

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



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

**УТВЕРЖДАЮ**

" " \_\_\_\_\_ 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:  
01.04.07 Физика конденсированного состояния

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 01.04.07 Физика конденсированного состояния.

### **Цель освоения дисциплины**

Рассматриваемая дисциплина является обязательной в подготовке аспирантов, обучающихся по профилю 01.04.07 Физика конденсированного состояния.

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 01.04.07 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 и организовывать работу, направленную на разработку экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами. (ПК-1);

- способность к теоретическому и экспериментальному изучению физических свойств различных конденсированных сред, исследованию воздействия различных видов излучений, других внешних воздействий на природу изменений физических свойств конденсированных веществ (ПК-2);

- способность к разработке математических моделей построения физических моделей и прогнозированию изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения (ПК-3);

- способность 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.

- 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.