

**ГОУ ВПО Российско-Армянский (Славянский)
университет**



УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины: Б1.О.22 Физические основы наноэлектроники

Автор (ы) д.ф.-м.н., профессор Саркисян Айк Араевич
Ф.И.О, ученое звание (при наличии), ученая степень (при наличии)

**Направление подготовки: 11.03.03 Конструирование и технология
электронных средств**

Согласовано:

Заведующий Кафедрой общей физики и квантовых наноструктур

Айрапетян Д.Б.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

(подпись)

1. АННОТАЦИЯ

1.1. Краткое описание содержания данной дисциплины;

В курсе излагаются основы зонной теории твердых тел; на ее основе производится классификация твердых тел. Излагается статистика электронов и дырок в полупроводниках, рассматриваются особенности электронных свойств полупроводников, металлов и диэлектриков. Рассматривается уравнения непрерывности и на его основе диффузионно-дрейфовые явления в полупроводниках. Рассматривается генерационно-рекомбинационные явления в полупроводниках. В курсе изучаются также контактные явления в полупроводниках, контакт металл-полупроводник, электронно-дырочный переход.

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

3 академических кредита / 108 часов. Форма итогового контроля — зачет.

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

«Материалы и компоненты электронных средств», «Электротехника и электроника», «Полупроводниковые приборы», «Физические основы микроэлектроники».

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)
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1 ОПК-1.2	Знает фундаментальные законы природы и основные физические математические законы Умеет применять физические законы и математические методы для решения задач

		ОПК-1.3	теоретического и прикладного характера Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач
ОПК-3	Способен применять методы поиска, хранения, обработки, анализа и представления в требуемом формате информации из различных источников и баз данных, соблюдая при этом основные требования информационной безопасности	ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Знает современные принципы поиска, хранения, обработки, анализа и представления в требуемом формате информации Умеет решать задачи обработки данных с помощью современных средств автоматизации Владеет навыками обеспечения информационной безопасности

2. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

2.1. Цели и задачи дисциплины

Цель: Специальный курс «Физические основы нанoeлектроники» имеет целью дать студентам основные сведения о простейших физических процессах, происходящих в полупроводниковых наноструктурах.

Задачи: 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.

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.:	108	108
1.1.Аудиторные занятия, в т. ч.:	48	48
1.1.1.Лекции	32	32
1.1.2.Практические занятия, в т. ч.	16	16
1.1.3.Лабораторные работы		
1.2.Самостоятельная работа, в т. ч.:	60	60
1.3. Консультации		
Итоговый контроль (Экзамен, Зачет, диф. зачет - указать)	Зачет	Зачет

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)	Лекци и(ак. часов)	Практ. Занятия (ак. часов)
1	2=3+4	3	4
РАЗМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ			
Введение			
Раздел 1. Основные классы полупроводниковых наноструктур	10	6	4
<i>Тема 1.1. Пространственное ограничение носителей заряда в</i>	5	3	2
<i>Тема 1.2. Плотности состояний в низкоразмерных структурах</i>	5	3	2
Раздел 2. Одночастичный энергетический спектр в наноструктурах	11	9	4
<i>Тема 2.1. Электронные состояния в квантовых ямах</i>	3	2	1
<i>Тема 2.2. Электронные состояния в квантовых проволоках</i>	4	2	2
<i>Тема 2.3. Электронные состояния в квантовых точках</i>	4	3	1
НАНОСТРУКТУРЫ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ			
Раздел 3. Влияние электрического и магнитного полей на одноэлектронные	13	9	4

<i>Тема 3.1. Квантовая яма во внешних полях</i>	4	3	1
<i>Тема 3.2. Квантовая проволока в магнитном поле</i>	5	3	2
<i>Тема 3.3. Квантовая точка во внешних полях</i>	4	3	1
КУЛОНОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ			
Раздел 4. Примесные состояния в наноструктурах	10	7	3
<i>Тема 4.1. Двумерная кулоновская задача и примесь в квантовой яме</i>	5	2	1
<i>Тема 4.2. Одномерная кулоновская задача и примесь в квантовой проволоке</i>	5	2	1
<i>Тема 4.3. Примесные состояния в квантовой точке</i>	4	3	1
Раздел 5. Низкоразмерные экситоны	4	3	1
<i>Тема 5.1. Экситонные состояния в наноструктурах</i>	4	3	1
ИТОГО	48	32	16

2.3.2. Краткое содержание разделов дисциплины в виде тематического плана

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 полупроводниках

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 штарковского 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})

2.3.3. Краткое содержание практических занятий

Практические занятия проводятся в **формах:**

- Решение типовых **расчетных задач** по темам (с выводом формул, расчетом конкретных значений для наноструктур).
- Анализ **графиков, плотностей состояний, энергетических спектров** по моделям.
- Построение **схематических рисунков наноструктур и потенциальных профилей**.

- Работа с **симуляцией** квантовых состояний в низкоразмерных структурах с использованием MatLab/Python/QuantumATK (по наличию).
- Разбор **экспериментальных данных** (сравнение расчетных и экспериментальных параметров наноструктур).

2.3.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Мультимедийное оборудование для лекций и практических 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
	M1 ¹	M2	M1	M2	M1	M2		
Вид учебной работы/контроля								
Контрольная работа <i>(при наличии)</i>			0.5	0.5				
Устный опрос <i>(при наличии)</i>								
Лабораторные работы <i>(при наличии)</i>	0.5	0.5						
Письменные домашние задания <i>(при наличии)</i>								
<i>Решение задач</i>	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

¹ Учебный Модуль

Вес итогового контроля (Экзамен/зачет) в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

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

3.1. Материалы по теоретической части курса

3.1.1. Учебник(и);

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>

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

4.1. Планы практических занятий

Практическое занятие 1. Размерное квантование в полупроводниках

- **Цель:** изучить явление размерного квантования, расчет эффективной длины волны де Бройля.

