

**ГОУ ВПО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ
(СЛАВЯНСКИЙ) УНИВЕРСИТЕТ**

Составлен в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлению 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника и Положением «Об УМКД РАУ».

УТВЕРЖДАЮ:

Директор А.А. Саркисян
«21» июля 2023г.

Инженерно-физический институт

Кафедра: Общей физики и квантовых наноструктур

Автор(ы): к.ф.-м.н., доцент Айрапетян Давид Борисови

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

**Дисциплина: Б1.В.07 «Квантоворазмерные системы
нанoeлектроники»**

**Направление: 11.04.04 «Электроника и
нанoeлектроника»**

**Основная образовательная программа магистратуры:
«Квантовая и оптическая электроника»**

1. Аннотация

Элементная база современной полупроводниковой микроэлектроники постепенно переходит на использование систем пониженной размерности. В этой связи чрезвычайно актуальной задачей становится изучение физических свойств низкоразмерных структур. При этом для экспериментального и теоретического изучения вышеуказанных систем используются с одной стороны технические возможности прецизионных измерений, а с другой — современные теоретические методы квантовой механики, теории поля и статистической физики. В предлагаемом курсе изучаются электронные, электрические и оптические свойства низкоразмерных систем. При этом наряду с квантовыми размерными эффектами обсуждаются также классические размерные эффекты.

Цель преподавания дисциплин:

Целью курса является формирование представлений о физических свойствах электронных систем различной размерности, о том, как влияет понижение размерности на физические явления, и какие новые эффекты при этом появляются, а также дать теоретические основы описания свойств наноструктур квантово-механическими методами. Подготовка будущих специалистов в области микро- и наноэлектроники с необходимым багажом теоретических и прикладных знаний.

Учебная задача: Задачи курса состоят в изложении принципиальных понятий физики твердого тела для систем с пониженной размерностью и развитие основ понимания физических процессов, протекающих в этих системах при внешних воздействиях, а также изложение элементарных представлений об использовании этих явлений в современных областях техники (гетероструктурные лазеры, диоды и т. д.).

Основные методы проведения занятий: лекции, практические занятия, самостоятельная работа.

Список литературы: содержит 5 наименований книг и монографий отечественных и зарубежных авторов, 5 научных статей; этот список поможет студентам освоить и создать свой профессиональный исследовательский инструментарий, обеспечить целостность обучения.

Краткое содержание курса: Классические размерные эффекты. Квантовые размерные эффекты. Энергетический спектр электронных состояний в системах различной размерности. Плотность электронных состояний в системах различной размерности. Квантовые ямы различных форм. Сверхрешетки. Образование минизон. Различные аппроксимации ограничивающего потенциала квантовых ям. Модифицированный потенциал Пешля-Теллера. Модифицированный потенциал Вуда-Саксона. Двумерный электронный газ в магнитном поле. Уровни Ландау. Двумерный электронный газ в электрическом поле. Примесные состояния в квантовых ямах. Феноменологические результаты квантового эффекта Холла. Одноэлектронная теория целочисленного квантового эффекта Холла. Параболические квантовые точки и диски. Слабо сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки. Сильно сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки. Квантовые точки и линзы с покрытием. Межзонное поглощение в эллипсоидальных квантовых точках. Правила отбора. Межзонное поглощение в

эллипсоидальных квантовых линзах. Правила отбора. Генерация второй гармоники в квантовых точках. Полупроводниковые приборы на квантовых точках.

2. Требования к исходным уровням знаний и умений студентов

Знать:

Теория поля, квантовая механика, статистическая физика, квантовая теория твердого тела.

Уметь:

Интерпретировать теоретические расчеты и сформулировать основные результаты расчетов.

Владеть:

Навыками решения дифференциальных уравнений второго порядка частными производными.

3. Цель и задачи дисциплины

Основная цель изучаемой дисциплины — ознакомление студентов с физическими явлениями, протекающими в низкоразмерных системах. Подготовка будущих специалистов в области микро и наноэлектроники с необходимым багажом теоретических и прикладных знаний и дальнейшему изучению специальной литературы по отдельным вопросам данной отрасли.

4.1 Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать:

Знать о специфике физических процессов имеющих место в системах пониженной размерности.

Уметь:

Уметь интерпретировать результаты измерений, а также теоретических расчетов искомых физических характеристик различных низкоразмерных структур.

Владеть:

Иметь навыки для реализации численного моделирования физических процессов, протекающих в размерно-квантованных системах.

4.2 Взаимосвязь с другими дисциплинами специальности:

Квантовые наноструктуры во внешних полях; Оптические явления в наноструктурах.

