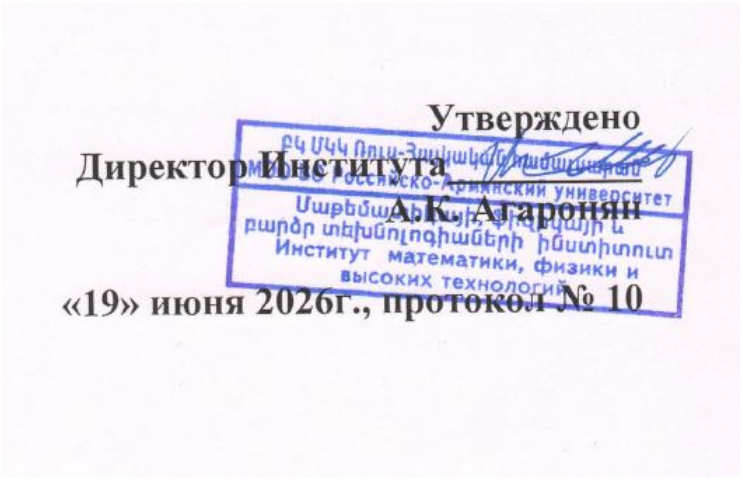
Межгосударственная образовательная организация высшего образования
«Российско-Армянский университет»



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

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины: Б1.В.06 «Полупроводниковая наноэлектроника»

Автор (ы) _ к.ф.-м.н. Харатян Гор Цолакович
Ф.И.О, ученое звание (при наличии), ученая степень (при наличии)

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Основная образовательная программа магистратуры: «Квантовая и оптическая электроника»

Согласовано:

Заведующий Кафедрой общей физики и квантовых наноструктур

Айрапетян Д.Б.



(подпись)

1. АННОТАЦИЯ

1.1. Краткое описание содержания данной дисциплины;

Дисциплина «Полупроводниковая наноэлектроника» охватывает физические основы и модели электронных процессов в низкоразмерных полупроводниковых структурах, таких как квантовые ямы, проволоки и точки. Рассматриваются явления размерного квантования, особенности плотности состояний в 0D–2D системах, влияние кулоновского взаимодействия, метод геометрической адиабатики, а также воздействие внешних полей. Особое внимание уделяется современным моделям, описывающим электронные и оптические свойства наноструктур, включая многозарядные системы и квантовые эффекты в кольцевых структурах.

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

4 академических кредита / 144 часа. Форма итогового контроля — экзамен.

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

Квантоворазмерные системы наноэлектроники, Физические основы молекулярной электроники.

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-1	Готов формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения	ПК-1.1 ПК-1.2	Знает принципы построения и фукнционирования изделий микро- и наноэлектроники Умеет рассчитывать предельно-допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и наноэлектроники

	сформулированных задач	ПК-1.3	Владеет навыками выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и наноэлектроники

2. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

2.1. Цели и задачи дисциплины

Цель: Целью изучения дисциплины является подготовка высококвалифицированных специалистов в новой и быстро развивающейся области твердотельной электроники - наноэлектронике, способных к активной творческой работе как в научно-исследовательских лабораториях, так и в условиях промышленного производства.

Задачи:

- Формирование у студентов фундаментального понимания квантовых эффектов в полупроводниковых структурах.
- Изучение моделей и методов расчета энергетических спектров и плотности состояний в низкоразмерных системах.
- Освоение методов расчета кулоновских эффектов и многочастичных состояний.
- Ознакомление с влиянием внешних полей и геометрии наноструктур на электронные и оптические свойства.
- Развитие навыков работы с расчетными моделями и анализом экспериментальных данных.
- Подготовка к исследовательской деятельности в области квантовых и наноразмерных полупроводниковых систем.

