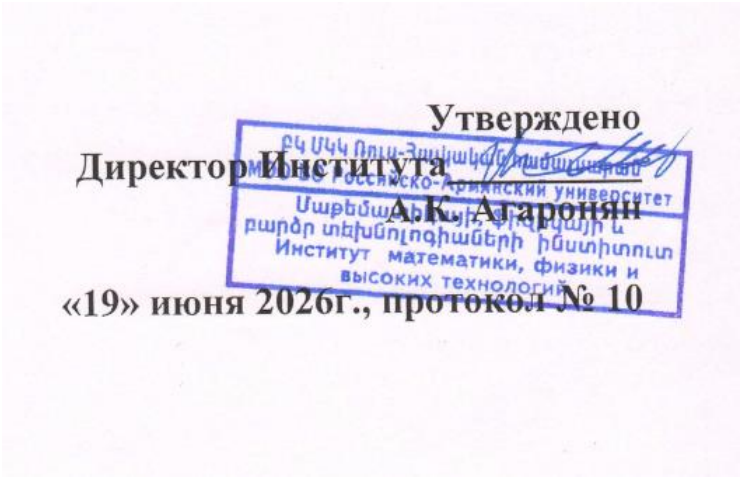
Межгосударственная образовательная организация высшего образования
«Российско-Армянский университет»



Утверждено
Директор Института _____
А.К. Агаронян
«19» июня 2026г., протокол № 10

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.01.01 Квантовые наноструктуры

Автор (ы) _к.ф.-м.н., Маргарян Нарек Бабикович
Ф.И.О, ученое звание (при наличии), ученая степень (при наличии)

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и наноэлектроника
Наименование образовательной программы: Квантовая информатика

Согласовано:

Заведующий Кафедрой общей физики и квантовых наноструктур

Айрапетян Д.Б.



(подпись)

1. **АННОТАЦИЯ**

1.1. Краткое описание содержания данной дисциплины;

Дисциплина «Квантовые наноструктуры» посвящена изучению физических основ, принципов функционирования и особенностей электронных и оптических свойств нанообъектов с квантовыми эффектами. Основное внимание уделяется квантовым точкам, квантовым проводам и квантовым ямам, включая методы их моделирования, синтеза и экспериментального исследования. Рассматриваются эффекты квантового ограничения, туннелирования, взаимодействия носителей заряда, а также их применение в современных наноэлектронных, оптоэлектронных и квантовых устройствах.

1.2. Трудоемкость в академических кредитах и часах, формы итогового контроля (экзамен/зачет);

6 академических кредитов / 216 академических часов. Форма итогового контроля — экзамен.

1.3. Взаимосвязь дисциплины с другими дисциплинами учебного плана специальности (направления)

Введение в квантовую механику, Углубленный курс квантовой механики, Квантовые лаборатории.

1.4. Результаты освоения программы дисциплины:

Код компетенции *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Наименование компетенции** *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Код индикатора достижения компетенций** *(в соответствии рабочим с учебным планом)*	**Наименование индикатора достижений компетенций***(в соответствии рабочим с учебным планом)*
ПК-5	Способен анализировать состояние научно-технической проблемы путем	ПК-5.1	Знает современные технические требования к

	подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников		выбору конструктивно-технологического базиса изделий микро- и наноэлектроники
		ПК-5.2	Умеет анализировать литературные и патентные источники при разработке изделий микро- и наноэлектроники
		ПК-5.3	Владеет навыками конструирования изделий микро- и наноэлектроники

2. **УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА**

2.1. Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины является – освоение студентами фундаментальных знаний о физических принципах, лежащих в основе квантовых наноструктур, а также формирование навыков анализа, моделирования и практического применения таких структур в современной науке и технологиях.

Задачи дисциплины:

1. Изучить квантово-механические основы поведения носителей заряда в ограниченных наноструктурах.
2. Ознакомить студентов с основными типами квантовых наноструктур: квантовые ямы, квантовые провода и квантовые точки.
3. Показать влияние размерных эффектов на электронные и оптические свойства наноструктур.
4. Развить понимание процессов туннелирования, квантового ограничения и квантовой интерференции в наноразмерных системах.
5. Дать представление о методах теоретического и численного моделирования наноструктур.
6. Рассмотреть современные технологии получения и контроля свойств квантовых наноструктур.
7. Изучить влияние внешних полей (электрических, магнитных) и температурных условий на поведение квантовых объектов.

