

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

Составлен в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлению 11.03.04 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 Борисович

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Дисциплина: Б1.О.18 «Нанoeлектроника»

Направление: 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

1. Аннотация

Размерное квантование в полупроводниках. Квантовые ямы, проволоки и точки. Плотность состояний в наноструктурах. Некоторые модели потенциалов ограничения. Электронные состояния в квантовых ямах (прямоугольный потенциал, параболический потенциал). Квантовая яма во внешних электрическом и магнитном полях. Полупроводниковые сверхрешетки. Электронные состояния в квантовых проволоках с прямоугольным и круговым сечениями. Квантовая проволока в магнитном поле. Квантовые точки с различными геометриями. Электронные состояния в сферической квантовой точке. Адиабатическое приближение. Электронные состояния в эллипсоидальных квантовых точках. Низкоразмерные экситонные и примесные состояния. Межзонные переходы в квантовых наноструктурах. Прямые и непрямые переходы. Низкоразмерные фононы.

Цель преподавания дисциплины: Специальный курс «Нанoeлектроника» имеет целью дать студентам основные сведения о простейших физических процессах, происходящих в полупроводниковых наноструктурах.

Учебная задача: Сформировать фундаментальные представления о влиянии размерного квантования на характер одночастичного, примесного и экситонного состояний в квантовых наноструктурах. Ознакомиться с основными методами теоретического описания электронных и кулоновских состояний в низкоразмерных системах.

Основные методы проведения занятий: лекции.

Список литературы: содержит 7 наименований книг и монографий отечественных и зарубежных авторов; этот список поможет студентам освоить и создать свой профессиональный исследовательский инструментарий, обеспечить целостность обучения.

Краткое содержание курса: Размерное квантование в полупроводниках. Квантовые ямы, проволоки и точки. Плотность состояний в наноструктурах. Некоторые модели потенциалов ограничения. Электронные состояния в квантовых ямах (прямоугольный потенциал, параболический потенциал). Квантовая яма во внешних электрическом и магнитном полях. Полупроводниковые сверхрешетки. Электронные состояния в квантовых проволоках с прямоугольным и круговым сечениями. Квантовая проволока в магнитном поле. Квантовые точки с различными геометриями. Электронные состояния в сферической квантовой точке. Адиабатическое приближение. Электронные состояния в эллипсоидальных квантовых точках. Низкоразмерные экситонные и примесные состояния. Межзонные переходы в квантовых наноструктурах. Прямые и непрямые переходы. Низкоразмерные фононы.

Взаимосвязь с другими дисциплинами специальности: Квантовая теория твердого тела, Теоретическая механика и электродинамика, Квантовая механика, Методы математической физики.

2. Требования к исходным уровням знаний и умений студентов

Уравнения математической физики, Теоретическая механика и электродинамика, Квантовая механика, физика твердого тела.

3. Цель и задачи дисциплины

Получение студентами необходимого минимума знаний о полупроводниковых наноструктурах, строении их зонной структуры, особенностях электронного и кулоновского спектров, о возможных

применениях полупроводниковых наноструктур в качестве элементной базы приборов нового поколения.

4. Требования к уровню освоения содержания дисциплины

После изучения дисциплины студент должен:

-*знать* основные типы полупроводниковых наноструктур, построение гамильтонианов низкоразмерных систем, особенности плотности состояний и одночастичных состояний низкоразмерных систем;

-*уметь* описывать простейшие модели полупроводниковых наноструктур и связанные с ними квантомеханические задачи;

- *иметь* представление об основных путях развития наноэлектроники;

- *владеть* модельным, математическим и компьютерным инструментарием расчета спектральных характеристик низкоразмерных систем.

-

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 /4кр.
1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	42
1.1. Лекционные занятия	28
1.2. Семинарские занятия	-
1.3. Практические занятия	14
1.4. Лабораторные работы	-
2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	26
2.1. Контактная самостоятельная работа	-
2.2. Бесконтактная самостоятельная работа	26
<i>Итоговый контроль</i>	<i>Экзамен</i> 76

6. Распределение весов по формам контроля

Вид учебной работы/ контроля	Вес формы текущего контроля в результующей оценке текущего контроля			Вес формы промежуточного контроля и результующей оценки текущего контроля в итоговой оценке промежуточного контроля			Вес итоговых оценок промежуточных контролей в резул ьтирующей оценке промежуточного контроля	Вес оценки результующей оценки промежут- ых контролей и оценки итогового контроля в резул- ющей оценке итогового контроля
	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Контрольная работа				0	0	1		
Тест								
Курсовая работа								
Лабораторные работы								
Письменные домашние задания								
Эссе								
Устный опрос	0	0	0					
Вес результующей оценки текущего контроля в итоговых оценках промежуточных контролей				0	0	0		
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 3-го промежуточного контроля в результующей оценке промежуточных контролей							1	
Вес результующей оценки промежуточных контролей в результующей оценке итогового контроля								0.5
Вес оценки экзамена/зачета в результующей оценке итогового контроля								0.5
	$\Sigma=0$	$\Sigma=1$	$\Sigma=0$	$\Sigma=0$	$\Sigma=1$	$\Sigma=0$	$\Sigma=1$	$\Sigma=1$