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.:	**144**	**144**
1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	**32**	**32**
1.1.1. Лекции	**16**	**16**
1.1.2. Практические занятия, в т. ч.	**16**	**16**
1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	**76**	**76**
Итоговый контроль (Экзамен, Зачет, диф. зачет - указать)	**Экзамен 36**	**Экзамен 36**

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)	Практ. Занятия (ак. часов)
1	2=3+4+5+6+7	3	4
Раздел 1. Размерное квантование	**4**	**2**	**2**
Тема 1.1 Эффективная длина волны электрона в полупроводнике.			
Тема 1.2 Тензор обратной эффективной массы.			
Тема 1.3 Формирование потенциала ограничения на границе перехода наноструктура-окружающая среда.			
Тема 1.4 Различные модели ограничивающих потенциалов			
Раздел 2. Классы квантовых наноструктур	**4**	**2**	**2**
Тема 2.1 Квантовые ямы (КЯ), квантовые проволоки (КП), квантовые точки (КТ)			
Тема 2.2 Атомоподобный спектр КТ			
Тема 2.3 Различные геометрии КТ			
Тема 2.4 Одночастичные состояния в КЯ, КП и КТ			
Раздел 3. Плотности энергетических состояний в КЯ, КП и КТ	**2**	**1**	**1**
Тема 3.1 Плотность состояний (ПС) в массивном образце			
Тема 3.2 Ступенчатый профиль функции плотности состояний в КЯ			
Тем 3.3 ПС в КП и КТ			
Раздел 4. Метод геометрической адиабатики	**4**	**2**	**2**
Тема 4.1 Адиабатическое приближение в случае стационарных полей			

Тема 4.2 Метод Канторовича			
Тем 4.3 Квантовая частица в сильно вытянутой двумерной эллипсоидальной яме			
Тема 4.4 Возникновение подзон в энергетическом спектре сильно вытянутой двумерной эллипсоидальной ямы			
Раздел 5. Кулоновские задачи в квантовых наноструктурах	**2**	**1**	**1**
Тема 5.1 Двумерная примесь в КЯ.			
Тема 5.2 Одномерная задача Кулона, падение на центр.			
Тем 5.3 Примесь в сферической КТ, определение энергии связи примеси в сферической КТ			
Раздел 6. Искусственный атом гелия	**4**	**2**	**2**
Тема 6.1 Двухэлектронные состояния в параболической КТ.			
Тема 6.2 Оценка энергии двухэлектронных состояний в параболической КТ на основе			
Тема 6.3 Управление временем обмена состояниями электронов в параболическом атоме гелия.			
Раздел 7. Влияние внешних полей на электронные состояния в КЯ и КТ	**4**	**2**	**2**
Тема 7.1 Одночастичный гамильтониан заряженной частицы во внешних электрическом и магнитном полях.			
Тема 7.2 КЯ в аксиальном магнитном поле, реализация атомоподобного спектра.			
Тема 7.3 Параболическая КТ в параллельных электрическом и магнитном полях.			
Тема 7.4 Реализация спектра Фока-Дарвина и квадратичного штарковского смещени			
Раздел 8. Оптические свойства КТ	**4**	**2**	**2**
Тема 8.1 Фундаментальное оптическое поглощение в сферических КТ, пороговые частоты поглощения, правила отбора.			
Тема 8.2 Влияние экситонных эффектов на характер фундаментального поглощения в сферических КТ.			
Тема 8.3 Учет дисперсии по размерам КТ в коэффициенте межзонного поглощения для ансамбля слабо взаимодействующих КТ			
Раздел 9. Слоистые и кольцеобразные КТ	**4**	**2**	**2**
Тема 9.1 Спектр электрона в сферической слоистой КТ и квантовом кольце.			

Тема 9.2 Влияние внутренней и внешней границ на энергетический спектр электрона в сферической слоистой КТ и квантовом кольце.			
Тема 9.3 Роль электромагнитных потенциалов в квантовой механике, эффект Аароновa-Бома в кольцеобразных структурах			
ИТОГО	**32**	**16**	**16**

2.3.2. Краткое содержание разделов дисциплины в виде тематического плана

Раздел 1. Размерное квантование:

Эффективная длина волны электрона в полупроводнике. Тензор обратной эффективной массы. Формирование потенциала ограничения на границе перехода наноструктура-окружающая среда. Различные модели ограничивающих потенциалов.

Раздел 2. Классы квантовых наноструктур:

Квантовые ямы (КЯ), квантовые проволоки (КП), квантовые точки (КТ). Атомоподобный спектр КТ. Различные геометрии КТ. Одночастичные состояния в КЯ, КП и КТ.