8. Сформировать навыки интерпретации экспериментальных данных и критической оценки научной информации в области нанофизики.
9. Подготовить студентов к выполнению научно-исследовательской и проектной деятельности в области нанотехнологий, квантовой электроники и фотоники.

2.2. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и зачетных единицах) ***(удалить строки, которые не будут применены в рамках дисциплины)***

Виды учебной работы	**Всего, в акад. часах**	**Распределение по семестрам**
		1 сем
1	**2**	**3**
1. Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	**216**	**216**
1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	**96**	**96**
1.1.1. Лекции	**32**	**32**
1.1.2. Практические занятия, в т. ч.		
1.1.3. Лабораторные работы	**64**	**64**
1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	**93**	**93**
1.3. Консультации		
Итоговый контроль (Экзамен, Зачет, диф. зачет - указать)	**Экзамен 27**	**27**

2.3. Содержание дисциплины

2.3.1. Тематический план и трудоемкость аудиторных занятий (модули, разделы дисциплины и виды занятий) по рабочему учебному плану

Разделы и темы дисциплины	**Всего (ак. часов)**	**Лекции(ак. часов)**	**Лабор. (ак. часов)**
1	**2=3+4**	**3**	**4**
Тема 1. Введение в квантовые наноструктуры	**8**	**4**	**4**
Тема 2. Квантовые ямы	**12**	**4**	**8**
Тема 3. Квантовые проволоки	**12**	**4**	**8**
Тема 4. Квантовые точки	**12**	**4**	**8**
Тема 5. Электронные и оптические свойства наноструктур	**14**	**4**	**10**
Тема 6. Туннелирование и эффекты квантовой когерентности	**12**	**4**	**8**

Тема 7. Влияние внешних полей и температур	**14**	**4**	**10**
Тема 8. Моделирование и экспериментальные методы исследования	**12**	**4**	**8**
ИТОГО	**96**	**32**	**64**

2.3.2. Краткое содержание разделов дисциплины в виде тематического плана

Тема 1. Введение в квантовые наноструктуры

Обзор нанотехнологий и их роли в современной науке. Понятие квантовых наноструктур. Размерные эффекты и квантовое ограничение. Области применения: электроника, фотоника, спинтроника, квантовые вычисления.

Тема 2. Квантовые ямы

Физические принципы квантовых ям. Двумерное квантовое ограничение. Решение уравнения Шрёдингера для потенциальной ямы. Спектры энергии и волновые функции. Эффекты межзонного перехода и квантовый эффект Холла.

Тема 3. Квантовые проволоки

Одномерное квантовое ограничение. Структура подзон. Электронный транспорт в квантовых проволоках. Явление кулоновской блокады и квантование проводимости. Методы получения квантовых проволок (литография, рост нанопроволок).

Тема 4. Квантовые точки

Нулевомерные структуры. Энергетическая дискретизация в квантовых точках. Сравнение с атомами: «искусственные атомы». Методы получения: коллоидные, самоорганизующиеся и литографические. Применение в фотонике и биомедицине.

Тема 5. Электронные и оптические свойства наноструктур

Спектральные характеристики, переходы между энергетическими уровнями, люминесценция и поглощение. Эффекты Штарка и Зеемана. Осцилляторные силы. Влияние геометрии и размеров на оптические отклики наноструктур.

Тема 6. Туннелирование и эффекты квантовой когерентности

Квантовое туннелирование в потенциальных барьерах. Двойные квантовые ямы и туннельный резонанс. Когерентные состояния и интерференционные эффекты. Примеры: резонансная туннельная диода, эффект Ааронова–Бома.

Тема 7. Влияние внешних полей и температур

Воздействие электрических и магнитных полей на наноструктуры. Эффект Штарка, эффект Зеемана, циклотронное движение. Температурные эффекты на спектры. Тепловые колебания и рассеяние.

Тема 8. Моделирование и экспериментальные методы исследования

Численные методы (конечные разности, конечные элементы, вариационные методы). Скэннинг-зондовые микроскопии, фотолюминесцентная спектроскопия, туннельная микроскопия. Сравнение теоретических и экспериментальных данных.

