики»

[www.jetp.ac.ru](http://www.jetp.ac.ru) — ЖЭТФ

[www.jetpletters.ac.ru](http://www.jetpletters.ac.ru) — «Письма в ЖЭТФ»

[www.ufn.ru](http://www.ufn.ru) — «Успехи физических наук»

[www.maik.com](http://www.maik.com) – «Известия РАН. Серия физическая», «Оптика и спектроскопия»

Интернет-ресурсы иностранных журналов

[www.aps.org](http://www.aps.org)

[www.ArXiv.org](http://www.ArXiv.org)

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур»**

Для освоения данной дисциплины необходимы:

– мультимедийные средства обучения (компьютер и проектор; ресурсы Интернета);

– электронные презентации по теме курса. Для подготовки материала к занятиям требуется программный пакет MS Office 2003 и выше, прикладные математические программы Mathcad 14, Mathematics 5.0, Maple 9.0 и выше.

**Сведения о переутверждении программы на очередной учебный год и регистрации изменений**

Учебный год	Решение кафедры (№ протокола, дата, подпись зав. кафедрой)	Внесенные изменения	Номера листов (страниц)		
			замененных	новых	аннулированных
2015/16	пр. № 1 2.09.15 <i>[подпись]</i>				
2016/17	пр. № 1 9.09.16 <i>[подпись]</i>				
2017/18	пр. № 1 14.09.17 <i>[подпись]</i>				