5. Трудоемкости дисциплины и видов учебной работы по учебному плану

Виды учебной работы	Всего (ак. час)
<i>Общая трудоемкость изучения дисциплины, в т.ч.:</i>	144 (4 кр.)
1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	50
1.1. Лекционные занятия	18
1.2. Семинарские занятия	-
1.3. Практические занятия	32
1.4. Лабораторные работы	-
2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	58
2.1. Контактная самостоятельная работа	-
2.2. Бесконтактная самостоятельная работа	58
<i>Итоговый контроль</i>	<i>Экзамен</i> 36

6. Распределение весов по формам контроля

Веса и формы контролей	Вес форм текущих контролей в результирующей оценке текущего контроля			Вес форм промежуточных контролей и результирующей оценки текущего контроля в итоговой оценке промежуточного контроля			Вес итоговых оценок промежуточных контролей в результирующей оценке промежуточного контроля	Вес результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля
	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Вид учебной работы/ контроля								
Контрольная работа				0	0	0,5		
Тест								
Курсовая работа								
Лабораторные работы								
Письменные домашние задания	0	0	1					
Эссе								
Семинар	0	0	0					
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках соответствующих промежуточных контролей				0	0	0,5		
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 3-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							1	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес оценки экзамена/зачета в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	∑=0	∑=0	∑=1	∑=0	∑=0	∑=1	∑=1	∑=1

7. Содержание дисциплины

7.1 Тематический план и трудоемкости аудиторных занятий

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекционные занятия (ак. часов)	Семинарские занятия (ак. часов)	Практические занятия (ак. часов)	Лабораторные работы (ак. часов)
1	2	3	4	5	6
МОДУЛЬ 1. ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ				-	-
Введение				-	-
Раздел 1. Низкоразмерные системы и наноструктуры				-	-
<i>Тема 1.1. Классические размерные эффекты</i>	3	1		2	-
<i>Тема 1.2. Квантовые размерные эффекты</i>	2	1		1	-
<i>Тема 1.3. Энергетический спектр электронных состояний в системах различной размерности</i>	2	1		1	
<i>Тема 1.4. Плотность электронных состояний в системах различной размерности</i>	2			2	
Раздел 2. Квантовые ямы и сверхрешетки				-	-
<i>Тема 2.1. Квантовые ямы различных форм</i>	3	1		2	-
<i>Тема 2.2. Сверхрешетки. Образование минизон</i>	3	1		2	-
<i>Тема 2.3. Различные аппроксимации ограничивающего потенциала квантовых ям. Модифицированные потенциалы Пешля-Теллера и Вуда-Саксона</i>	3	1		2	-
Раздел 3. Двумерный электронный газ				-	-
<i>Тема 3.1. Двумерный электронный газ в магнитном поле. Уровни Ландау</i>	3	1		2	-
<i>Тема 3.2. Двумерный электронный газ в электрическом поле. Эффект Штарка</i>	3	1		2	-
<i>Тема 3.3. Примесные состояния в квантовых ямах</i>	3	1		2	
Раздел 4. Квантовый эффект Холла				-	-
<i>Тема 4.1. Феноменологические результаты квантового эффекта Холла</i>	3	1		2	-
<i>Тема 4.2. Целочисленный квантовый эффект Холла. Одноэлектронная теория</i>	3	1		2	-
Раздел 5. Квантовые точки. Теорема Кона				-	-
<i>Тема 5.1. Параболические квантовые точки и диски. Циклотронный резонанс</i>	3	1		2	-
<i>Тема 5.2. Слабо сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки</i>	2	1		1	-
<i>Тема 5.3. Сильно сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки</i>	2	1		1	-
<i>Тема 5.4. Квантовые точки и линзы с покрытием</i>	3	1		2	-
Раздел 6. Межзонное поглощение в квантовых точках				-	-
<i>Тема 6.1. Межзонное поглощение в нульмерных структурах</i>	2	1		1	-
<i>Тема 6.2. Генерация второй гармоники в квантовых точках</i>	3	1		2	-
<i>Тема 6.3. Полупроводниковые приборы на квантовых точках</i>	2	1		1	-
ИТОГО	50	18	-	32	-

7.2 Содержание разделов и тем дисциплины

МОДУЛЬ 1.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Введение

Общие сведения о полупроводниковых наноструктурах. Их значение для фундаментальной и прикладной науки. Области применений.

Раздел 1. Низкоразмерные системы и наноструктуры

Тема 1.1. Классические размерные эффекты ([5])

Тема 1.2. Квантовые размерные эффекты

Квантовые размерные эффекты. Условия наблюдения квантово-размерных эффектов. Методы формирования и примеры низкоразмерных систем и наноструктур. ([1], [2])

Тема 1.3. Энергетический спектр электронных состояний в системах различной размерности

Квантовые ямы, проволоки, точки. Спектр электронных состояний в системах различной размерности (3D, 2D, 1D, 0D) для электронов с параболическим законом дисперсии. ([2], [3], [4])

Тема 1.4. Плотность электронных состояний в системах различной размерности

Плотность электронных состояний в системах различной размерности (3D, 2D, 1D, 0D). ([2], [3], [4])

Раздел 2. Квантовые ямы и сверхрешетки

Тема 2.1. Квантовые ямы различных форм

Волновые функции и спектр электрона в прямоугольной и треугольной яме. ([2], [3], [4])

Тема 2.2. Сверхрешетки. Образование минизон

Полупроводниковые сверхрешетки. Классификация сверхрешеток. Энергетический спектр сверхрешетки. Минизоны в сверхрешетках. Модели разрывов зон. Типы сверхрешеток. Композитные, модулированные сверхрешетки. ([1], [2])

