

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



**УТВЕРЖДАЮ**  
Зам. директора Института по научной работе  
С. В. Лебедев

" " \_\_\_\_\_ 2015 г.

Рабочая программа обязательной дисциплины

**Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур**  
основной образовательной программы подготовки научно-педагогических кадров в  
аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия

профиль подготовки:  
01.04.10 Физика полупроводников

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Принято Ученым советом  
Протокол № 1 от « 20 » февраля 2015 г.

Санкт-Петербург  
2015 г.

Рабочая программа составлена на основании федеральных государственных образовательных стандартов основных образовательных программ высшего образования подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.10 Физика полупроводников.

### **Цель освоения дисциплины**

Рассматриваемая дисциплина является обязательной в подготовке аспирантов, обучающихся по профилю 01.04.10 Физика полупроводников.

Целями освоения дисциплины «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур» являются формирование у аспирантов научного кругозора в физике твердого тела, понимания оптических явлений в твердотельных системах различной размерности и умения самостоятельно планировать экспериментальные и теоретические исследования новых материалов, перспективных в плане практического применения.

## **1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП**

Дисциплина «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур» входит в вариативную часть учебного плана подготовки аспирантов по профилю 01.04.10 и необходима при подготовке выпускной квалификационной работы аспиранта и подготовке к сдаче кандидатского экзамена.

Обучение ведется в форме аудиторных занятий и самостоятельной подготовки.

В результате прохождения курса обучения по данной программе, аспирант должен освоить базовые принципы физики твердого тела в русле проблематики лаборатории (группы), где работает его научный руководитель, и где будет проходить самостоятельная научная работа аспиранта. Изучение данной дисциплины и специфика подачи отдельных вопросов может варьироваться в зависимости от индивидуального плана работы аспиранта, согласованного с его научным руководителем в целях оптимального соответствия решаемым задачам.

### **1. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Процесс изучения дисциплины «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ООП:

#### **3.1. Универсальные компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1).

#### **3.2. Общепрофессиональные компетенции:**

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1).

#### **3.3. Профессиональные компетенции:**

- способность планировать, организовывать работу по проектам, направленным на разработку новых физических принципов работы и создание приборов на базе полупроводниковых материалов и композиционных полупроводниковых структур, разработку методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур. (ПК-1);

- способность осуществлять моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах, технологических процессов и полупроводниковых приборов (ПК-2);

- способность применять технологические методы получения полупроводниковых материалов, композитных структур, структур пониженной размерности и полупроводниковых приборов и интегральных устройств на их основе (ПК-3);

- получать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по теме исследования, выбирать и обосновывать методики и средства решения поставленных задач (ПК-4).

В результате освоения дисциплины аспирант должен демонстрировать и применять углубленные знания в профессиональной деятельности.

## 2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ:

общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы (72 часа).

### 4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов:

Вид учебной работы	Трудоемкость (в часах)
Аудиторные занятия	36
Лекции	36
Семинары	-
Лабораторные занятия	-
Другие виды учебной работы	-
Внеаудиторные занятия	36
Самостоятельная работа аспиранта	36
ИТОГО	72
Вид итогового контроля	зачет

### 4.2. Структура дисциплины

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в часах)			
		Лек	СЕМ	Лаб	СР
1	Уравнения материальной связи и структура электромагнитного поля у идеальной поверхности.	4			6
2	Исследование приповерхностной области полупроводника методами спектроскопии зеркального отражения света.	4			6
3.	Оптические волны в слоистых и периодических средах.	4			4
4	Экситонные состояния в объемном кристалле	4			4
5	Экситонная спектроскопия низкоразмерных полупроводниковых структур.	8			4
6	Взаимодействие света с экситонами в структурах с квантовыми ямами и люминесценция экситонов	4			4
7	Оптическая ориентация экситонов и носителей в структурах пониженной размерности	4			4
8	Заряженные экситонные комплексы	4			4
9	Зачет				
	ИТОГО	36			36

## 3. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ

## **5.1. Содержание аудиторных занятий**

### **Тема 1 – Уравнения материальной связи и структура электромагнитного поля у идеальной поверхности.**

*(лекции - 4 часа)*

Показатель преломления, частотная и пространственная дисперсия диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Граничные условия. Амплитуда и фаза коэффициента отражения. Формулы Френеля. Проблема граничных условий для сред с пространственной дисперсией. Плотность и поток электромагнитной энергии.