2.3.3. Краткое содержание лабораторного практикума

№	Название лабораторной работы	Цель работы	Основные навыки
1	**Моделирование квантовой ямы**	Изучить энергетические уровни и волновые функции в потенциальной яме конечной глубины	Решение уравнения Шрёдингера, визуализация уровней
2	**Спектр энергии в квантовом проводе**	Рассчитать подзонную структуру для одномерной системы	Работа с квантовыми граничными условиями
3	**Квантовая точка как "искусственный атом"**	Смоделировать дискретные уровни в сферической квантовой точке	Моделирование нулевомерных объектов
4	**Влияние электрического поля (эффект Штарка)**	Исследовать сдвиг энергетических уровней под действием внешнего электрического поля	Расчёт Штарк-сдвига
5	**Моделирование туннелирования через барьер**	Оценить вероятность прохождения через потенциальный барьер	Численное решение уравнения Шрёдингера
6	**Оптические переходы в квантовых точках**	Рассчитать спектр поглощения и интенсивность переходов	Расчёт осцилляторных сил, работа с спектрами
7	**Влияние магнитного поля (эффект Зеемана)**	Анализ расщепления уровней в магнитном поле	Применение магнитного потенциала в уравнении
8	**Численное моделирование наноструктур с COMSOL/Matlab**	Применение пакетов моделирования для анализа структуры	Работа с современными симуляторами и визуализация

2.3.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Учебная аудитория для лекций.
- Учебная лаборатория для проведения лабораторных занятий

2.4. Модульная структура дисциплины с распределением весов по формам контролей

Формы контролей	**Вес формы (форм) текущего контроля в результирующей оценке текущего контроля (по модулям)**		**Вес формы промежуточного контроля в итоговой оценке промежуточного контроля**		**Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей**		**Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей (семестровой оценке)**	**Веса результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля**
Вид учебной работы/контроля	**М1**[1]	**М2**	**М1**	**М2**	**М1**	**М2**		
Контрольная работа *(при наличии)*			0.5	0.5				
Устный опрос *(при наличии)*								
Лабораторные работы *(при наличии)*	0.5	0.5						
Письменные домашние задания *(при наличии)*								
Решение задач	0.5	0.5						
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках промежуточных контролей					0.5	0.5		
Веса оценок промежуточных контролей в итоговых оценках промежуточных контролей								
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес итогового контроля (Экзамен/зачет) в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	∑ = 1	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**	**∑ = 1**

3. **Теоретический блок *(указываются материалы, необходимые для освоения учебной программы дисциплины)***

3.1. Материалы по теоретической части курса

3.1.1. Учебник(и);

[1] Учебный Модуль

1. Paul Harrison - **Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures,** 2016 (4th Edition).
2. Douglas Natelson - **Nanostructures and Nanotechnology,** 2015 (2nd Edition).
3. Yehuda B. Band - **Quantum Mechanics for Nanostructures**, 2013.

4. **Фонды оценочных средств** ***(указываются материалы, необходимые для проверки уровня знаний в соответствии с содержанием учебной программы дисциплины).***

4.1. Планы лабораторных работ и практикумов

№	Название лабораторной работы	Цель и содержание
1	**Решение одномерного уравнения Шрёдингера для квантовой ямы**	Изучение энергетических уровней и волновых функций в потенциальной яме конечной глубины.
2	**Моделирование квантового туннелирования через потенциальный барьер**	Численное исследование коэффициента прохождения частиц через барьер в зависимости от энергии и толщины.
3	**Квантовые точки: энергетический спектр и плотность состояний**	Моделирование двумерных и трехмерных квантовых точек, расчет дискретных уровней энергии.
4	**Экситоны в квантовых наноструктурах**	Численный расчет связывающей энергии экситона в квантовой яме/точке; изучение влияния размера.
5	**Симметрия и разделение уровней в квантовой проволоке**	Анализ уровней энергии и волновых функций в асимметричных потенциальных профилях.
6	**Моделирование эффекта Штарка в квантовой яме**	Изучение влияния внешнего электрического поля на энергетические уровни и оптические переходы.
7	**Квантовая транспортировка: модель туннельного тока через двойной барьер**	Расчет ток-напряжение характеристик с использованием модели резонансного туннелирования.
8	**Оптические свойства наноструктур: спектр поглощения и излучения**	Моделирование спектров для квантовых точек и ям; расчет вероятностей переходов.

