

Министерство науки и высшего образования РФ

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

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора Института по научной работе

П.Н. Брунков



" 09 " 01 2020 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:

01.04.05 Оптика

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Принято Ученым советом

Протокол № 4 от 29.03.2019г.

Санкт-Петербург
2020 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 подготовки 01.04.05 Оптика.

1. Цель освоения дисциплины

Рассматриваемая дисциплина является обязательной в подготовке аспирантов, обучающихся по профилю 01.04.05 Оптика.

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 ООП

Дисциплина «Оптическая спектроскопия полупроводниковых гетероструктур» входит в вариативную часть учебного плана подготовки аспирантов по профилю 01.04.05 и необходима при подготовке выпускной квалификационной работы аспиранта и подготовке к сдаче кандидатского экзамена.

Курс дается для аспирантов и соискателей на 2-м годе их пребывания в аспирантуре. 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 ООП по направлению подготовки «Физика и астрономия»:

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 формулировать задачи экспериментальных исследований, планировать и реализовывать постановку экспериментов, направленных на решение поставленных задач. (ПК-1);

- способность проводить самостоятельные исследования, владеть современными методами оптической спектроскопии (ПК-2);

- способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научных исследованиях в области оптики (ПК-3).

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

знать:

основные разделы научной 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:

- 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, необходимыми для решения научно-исследовательских задач.

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:

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

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 – 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.

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.
- 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/>

11. 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.