*(СР - 6 часа)*

### **Тема 2 – Исследование приповерхностной области полупроводника методами спектроскопии зеркального отражения света.**

*(лекции - 4 часа)*

Спектр зеркального отражения света (межзонные электронные переходы, свободные носители, экситоны, оптические фононы). Тонкие переходные слои. Эллипсометрия. Отражение света в области экситонных резонансов, эффекты пространственной дисперсии и приповерхностного переходного слоя. Формирование приповерхностного экситонного потенциала.

*(СР - 6 часов)*

### **Тема 3 – Оптические волны в слоистых и периодических средах.**

*(лекции - 4 часа)*

Отражение света от многослойной среды: метод матрицы переноса. Планарные периодические системы. Блоховские волны и структура оптических зон. Брэгговские отражатели. Понятие фотонного кристалла. Модель одномерного фотонного кристалла. Микрорезонаторы Фабри-Перо и микрорезонаторные поляритоны. Экситонное отражение света от микрорезонатора с квантовой ямой в активном слое.

*(СР - 4 часа)*

### **Тема 4 – Экситон в объемном кристалле**

*(лекции - 4 часа)*

Объемный экситон, простейший случай; движение центра масс и относительное движение электрона и дырки; объемный экситон в случае вырожденной валентной зоны; квантование движения центра масс в широких квантовых ямах; в узких квантовых ямах; промежуточный случай «кулоновские поправки

*(СР - 4 часа)*

### **Тема 5 – Экситонная спектроскопия низкоразмерных полупроводниковых структур.**

*(лекции - 8 часов)*

Энергетическая структура одиночных квантовых ям, сверхрешеток и квантовых точек. Эффекты размерного квантования в спектрах отражения и неупругого рассеяния света структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Спектры излучения и спектроскопия возбуждения люминесценции низкоразмерных наноструктур. Спектры отражения и пропускания цепочки квантовых ям и короткопериодной сверхрешетки. Зависимость силы осциллятора экситона от ширины квантовой ямы, 2D – 3D переход. Особенности спектров отражения и пропускания длиннопериодных структур с квантовыми ямами. Спектры экситонного отражения структур с квантовыми нитями и точками

*(СР - 4 часа)*

### **Тема 6 – Взаимодействие света с экситонами в структурах с квантовыми ямами и люминесценция экситонов.**

*(лекции - 4 часа)*

Влияние покрывающего слоя на свето-экситонное взаимодействие. Сверхизлучение. Брэгговские СКЯ. Спектры отражения и пропускания брэгговских СКЯ. Микрорезонаторы. Расщепление Раби. Параметрическое усиление на экситонах в микрорезонаторах. Фотолюминесценция и эффекты четырех-волнового смешивания в брэгговских СКЯ.

Время жизни экситона в объеме, квантовой яме, квантовой точке. Однородная ширина линии. Релаксация по локализованным состояниям. Взаимодействие с фононами

(СР - 4 часа)

**Тема 7 – Оптическая ориентация экситонов и носителей в структурах с пониженной размерностью.**

(лекции - 4 часа)

Эффект оптической ориентации в объемных полупроводниках. Эффект Ханле. Оптическая ориентация электронов и дырок в квантовой яме. Механизмы спиновой релаксации носителей в квантовой яме. Особенности спиновой релаксации носителей в квантовых нитях и квантовых точках. Оптическая ориентация экситонов в квантовой яме. Механизмы спиновой релаксации экситонов в квантовой яме. Оптическое выстраивание экситонов в квантовой яме. Фотоэлектрические эффекты, возникающие при спиновой ориентации носителей в квантовой яме. Квантовые биения связанные с эффектом Ханле).

