

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

Составлен в соответствии с  
государственными требованиями к  
минимуму содержания и уровню  
подготовки выпускников по  
указанным направлениям и  
Положением «Об УМКД РАУ».

**УТВЕРЖДАЮ:**

Ректор А.Р. Дарбинян

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2013г.

**Институт Математики и высоких технологий**

**Кафедра: Общей физики и квантовых наноструктур**

*Автор(ы): к.ф.-м.н., ст. преподаватель Айрапетян Давид Борисович*

***УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС***

**Дисциплина: М2.Б.4 «Физика низкоразмерных систем»**

**Направление: «Электроника и наноэлектроника»  
210100.68**

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

**ЕРЕВАН**

## **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, семинары.

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**

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

## **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. Требования к уровню освоения содержания дисциплины**

В результате изучения дисциплины студент должен:

- 1) Иметь представления о специфике физических процессов имеющих место в системах пониженной размерности.
- 2) Уметь интерпретировать результаты измерений, а также теоретических расчетов искомых физических характеристик различных низкоразмерных структур.
- 3) Иметь навыки для реализации численного моделирования физических процессов, протекающих в размерно-квантованных системах.

## 5. Трудоемкости дисциплины и видов учебной работы по учебному плану

<b>Виды учебной работы</b>	<b>Всего (ак. час)</b>
<b><i>Общая трудоемкость изучения дисциплины, в т.ч.:</i></b>	<b>36</b>
<b>1. Аудиторные занятия, в т. ч.:</b>	<b>36</b>
1.1. Лекционные занятия	<b>30</b>
1.2. Семинарские занятия	<b>6</b>
1.3. Практические занятия	-
1.4. Лабораторные работы	-
<b>2. Самостоятельная работа, в т. ч.:</b>	-
2.1. Контактная самостоятельная работа	-
2.2. Бесконтактная самостоятельная работа	-
<b><i>Итоговый контроль</i></b>	<b><i>Зачет</i></b>

## 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		
<b>Вид учебной работы/ контроля</b>								
Контрольная работа				0	0	0,4		
Тест								
Курсовая работа								
Лабораторные работы								
<b>Письменные домашние задания</b>	0	0	0,5					
Эссе								
<b>Семинар</b>	0	0	0,5					
Веса результирующих оценок <b>текущих контролей</b> в итоговых оценках соответствующих промежуточных контролей				0	0	0,6		
Вес итоговой оценки <b>1-го промежуточного контроля</b> в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки <b>2-го промежуточного контроля</b> в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки <b>3-го промежуточного контроля</b> в результирующей оценке промежуточных контролей							1	
Вес <b>результирующей оценки промежуточных контролей</b> в результирующей оценке итогового контроля								1
Вес оценки <b>экзамена/зачета</b> в результирующей оценке итогового контроля								0
	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

## 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)
1	2	3	4	5	6
МОДУЛЬ 1. ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ	36	30	6	-	-
Введение	1	1	-	-	-
<b><u>Раздел 1. Низкоразмерные системы и наноструктуры</u></b>	6	5	1	-	-
<i>Тема 1.1. Классические размерные эффекты</i>	1	1	-	-	-
<i>Тема 1.2. Квантовые размерные эффекты</i>	1	1	-	-	-
<i>Тема 1.3. Энергетический спектр электронных состояний в системах различной размерности</i>	1	1	-	-	-
<i>Тема 1.4. Плотность электронных состояний в системах различной размерности</i>	2	2	-	-	-
<b><u>Раздел 2. Квантовые ямы и сверхрешетки</u></b>	5	4	1	-	-
<i>Тема 2.1. Квантовые ямы различных форм</i>	1	1	-	-	-
<i>Тема 2.2. Сверхрешетки. Образование минизон</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 2.3. Различные аппроксимации ограничивающего потенциала квантовых ям. Модифицированные потенциалы Пеиля-Теллера и Вуда-Саксона</i>	1	1	-	-	-
<b><u>Раздел 3. Двумерный электронный газ</u></b>	6	5	1	-	-
<i>Тема 3.1. Двумерный электронный газ в магнитном поле. Уровни Ландау</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 3.2. Двумерный электронный газ в электрическом поле. Эффект Штарка</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 3.3. Примесные состояния в квантовых ямах</i>	1	1	-	-	-

<b><u>Раздел 4. Квантовый эффект Холла</u></b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<i>Тема 4.1. Феноменологические результаты квантового эффекта Холла</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 4.2. Целочисленный квантовый эффект Холла. Одноэлектронная теория</i>	2	2	-	-	-
<b><u>Раздел 5. Квантовые точки. Теорема Кона</u></b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<i>Тема 5.1. Параболические квантовые точки и диски. Циклотронный резонанс</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 5.2. Слабо сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки</i>	1	1	-	-	-
<i>Тема 5.3. Сильно сплюснутые (вытянутые) эллипсоидальные квантовые точки</i>	1	1	-	-	-
<i>Тема 5.4. Квантовые точки и линзы с покрытием</i>	2	2	-	-	-
<b><u>Раздел 6. Межзонное поглощение в квантовых точках</u></b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<i>Тема 6.1. Межзонное поглощение в нульмерных структурах</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 6.2. Генерация второй гармоники в квантовых точках</i>	2	2	-	-	-
<i>Тема 6.3. Полупроводниковые приборы на квантовых точках</i>	1	1	-	-	-
<b>ИТОГО</b>	<b>36</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

## **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. Модифицированные потенциалы Пешля-Теллера и Вуда-Саксона***

Параболический потенциал. Потенциал Пешля-Теллера, Модифицированный потенциал Пешля-Теллера. Модифицированный потенциал Вуда-Саксона, ([ 61])

**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 Пешля-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.