Раздел 3. Плотности энергетических состояний в КЯ, КП и КТ:

Плотность состояний (ПС) в массивном образце. Ступенчатый профиль функции плотности состояний в КЯ. ПС в КП и КТ

Раздел 4. Метод геометрической адиабатики:

Адиабатическое приближение в случае стационарных полей. Метод Канторовича. Квантовая частица в сильно вытянутой двумерной эллипсоидальной яме. Возникновение подзон в энергетическом спектре сильно вытянутой двумерной эллипсоидальной ямы.

Раздел 5. Кулоновские задачи в квантовых наноструктурах:

Двумерная примесь в КЯ. Одномерная задача Кулона, падение на центр. Примесь в сферической КТ, определение энергии связи примеси в сферической КТ.

Раздел 6. Искусственный атом гелия:

Двухэлектронные состояния в параболической КТ. Оценка энергии двухэлектронных состояний в параболической КТ на основе соотношения

неопределенностей Гейзенберга. Управление временем обмена состояниями электронов в параболическом атоме гелия.

Раздел 7. Влияние внешних полей на электронные состояния в КЯ и КТ:

Одночастичный гамильтониан заряженной частицы во внешних электрическом и магнитном полях. КЯ в аксиальном магнитном поле, реализация атомоподобного спектра. Параболическая КТ в параллельных электрическом и магнитном полях. Реализация спектра Фока-Дарвина и квадратичного штарковского смещения.

Раздел 8. Оптические свойства КТ:

Фундаментальное оптическое поглощение в сферических КТ, пороговые частоты поглощения, правила отбора. Влияние экситонных эффектов на характер фундаментального поглощения в сферических КТ. Учет дисперсии по размерам КТ в коэффициенте межзонного поглощения для ансамбля слабо взаимодействующих КТ.

Раздел 9. Слоистые и кольцеобразные КТ:

Спектр электрона в сферической слоистой КТ и квантовом кольце. Влияние внутренней и внешней границ на энергетический спектр электрона в сферической слоистой КТ и квантовом кольце. Роль электромагнитных потенциалов в квантовой механике, эффект Ааронова-Бома в кольцеобразных структурах.

2.3.3. Краткое содержание семинарских/практических занятий/лабораторного практикума

В рамках практических занятий студенты решают задачи, связанные с расчетом энергетических спектров и плотности состояний в квантовых ямах, проволоках и точках, моделируют поведение электронов в ограничивающих потенциалах, анализируют влияние внешних электрических и магнитных полей. Отдельное внимание уделяется расчетам кулоновского взаимодействия в наноструктурах, а также решению задач, иллюстрирующих квантово-механические эффекты в кольцевых структурах, включая эффект Ааронова-Бома.

2.3.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Мультимедийное оборудование для лекций.

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. Э.М. Казарян, С.Г. Петросян “Физические основы наноэлектроники”, 2005. Изд. РАУ (на армянском языке).
2. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин “Основы наноэлектроники”, 2004. Изд. НГТУ.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц “Квантовая механика”, 1989. Изд. Наука.
4. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган “Задачи по квантовой механике”, 1981. Изд. Наука.
5. E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan, "Layered nanostructures", Encyclopedia UNESCO Nanoscience and Nanotechnology, Ed. V.N. Kharkin (Russian Edition) pp. 120-133 (2011).

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

4.1. Планы практических занятий

№	Тема занятия	Краткое содержание
1	Эффективная масса и длина волны электрона в полупроводниках	Расчёт эффективной длины волны с учётом тензора обратной массы.
2	Квантование энергии в КЯ, КП, КТ	Решение уравнения Шрёдингера для модельных потенциалов: яма с бесконечными стенками, цилиндрические и сферические симметрии. Построение энергетического спектра.
3	Плотность состояний в 3D, 2D, 1D и 0D системах	Сравнение форм и характеристик плотности состояний в различных размерностях. Вывод ступенчатой формы ПС для КЯ.
4	Метод Канторовича и геометрическая адиабатика	Применение метода Канторовича для разделения переменных в вытянутых структурах. Рассмотрение подзонной структуры в эллипсоидальных ямах.
5	Кулоновская примесь в КЯ и КТ	Аналитические и численные оценки энергии связи электрона с донорной примесью. Особенности кулоновского потенциала в ограниченном объёме.
6	Искусственный атом гелия: двухэлектронные состояния	Расчёт энергии двухэлектронных состояний в параболической КТ с учётом кулоновского отталкивания. Интерпретация с помощью принципа неопределённости.
7	Электрон в КЯ во внешнем магнитном поле	Построение и анализ спектра Фока-Дарвина для плоской ямы. Влияние магнитного поля на вырождение уровней.
8	Эффекты в кольцевых наноструктурах	Рассмотрение Ааронова-Бома и квантовых фаз. Спектр и токи в кольцевых структурах. Сравнение с экспериментами.