Тема 2.3. Различные аппроксимации ограничивающего потенциала квантовых ям. Модифицированный потенциалы Пешля-Теллера и Вуда-Саксона

Параболический потенциал. Потенциал Пешля-Теллера, Модифицированный потенциал Пешля-Теллера. Модифицированный потенциал Вуда-Саксона, ([1], [2])

Раздел 3. Двумерный электронный газ

Тема 3.1. Двумерный электронный газ в магнитном поле. Уровни Ландау

Двумерный электронный газ в магнитном поле. Энергетический спектр. Магнитная длина. Кратность вырождения уровня Ландау. Плотность состояний. Осцилляции Шубникова-де Гааза. ([1], [3], [4])

Тема 3.2. Двумерный электронный газ в электрическом поле. Эффект Штарка

Штарковская локализация электронов в квантовых ямах сверхрешеток в сильном электрическом поле. ([1], [2], [6])

Тема 3.3. Примесные состояния в квантовых ямах

Примесные состояния мелких центров в квантовых ямах. ([2], [3], [4])

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, МЕЖЗОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Раздел 4. Квантовый эффект Холла

Тема 4.1. Феноменологические результаты квантового эффекта Холла

Классический эффект Холла. Квантовый эффект Холла. Феноменологические результаты. Условия наблюдения. Универсальность холловского кондактанса. ([2], [3])

Тема 4.2. Целочисленный квантовый эффект Холла. Одноэлектронная теория

Целочисленный эффект Холла, одноэлектронная теория. Представление о дробном квантовом эффекте Холла. ([2], [3])

Раздел 5. Квантовые точки. Теорема Кона

Тема 5.1. Параболические квантовые точки и диски

Параболические квантовые точки и диски. Циклотронный резонанс в квантовых точках. Теорема Кона. ([6], [7], лекции)

Тема 5.2. Слабо сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки

Электронные состояния в слабо сплюснутых (вытянутых) эллипсоидальных квантовых точках. ([6], лекции)

Тема 5.3. Сильно сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки

Электронные состояния в сильно сплюснутых (вытянутых) эллипсоидальных квантовых точках. ([6], лекции)

Тема 5.4. Квантовые точки и линзы с покрытием

Электронные свойства слоистых систем. Эллипсоидальные и цилиндрические квантовые точки и линзы с покрытием, (лекции)

Раздел 6. Межзонное поглощение в квантовых точках

Тема 6.1. Межзонное поглощение в нульмерных структурах. Правила отбора

Межзонные переходы в квантовых точках и линзах, правила отбора. ([6], лекции)

Тема 6.2. Генерация второй гармоники в квантовых точках

Задача оптимизации генерации второй гармоники в квантовых точках. ([6], лекции)

Тема 6.3. Полупроводниковые приборы на квантовых точках

Начальное представление о полупроводниковых лазерах. ([1], [2], [3])

7.3 Вопросы

- 1. Классические размерные эффекты.***
- 2. Квантовые размерные эффекты.***
- 3. Энергетический спектр электронных состояний в системах различной размерности.***
- 4. Плотность электронных состояний в системах различной размерности***
- 5. Квантовые ямы различных форм.***
- 6. Сверхрешетки. Образование минизон.***
- 7. Различные аппроксимации ограничивающего потенциала квантовых ям.***
- 8. Модифицированный потенциал Пешиля-Теллера.***
- 9. Модифицированный потенциал Вуда-Саксона.***
- 10. Двумерный электронный газ в магнитном поле***

11. *Двумерный электронный газ в электрическом поле.*
12. *Примесные состояния в квантовых ямах.*
13. *Феноменологические результаты квантового эффекта Холла*
14. *Целочисленный квантовый эффект Холла. Одноэлектронная теория.*
15. *Параболические квантовые точки и диски.*
16. *Слабо сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки.*
17. *Сильно сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки.*
18. *Квантовые точки и линзы с покрытием.*
19. *Межзонное поглощение в эллипсоидальных квантовых точках. Правила отбора.*
20. *Межзонное поглощение в эллипсоидальных квантовых линзах. Правила отбора.*
21. *Генерация второй гармоники в квантовых точках.*
22. *Полупроводниковые приборы на квантовых точках.*

8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

8.1. Рекомендуемая литература

а) Основная литература

- [1] А.Я. Шик и др. Физика низкоразмерных систем. Наука, С-Пб, 2001.
- [2] Казарян Э.М., Петросян С.Г. "Физические основы полупроводниковой наноэлектроники", Ер. Изд. РАУ, 2005.(на арм. яз.)
- [3] Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники. Новосибирск, изд. НГТУ, 2000.
- [4] Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М., "Логос", 2000.
- [5] Займан Дж., Электроны и фононы. М., 1962.
- [6] Harrison P., Quantum Wells, Wires and Dots, Willey-Interscience, 2005.

б) Дополнительная литература

- 17] G.Bastard. Quantum Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures.

8.2. Программные средства освоения дисциплины

Mathematica 10.0, MathLab. 7.0, Origin.

8.3. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Компьютер, проектор