4.2. Материалы по практической части курса

4.2.1. Задачники (практикумы);

1. Harrison, P. - *Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures.*
2. Davies, J.H. - *The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction.*

4.3. Вопросы и задания для самостоятельной работы студентов

1. Вычислите энергетические уровни электрона в квантовой яме шириной 5 нм, предполагая бесконечные стенки.
2. Постройте потенциальный профиль гетероструктуры GaAs/AlGaAs и рассчитайте первую энергетическую зону.
3. Проанализируйте зависимость экситонной энергии от размеров квантовой точки, используя вариационный подход.
4. Смоделируйте численно (например, в MATLAB или Python) волновые функции электрона и дырки в квантовой проволоке.
5. Исследуйте влияние электрического поля на спектр поглощения в квантовой яме (эффект Штарка).
6. Подготовьте реферат (5–7 страниц) на одну из тем: "Оптические свойства квантовых точек", "Методы синтеза наноструктур", "Квантовые точки в биомедицине".
7. Рассчитайте плотность состояний в 1D и 2D системах и сравните с объемной плотностью состояний.
8. Проанализируйте спектр фотолюминесценции квантовой точки при различных температурах (теоретически).
9. Изучите современные публикации (2–3 статьи) по теме применения квантовых точек в квантовых вычислениях и сделайте аннотацию.
10. Разработайте презентацию (10 слайдов) по теме "Методы экспериментального исследования квантовых наноструктур".

4.4. Образцы вариантов контрольных работ, тестов и/или других форм текущих и промежуточных контролей

Форма: тест, 1 час
Максимум баллов: 20

Часть 1. Выберите один правильный ответ (по 1 баллу)

1. Что происходит с энергетическими уровнями при уменьшении размеров квантовой ямы?
   A) Они сливаются в непрерывный спектр
   B) Энергия уровней уменьшается
   C) Уровни становятся более дискретными и увеличивается энергия
   D) Не изменяются
2. Основной причиной возникновения квантового ограничивания является:
   A) Высокая температура
   B) Малая масса электрона
   C) Малые геометрические размеры структуры
   D) Высокая концентрация примесей
3. Экситон — это:
   A) Свободный электрон
   B) Положительный ион

C) Связанная пара "электрон-донор"
D) Связанная пара электрон–дырка

4. Какой из нижеуказанных методов используется для получения квантовых точек?
   A) Механическая литография
   B) Молекулярно-лучевая эпитаксия
   C) Электролитическое осаждение
   D) Термическое испарение
5. При каком условии возникает туннелирование через потенциальный барьер?
   A) Энергия частицы выше барьера
   B) Энергия частицы меньше высоты барьера
   C) Частица имеет спин
   D) Только при высоких температурах

Часть 2. Несколько верных ответов (по 1 баллу, все ответы должны быть выбраны)

6. Какие характеристики квантовой точки зависят от её размера?
   A) Плотность состояний
   B) Энергия экситона
   C) Масса электрона
   D) Цвет фотолюминесценции
7. К оптическим методам исследования квантовых наноструктур относят:
   A) Фотолюминесценцию
   B) АФМ (атомно-силовую микроскопию)
   C) Рамановское рассеяние
   D) УФ-спектроскопию

Часть 3. Установите соответствие (по 1 баллу)

8. Установите соответствие между размерностью и типом наноструктуры:

Размерность	**Структура**
A) 0D	1. Квантовая точка
B) 1D	2. Квантовая яма
C) 2D	3. Квантовая проволока

Ответ: A - … ; B - … ; C - …

Часть 4. Краткие вычисления (по 2 балла)

9. Рассчитайте энергию основного состояния электрона в квантовой яме шириной 5 нм, считая потенциальные стенки бесконечными. Используйте формулу:

En=n2h28mL2E_n = \frac{n^2 h^2}{8 m L^2}En=8mL2n2h2

где:
h=6.626×10−34h = 6.626 \times 10^{-34}h=6.626×10−34 Дж·с,
m=9.11×10−31m = 9.11 \times 10^{-31}m=9.11×10−31 кг,

L=5×10−9L = 5 \times 10^{-9}L=5×10−9 м,
n=1n = 1n=1

10. В квантовой точке зафиксирован сдвиг фотолюминесцентного пика с 600 нм до 550 нм. Объясните причину данного сдвига с позиций квантового ограничивания.