4.2. Материалы по практической части курса

4.2.1. Задачники (практикумы);

1. Калашников С. Г., Парамонов В. П., *Задачи и упражнения по физике полупроводников и наноструктур*. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. — 272 с.
2. Ганелин Е. Р., Федоров П. П., *Физика полупроводников и наноструктур: задачи с решениями*. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 224 с.

4.3. Вопросы и задания для самостоятельной работы студентов

1. Объясните физическую природу размерного квантования и приведите примеры его проявлений.
2. Постройте и проанализируйте графики плотности состояний для КЯ, КП и КТ.
3. Выведите уровни энергии для электрона в сферической квантовой точке при бесконечном потенциальном барьере.
4. Опишите метод Канторовича и его применение для вытянутых наноструктур.
5. Рассчитайте энергию связи примеси в сферической квантовой точке.
6. Обоснуйте модель двухэлектронного параболического искусственного атома гелия.
7. Проанализируйте влияние магнитного поля на спектр электрона в квантовой яме.
8. Объясните физику эффекта Ааронова-Бома и его реализацию в квантовых кольцах.
9. Исследуйте влияние экситонных эффектов на межзонное поглощение в КТ.

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

Контрольная работа. Вариант 1.

1. Эффективная длина волны электрона в полупроводнике.
2. Плотность состояний в КЯ, КП и КТ.

4.5. Перечень экзаменационных вопросов

1. Эффективная длина волны электрона в полупроводнике.
2. Явление размерного квантования.
3. Ограничивающий потенциал. Модели ограничивающего потенциала.
4. Квантовая яма (КЯ). Одноэлектронные состояния в КЯ.

5. Квантовая проволока (КП). Одноэлектронные состояния в КП (прямоугольное сечение или круглое сечение).
6. Квантовая точка (КТ). Одноэлектронные состояния в КТ (сферическая КТ, квантовый куб).
7. Плотность состояний в КЯ, КП и КТ.
8. Адиабатическое приближение.
9. Электронные состояния в сильно сплюснутой элиптической яме.
10. Примесь в КЯ.
11. Примесь в КП. Явление падения на центр.
12. Примесь в КТ. Энергия связи примеси в КТ.
13. Оценка энергии двухэлектронных состояний в параболической КТ на основе соотношения неопределенностей Гейзенберга.
14. Искусственный атом гелия. Обменный интеграл, время обмена состояниями.
15. Одночастичный гамильтониан заряженной частицы во внешних электрическом и магнитном полях.
16. Атомоподобного спектр электрона в КЯ при наложении аксиального магнитного поля.
17. Параболическая КТ в параллельных электрическом и магнитном полях. Состояния Фока-Дарвина, квадратичный эффект Штарка.
18. Межзонное поглощение в сферической КТ. Правила отбора для режима сильного размерного квантования. Управление пороговыми частотами.
19. Влияние экситонных эффектов на характер фундаментального поглощения в сферических КТ. Учет дисперсии по размерам КТ в коэффициенте межзонного поглощения для ансамбля слабо взаимодействующих КТ.
20. Спектр электрона в сферической слоистой КТ и квантовом кольце.
21. Влияние внутренней и внешней границ на энергетический спектр электрона в сферической слоистой КТ и квантовом кольце. Модель плоского и сферического ротаторов.
22. Роль электромагнитных потенциалов в квантовой механике, эффект Ааронова-Бома в кольцеобразных структурах.

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: Полупроводниковая наноэлектроника
(магистратура I-ый курс, II-ой семестр)

Экзаменационный билет № **

1. Эффективная длина волны электрона в полупроводнике.
2. Искусственный атом гелия. Обменный интеграл, время обмена состояниями.

Зав. кафедрой ОФКН _____Д.Б. Айрапетян
20__г.