

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



УТВЕРЖДАЮ  
Директор  
С.В. Иванов  
«13» 04 2022 г.

Рабочая программа дисциплины  
**ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР**  
программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа дисциплины «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников (далее - программа аспирантуры)

### **1. Цель освоения дисциплины**

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.

### **2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

Дисциплина «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур» входит в обязательную часть образовательного компонента программы подготовки по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников и направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена.

Курс изучается аспирантами на 2-м году обучения. 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.

### **3. Компетенции аспиранта, формируемые в результате освоения дисциплины «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур»**

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

#### **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);

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);

- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);

- готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках (УК-4);

- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5).

### ***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);

- готовность к преподавательской деятельности по образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

### ***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);

- 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.

#### **знать:**

основные разделы дисциплины «Оптическая спектроскопия полупроводниковых



гетероструктур»:

- оптические свойства твердых тел;
- формирование спектров излучения в твердотельных планарных структурах пониженной размерности;
- поляритонный механизм излучения;
- механизмы релаксации экситонов по энергии и импульсу;
- оптические явления во внешних полях;

**уметь:**

- самостоятельно изучать и понимать научную литературу, связанную с проблемами физики твердого тела;
- владеть математическим аппаратом и свободно пользоваться основными формулами, используемыми для оценок величин, характеризующих структуру и свойства кристаллических систем пониженной размерности, кинетические, электрические, фотоэлектрические, поверхностные и оптические явления в полупроводниках и диэлектриках;
- профессионально излагать результаты своих исследований и представлять их в виде научных публикаций, информационно-аналитических материалов и презентаций;

**владеть:**

Свободно владеть знаниями по фундаментальным разделам физики конденсированных сред, необходимыми для решения научно-исследовательских задач, научной терминологией, основными понятиями физики твердого тела в пределах, необходимых для понимания специальной научной литературы, связанной с проблемами физики конденсированных сред пониженной размерности.

**4. Структура и содержание дисциплины «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур»:**

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

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

<b>Вид учебной работы</b>	<b>Трудоемкость</b>
Лекции	36
Самостоятельная работа аспиранта	36
<b>ИТОГО</b>	<b>72</b>
Вид итогового контроля	зачет

#### 4.2. Структура дисциплины

п/п	Темы	Виды учебной работы (в ак. часах)		Контроль
		Лек	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	
	<b>Всего по дисциплине</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>зачет</b>

#### 5. 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 – Экситонные состояния 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:

№	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. Экситонное отражение света от микрорезонатора с квантовой ямой в активном слое.
12	Энергетическая структура одиночных квантовых ям, сверхрешеток и квантовых точек.
13	Эффекты размерного квантования в спектрах отражения и неупругого рассеяния света структур с квантовыми ямами и квантовыми точками.
14	Спектры излучения и спектроскопия возбуждения люминесценции низкоразмерных наноструктур.
15	Поляризационная спектроскопия квантовых ям и квантовых точек.
16	Спектры отражения и пропускания структур с одиночной квантовой ямой и цепочки квантовых ям.
17	Зависимость силы осциллятора экситона от ширины квантовой ямы.
18	Спектры отражения и пропускания Брэгговских структур с квантовыми ямами
19	Время жизни экситонов в структурах пониженной размерности. Однородная ширина линии
20	Эффект оптической ориентации носителей в объемных полупроводниках и структурах с квантовыми ямами. Эффект Ханле.
21	Механизмы спиновой релаксации носителей в квантовых ямах.
22	Оптическое выстраивание экситонов в квантовых ямах.
23	Экситоны, связанные на нейтральных и заряженных примесях, и заряженные экситоны.
24	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 программы аспирантуры располагает обширной библиотекой, включающей общенаучную и специальную литературу.

### **9. 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.Вейсбух, 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.

#### ***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/>

## **11. Интернет-ресурсы**

#### **Отечественные журналы:**

1. Физика твердого тела, электронная версия;

2. Физика и техника полупроводников, электронная версия;
3. ЖЭТФ; электронная версия;
4. Письма в ЖЭТФ электронная версия;
5. Успехи физических наук электронная версия;

Иностранные журналы:

1. Physical Review B (American Physical Society) электронная версия;
2. Physical Review Letters (American Physical Society) электронная версия;
3. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer);
4. Central European Journal of Physics;
5. The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer);
6. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company) электронная версия;
7. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
8. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics ) электронная версия;
9. Nanotechnology (UK Institute of Physics) электронная версия;
10. Nature (Nature Publishing Group) электронная версия;
11. Nature Materials (Nature Publishing Group) электронная версия;
12. New Journal of Physics" (UK Institute of Physics) электронная версия;
13. Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group) электронная версия;
14. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group), электронная версия;
15. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
16. Physica E (Nanostructures) ) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
17. Physica Status Solidi A (Wiley) электронная версия;
18. Physica Status Solidi B (Wiley) электронная версия;
19. Physica Status Solidi C (Wiley) электронная версия;
20. Physica Status Solidi RRL (Wiley) электронная версия;
21. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct) электронная версия;

## **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

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-р физ.-мат. наук, Кочерешко В.П.,  
профессором, д-р физ.-мат. наук, Селькин А.В.