Итоговая шкала оценки (примерная):

- 18–20 баллов — «Отлично»
- 15–17 баллов — «Хорошо»
- 12–14 баллов — «Удовлетворительно»
- < 12 баллов — «Неудовлетворительно»

Ключ ответы к тесту:

Часть 1. Один правильный ответ

1. ✅ C — Уровни становятся более дискретными и увеличивается энергия
2. ✅ C — Малые геометрические размеры структуры
3. ✅ D — Связанная пара электрон–дырка
4. ✅ B — Молекулярно-лучевая эпитаксия
5. ✅ B — Энергия частицы меньше высоты барьера

Часть 2. Несколько правильных ответов

6. ✅ A, B, D

- Плотность состояний
- Энергия экситона
- Цвет фотолюминесценции

7. ✅ A, C, D

- Фотолюминесценция
- Рамановское рассеяние
- УФ-спектроскопия

Часть 3. Соответствие

8.

- A) 0D — 1. Квантовая точка
- B) 1D — 3. Квантовая проволока
- C) 2D — 2. Квантовая яма

Ответ: A-1, B-3, C-2

Часть 4. Краткие вычисления и объяснения

9. **Решение:**

E=h28mL2=(6.626×10−34)28·9.11×10−31·(5×10−9)2≈6.02×10−20 ДжE = \frac{h^2}{8mL^2} = \frac{(6.626 \times 10^{-34})^2}{8 \cdot 9.11 \times 10^{-31} \cdot (5 \times 10^{-9})^2} \approx 6.02 \times 10^{-20} \, \text{Дж}E=8mL2h2=8·9.11×10−31·(5×10−9)2(6.626×10−34)2 ≈6.02×10−20Дж

Перевод в эВ:

E≈6.02×10−201.6×10−19≈0.38 эВE \approx \frac{6.02 \times 10^{-20}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 0.38 \, \text{эВ}E≈1.6×10−196.02×10−20≈0.38эВ

✅ Ответ: 0.38 эВ

10. **Объяснение:**
    Сдвиг пика фотолюминесценции в коротковолновую область (с 600 нм до 550 нм) вызван уменьшением размеров квантовой точки, что усиливает квантовое ограничение и увеличивает энергию перехода между уровнями. Это типичное проявление квантового эффекта — с уменьшением размера увеличивается энергия возбуждения.

✅ Ответ: из-за уменьшения размера увеличилась энергия перехода (квантовое ограничение) — синий сдвиг спектра.

4.5. Перечень экзаменационных вопросов

1. Понятие квантовой размерности. Различие между 0D, 1D и 2D наноструктурами.
2. Физические основы квантового ограничения. Энергетические уровни в квантовой яме.
3. Экситоны: типы, энергия связи и роль в оптических свойствах наноструктур.
4. Методы получения квантовых точек: коллоидный синтез, молекулярно-лучевая эпитаксия, Stranski–Krastanov.
5. Электронная структура квантовых проволок и квантовых ям.
6. Эффекты Штарка и Зеемана в квантовых наноструктурах.
7. Квантовое туннелирование в наносистемах и его применение.
8. Спектроскопические методы исследования наноструктур (ФЛ, Рамановское рассеяние и др.).
9. Оптические свойства квантовых точек и их зависимость от размеров.
10. Применение квантовых наноструктур в фотонике и оптоэлектронике.

11. Квантовые точки как искусственные атомы. Уровни и правила переходов.
12. Температурные эффекты в наноструктурах. Изменение ширины запрещённой зоны.
13. Квантовые структуры в гетероструктурах: зоны, изгибы зон, интерфейсы.
14. Роль поверхностных состояний и пассивации в квантовых точках.
15. Квантовые наноструктуры для биомедицинских и сенсорных применений.
16. Методы расчёта электронных состояний в наноструктурах (методы конечных разностей, вариационные методы).
17. Туннельные диоды, квантовые каскадные лазеры и другие устройства на основе наноструктур.
18. Количественные модели плотности состояний в 0D, 1D и 2D системах.
19. Интеграция квантовых точек в фотонные и квантовые схемы.
20. Перспективные направления в разработке квантовых наноструктур.

4.6. Образцы экзаменационных билетов

МОО ВО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ, ФИЗИКИ И ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра общей физики и квантовых наноструктур

Направление: Электроника и наноэлектроника
Дисциплина: Квантовые наноструктуры
(бакалавриат IV-ый курс, I-ый семестр)

Экзаменационный билет № **

1. Физические основы квантового ограничения. Энергетические уровни в квантовой яме.
2. Квантовые точки как искусственные атомы. Уровни и правила переходов.
3. Количественные модели плотности состояний в 0D, 1D и 2D системах.

Зав. кафедройОФКН _____Д.Б. Айрапетян
20__г.