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)
/	2	3	4	5	6
МОДУЛЬ 1. РАЗМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	10	8	-	2	-
Введение	-	-	-	-	-
Раздел 1. Основные классы полупроводниковых наноструктур	3	3	-	-	-
<i>Тема 1.1. Пространственное ограничение носителей заряда в</i>	1	1	-	-	-
<i>Тема 1.2. Плотности состояний в низкоразмерных структурах</i>	2	2	-	-	-
Раздел 2. Одночастичный энергетический спектр в наноструктурах	7	5	-	2	-
<i>Тема 2.1. Электронные состояния в квантовых ямах</i>	1	1			
<i>Тема 2.2. Электронные состояния в квантовых проволоках</i>	2	2			
<i>Тема 2.3. Электронные состояния в квантовых точках</i>	4	2		2	
НАНОСТРУКТУРЫ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ	15	9	-	6	-
Раздел 3. Влияние электрического и магнитного полей на одноэлектронные состояния во внешних полях	15	9	-	6	-
<i>Тема 3.1. Квантовая яма во внешних полях</i>	5	3	-	2	-
<i>Тема 3.2. Квантовая проволока в магнитном поле</i>	4	2	-	2	-
<i>Тема 3.3. Квантовая точка во внешних полях</i>	6	4		2	
КУЛОНОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ	17	11	-	6	-
Раздел 4. Примесные состояния в	11	7	-	4	-
<i>Тема 4.1. Двумерная кулоновская задача и примесь в квантовой яме</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 4.2. Одномерная кулоновская задача и примесь в квантовой проволоке</i>	5	3	-	2	-
<i>Тема 4.3. Примесные состояния в квантовой точке</i>	4	2		2	
Раздел 5. Низкоразмерные экситоны	6	4		2	
<i>Тема 5.1. Экситонные состояния в наноструктурах</i>	6	4	-	2*	-
ИТОГО	42	28	-	14	-

7.2 Содержание разделов и тем дисциплины

МОДУЛЬ 1. РАЗМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Введение

Явление размерного квантования в полупроводниках. Эффективная длина волны Де Бройля. Приближение тензора эффективной массы. ([1] {1.3;1.4;1.5})

Раздел 1. Основные классы полупроводниковых наноструктур

Тема 1.1. Пространственное ограничение носителей заряда в полу проводниках

Образование потенциального барьера на границе перехода полупроводник-диэлектрик. Квантовая яма-как простейшая низкоразмерная система. Двумерные (квантовые ямы), одномерные (квантовые проволоки) и нульмерные (квантовые точки) системы. Потенциал ограничения квантовой наноструктуры. Модели ограничивающих потенциалов. ([1] {1.6;1.7;1.8})

Тема 1.2. Плотности состояний в низкоразмерных структурах

Понятие плотности состояний, фазовое пространство. Плотность состояний в массивном полупроводнике. Плотность состояний в квантовой яме, проволоке, точке. ([1] {2.1;2.4;2.6;2.10;2.11;2.14})

Раздел 2. Одночастичный энергетический спектр в наноструктурах

Тема 2.1. Электронные состояния в квантовых ямах

Квантовая яма с бесконечно высокими стенками. Прямоугольная яма конечной высоты. Граничные условия с учетом скачка эффективной массы. Параболическая квантовая яма. ([1] {2.1;2.2;2.3})

Тема 2.2. Электронные состояния в квантовых проволоках

Квантовая проволока с прямоугольным сечением. Электронные состояния в квантовых проволоках с круговым сечением (ограничивающие потенциалы бесконечной и конечной высот). ([1] {2.6;2.7;2.8})

Тема 2.3. Электронные состояния в квантовых точках

Квантовые точки. Кубическая и сферическая квантовые точки. Сферическая квантовая точка конечной глубины, квантовый выброс. Параболическая квантовая точка. ([1] {2.11; 2.12; 2.13}, [2] {1.13})

НАНОСТРУКТУРЫ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ

Раздел 3. Влияние электрического и магнитного полей на одноэлектронные состояния во внешних полях

Тема 3.1. Квантовая яма во внешних полях

Влияние однородного электрического поля на электронные состояния в квантовой яме. Особенности шарковского расщепления в непроницаемой квантовой яме. Наложение