(СР - 4 часа)

**Тема 8 – Заряженные экситонные комплексы.**

(лекции - 4 часа)

Экситоны, связанные на нейтральных и заряженных примесях и заряженные экситоны. Энергия связи заряженных экситонов как функция ширины квантовой ямы, магнитного поля, концентрации электронов. Заряженные экситоны (трионы) в магнитном поле. Синглетные и триплетные состояния трионов. Определение концентрации электронов в квантовой яме по поляризации трионных линий в магнитном поле. Однократно и многократно заряженные трионы в квантовых точках).

(СР - 4 часа)

**5.2. Самостоятельная работа аспиранта**

Самостоятельная работа аспиранта включает повторение лекционного материала по темам, чтение рекомендованной литературы и научной периодики, а также изучение методических рекомендаций к работе в лаборатории.

**6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

Цель контроля - получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

**6.1. Текущий контроль**

Текущий контроль проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, уровень подготовки.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

**6.2. Аттестация**

Аттестация проводится в форме зачета. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

Контрольные вопросы для аттестации:

N	Контрольные вопросы
1.	Показатель преломления, частотная и пространственная дисперсия диэлектрической проницаемости.
2.	Соотношения Крамерса- Кронига. Граничные условия.
3.	Амплитуда и фаза коэффициента отражения. Формулы Френеля.
4.	Плотность и поток электромагнитной энергии.
5.	Спектр зеркального отражения света (межзонные электронные переходы, свободные носители, экситоны, оптические фононы).
6.	Отражение света в области экситонных резонансов
7.	Эффекты пространственной дисперсии и приповерхностного

	переходного слоя
8.	Отражение света от многослойной среды: метод матрицы переноса.
9.	Блоховские волны и структура оптических зон.
10.	Брэгговские отражатели. Понятие фотонного кристалла. Модель одномерного фотонного кристалла.
11.	Микрорезонаторы Фабри-Перо и микрорезонаторные поляритоны.
12.	Экситонное отражение света от микрорезонатора с квантовой ямой в активном слое.
13.	Энергетическая структура одиночных квантовых ям, сверхрешеток и квантовых точек.
14.	Эффекты размерного квантования в спектрах отражения и неупругого рассеяния света структур с квантовыми ямами и квантовыми точками.
15.	Спектры излучения и спектроскопия возбуждения люминесценции низкоразмерных наноструктур.
16.	Поляризационная спектроскопия квантовых ям и квантовых точек.
17.	Спектры отражения и пропускания структур с одиночной квантовой ямой и цепочки квантовых ям.
18.	Зависимость силы осциллятора экситона от ширины квантовой ямы.
19.	Спектры отражения и пропускания Брэгговских структур с квантовыми ямами
20.	Время жизни экситонов в структурах пониженной размерности. Однородная ширина линии
21.	Эффект оптической ориентации носителей в объемных полупроводниках и структурах с квантовыми ямами. Эффект Ханле.
22.	Механизмы спиновой релаксации носителей в квантовых ямах.
23.	Оптическое выстраивание экситонов в квантовых ямах.
24.	Экситоны, связанные на нейтральных и заряженных примесях, и заряженные экситоны.
25.	Энергия связи заряженных экситонов как функция ширины квантовой ямы, магнитного поля, концентрации электронов.

## 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В процессе обучения применяются следующие образовательные технологии:

1. Сопровождение лекций показом визуального материала;
2. Использование компьютерных моделей физических процессов в полупроводниках;
3. Выполнение лабораторных работ с использованием современного научного оборудования.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Учебные, учебно-методические и иные библиотечно-информационные ресурсы обеспечивают учебный процесс и гарантируют возможность качественного освоения аспирантом образовательной программы. ФТИ им. А.Ф.Иоффе располагает обширной библиотекой, включающей общенаучную и специальную литературу.