однородного магнитного поля вдоль оси квантования ямы и образование полностью дискретного спектра у электрона. ([1] {2.3; }, [2] {2.1; 2.2; 2.3; 5.2}) *Тема 3.2. Квантовая проволока в магнитном поле*

Квантовая проволока с параболическим ограничивающим потенциалом. Наложение однородного магнитного поля вдоль оси квантовой проволоки. Приведенная частота электрона в квантовой проволоке при наличии магнитного поля. ([1] {2.9}, [2] {5.5.1; 5.2}) *Тема 3.3. Квантовая точка во внешних полях*

Цилиндрическая квантовая точка в однородном магнитном и электрическом полях. Сферические и цилиндрические квантовые слоистые структуры во внешнем однородном электрическом поле. Эллипсоидальная квантовая точка во внешнем магнитном поле, адиабатическое приближение. ([1] {2.11; 2.12}, [2] {1.13; 2.8})

КУЛОНОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ

Раздел 4. Примесные состояния в наноструктурах

Тема 4.1. Двумерная кулоновская задача и примесь в квантовой яме

Двумерное уравнение Шредингера для атома водорода. Энергия основного состояния двумерной кулоновской задачи. Водородоподобная примесь в квантовой яме. ([1] {3.1; 3.2; 3.3; 3.6})

Тема 4.2. Одномерная кулоновская задача и примесь в квантовой проволоке

Уравнение Шредингера для одномерного атома водорода. Неустойчивость основного состояния одномерной водородоподобной системы, падение на центр. Примесь в квантовой проволоке, модифицированный одномерный кулоновский потенциал. ([1] {3.4; 3.5; 3.6})

Тема 4.3. Примесные состояния в квантовой точке

Примесь в сферической квантовой точке. Положительные энергии примеси в сферической квантовой точке. Энергия связи примеси в квантовой точке. ([1] {3.1; 3.6}, [2] {3.10})

Раздел 5. Низкоразмерные экситоны

Тема 5.1. Экситонные состояния в наноструктурах

Электронно-дырочный гамильтониан, приведенная эффективная масса экситона. Двухмерные и одномерные экситонные состояния. Экситонное поглощение в квантовой точке. Сила осциллятора экситонного поглощения в квантовой точке. ([1] {3.8}, [2] {3.6})

7.3 Экзаменационные вопросы

1. Явление размерного квантования в полупроводниках.
2. Квантовые ямы, квантовые проволоки, квантовые точки.
3. Плотность состояний в двумерной, одномерной и нульмерной системах.
4. Различные модели ограничивающих потенциалов квантовых наноструктур.
5. Электронные состояния в квантовых ямах (модель прямоугольной ямы).

6. Квантовая яма в однородном магнитном и электрическом поле.
7. Полупроводниковые сверхрешетки. Прохождение частиц через потенциальные барьеры.
8. Квантовые проволоки прямоугольного и круглого сечения (модели бесконечно глубоких стенок).
9. Двумерный асимметричный осциллятор. Круговой осциллятор. Степень вырождения кругового осциллятора.
10. Квантовая проволока в магнитном поле.
11. Квантовые точки. Различные геометрии квантовых точек.
12. Электронные состояния в непроницаемых сферической и эллиптической квантовых точках.
13. Примесные и экситонные состояния в квантовых ямах.
14. Примесные и экситонные состояния в квантовых проволоках.
15. Экситонное поглощение в квантовых точках. Сила осциллятора экситонного поглощения.

8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

8.1. Рекомендуемая литература

а) Базовый учебник

1. Э.М. Казарян, С.Г. Петросян. Физические основы полупроводниковой наноэлектроники, Ереван, Изд. РАУ 2005.

б) Основная литература

2. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. Основы наноэлектроники, Новосибирск. Изд. НГТУ 2004.
3. Л.Е. Воробьев и др. Оптические явления в полупроводниковых квантово-размерных структурах, Санкт-Петербург, Изд. СПбГТУ 2000.
4. G. Bastard. Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures, Les Edition de Physique, les Ulis Cedex, France 1988.
5. J.H. Davies. The physics of low-dimensional semiconductors, Cambridge University Press 1998.
6. В.Я. Демиховский. Г.А. Вугальтер. Физика квантовых низкоразмерных структур, Москва, Изд. Наука 2000.

в) Другие источники

7. <http://edu.ioffe.ru>

8.2. Программные средства освоения дисциплины

Компьютерные программы

- Платформа графической разработки систем моделирования, управления и тестирования LabVIEW
- Система компьютерной математики MATLAB

8.3. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Вычислительная техника
- Проектор
- Слайдоскоп