### 8. Литература

#### Основная литература:

1. Питер Ю, Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников. М. Физмат- лит, 2002

2. Воробьев Л.Е. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах/ Л. Е. Воробьев. – 2001. СПб. «Наука»
3. В.М.Агранович, М.Д.Галанин. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. Москва “Наука”, 1978.
4. К.Вейсбук, Р.Ульбрих. Резонансное рассеяние света, связанное с экситонными поляритонами в полупроводниках. В кн. “Рассеяние света в твердых телах”, вып. III, под ред. М.Кардоны и Г.Гюнтеродта, Москва “Мир”, 1985.
- 5.

#### *Дополнительная литература*

1. Р.Смит «Полупроводники». М.: Мир, 1982
2. Херман М. «Полупроводниковые сверхрешетки». М.: Мир, 1989
3. Винтайкин Б.Е. «Физика твердого тела». М.: МГТУ, 2008

#### **10. Программное обеспечение**

1. Новые полупроводниковые материалы. Наноструктуры. Характеристики и свойства. База данных разработана и поддерживается сектором теоретических основ микроэлектроники: <http://www.matprop.ru/>

#### **9. Интернет-ресурсы**

##### Отечественные журналы:

1. Физика твердого тела  
электронная версия; доступ с 1992 по текущий год
2. Физика и техника полупроводников  
электронная версия; доступ с 1992 по текущий год
2. ЖЭТФ; электронная версия; доступ с 2001 по текущий год
3. Письма в ЖЭТФ электронная версия; доступ с 2008 по текущий год
4. Успехи физических наук электронная версия; доступ с 1988 по текущий год

##### Иностраные журналы:

1. Physical Review B (American Physical Society) электронная версия; доступ с 1970 по текущий год;
2. Physical Review Letters (American Physical Society) электронная версия; доступ с 1958 по текущий год;
3. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer) подписка с 2013 года
4. Central European Journal of Physics доступ с 2003 по текущий год
5. The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer) подписка с 2013 года
6. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
7. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 1958 по 2009
8. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics ) электронная версия; доступ с 1989 по текущий год
9. Nanotechnology (UK Institute of Physics) электронная версия; доступ с 1990 по текущий год
10. Nature (Nature Publishing Group) электронная версия; доступ с 1997 по текущий год
11. Nature Materials (Nature Publishing Group) электронная версия; доступ с 2002 по текущий год  
New Journal of Physics" (UK Institute of Physics) электронная версия; доступ с 1999 по текущий год
12. Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group) электронная версия; доступ с 1798 по текущий год
13. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group ) электронная версия; доступ с 1987 по текущий год
14. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;

- доступ с 1999 по текущий год
15. Physica E (Nanostructures) ) (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
  16. Physica Status Solidi A (Wiley) электронная версия; доступ с 1996 по текущий год
  17. Physica Status Solidi B (Wiley) электронная версия; доступ с 1996 по текущий год
  18. Physica Status Solidi C (Wiley) электронная версия; доступ с 2003 по текущий год
  19. Physica Status Solidi RRL (Wiley) электронная версия; доступ с 2007 по текущий год
  20. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 1972 по 2010

## **12. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН располагает материально-технической базой, соответствующей санитарно-техническим нормам и обеспечивающей проведение всех видов теоретической и практической подготовки, предусмотренной учебным планом.

### ***Наименование оборудования для проведения занятий по дисциплине:***

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер
4. Лаборатория оптики полупроводников и лаборатория спектроскопии твердого тела, располагают экспериментальными комплексами для исследования оптических спектров излучения, поглощения, рассеяния и отражения твердыми телами в широком спектральном интервале от ближней ИК-области до ближней УФ-области спектра в диапазоне температур от гелиевых до комнатной.

Программа разработана профессором, д.ф.-м.н. В.П. Кочерешко; профессором, д.ф.-м.н. А.В. Селькиным.