- **Содержание:**

- Рассмотрение условий размерного квантования.
- Пример расчета длины волны де Бройля для электрона в полупроводнике.
- Построение потенциальных профилей квантовой ямы, проволоки, точки.

Практическое занятие 2. Плотности состояний в низкоразмерных структурах

- **Цель:** изучить особенности плотности состояний в 3D, 2D, 1D, 0D системах.

- **Содержание:**

- Вывод выражений для плотности состояний в объемном полупроводнике.
- Расчет и построение графиков плотности состояний для квантовых ям, проволок, точек.
- Анализ изменений плотности состояний при переходе к низкоразмерным системам.

Практическое занятие 3. Электронные состояния в квантовых ямах

- **Цель:** рассчитать энергетические уровни в квантовых ямах с различными потенциалами.

- **Содержание:**

- Решение уравнения Шредингера для ямы с бесконечно высокими стенками.
- Расчет энергетических уровней в яме с конечной высотой и с учетом скачка эффективной массы.
- Построение энергетических диаграмм.

Практическое занятие 4. Электронные состояния в квантовых проволоках и точках

- **Цель:** рассчитать энергетические уровни в одномерных и нульмерных наноструктурах.

- **Содержание:**

- Расчет уровней энергии в квантовой проволоке с прямоугольным и круговым сечением.
- Анализ электронных состояний в кубической и сферической квантовой точке.
- Рассмотрение влияния размеров наноструктуры на энергетический спектр.

Практическое занятие 5. Влияние внешних полей на наноструктуры

- **Цель:** изучить влияние электрических и магнитных полей на электронные состояния.

- **Содержание:**

- Рассмотрение штарковского расщепления в квантовой яме.

- Анализ изменения спектра при наложении магнитного поля в проволоке и точке.
- Решение типовых задач по расчету энергетических уровней с учетом внешних полей.

Практическое занятие 6. Кулоновские состояния и экситоны в наноструктурах

- **Цель:** изучить примесные состояния и экситоны в квантовых ямах, проволоках и точках.
- **Содержание:**
 - Решение двумерной кулоновской задачи для водородоподобной примеси в яме.
 - Рассмотрение модифицированного кулоновского потенциала для проволок.
 - Анализ экситонных состояний и расчет энергии связи экситона в наноразмерных системах.

Форма проведения:

- Решение расчетных и графических задач с подробным разбором.
- Использование математического моделирования (MatLab/Python) при наличии.
- Построение схематических энергетических диаграмм для лучшего усвоения материала.
- Обсуждение прикладных аспектов нанoeлектроники и связи с экспериментом.

4.2. Материалы по практической части курса

4.2.1. Задачники (практикумы);

1. Л.Е. Гусев, А.В. Чистяков, В.П. Калинушкин, «Задачи по физике полупроводников и наноструктур», МИФИ, 2013.

2. Ю.М. Кугель, Д.И. Кондратьев, «Сборник задач по физике твердого тела», Физматлит, 2007.

4.3. Вопросы и задания для самостоятельной работы студентов

Раздел 1. Размерное квантование в полупроводниках и плотность состояний

1. Объясните, в чем заключается явление размерного квантования в полупроводниках.
2. Выведите выражение для эффективной длины волны де Бройля электрона в полупроводнике.
3. Рассчитайте минимальную толщину квантовой ямы, при которой возникает квантование для электрона с заданной энергией.

4. Сравните плотность состояний в 3D, 2D, 1D, 0D системах и постройте качественные графики.
5. Опишите модели потенциальных ям в квантовых точках и проволоках.
6. Рассчитайте плотность состояний для квантовой ямы шириной 5 нм.

Раздел 2. Электронные состояния в наноструктурах

1. Решите задачу нахождения энергетических уровней в квантовой яме с бесконечно высокими стенками.
2. Рассчитайте уровни энергии электрона в сферической квантовой точке радиусом 10 нм.
3. Объясните, как учитывается скачок эффективной массы на границах наноструктуры.
4. Выведите условие квантования для электрона в квантовой проволоке с круговым сечением.

Раздел 3. Наноструктуры во внешних полях

1. Опишите влияние однородного электрического поля на спектр энергетических уровней в квантовой яме.
2. Выведите выражение для энергии электрона в квантовой проволоке при наложении магнитного поля вдоль оси.
3. Рассчитайте штарковское расщепление в квантовой яме с учетом внешнего электрического поля.
4. Объясните механизм формирования полностью дискретного спектра электрона в магнитном поле в наноструктуре.

Раздел 4. Кулоновские состояния в наноструктурах

1. Опишите особенности решения двумерной кулоновской задачи в квантовой яме.
2. Почему основное состояние одномерной водородоподобной системы неустойчиво?
3. Рассчитайте энергию связи примеси в сферической квантовой точке радиусом 8 нм.
4. Выведите выражение для модифицированного одномерного кулоновского потенциала в квантовой проволоке.

Раздел 5. Низкоразмерные экситоны

1. Дайте определение экситона и опишите его роль в нанoeлектронике.
2. Выведите выражение для приведенной эффективной массы экситона.
3. Рассчитайте энергию связи экситона в двумерной квантовой яме.

4. Объясните влияние размерных эффектов на экситонное поглощение в квантовой точке.

Практические задания для СРС:

1. Построить энергетические диаграммы квантовой ямы и проволоки с указанием уровней энергии для заданных размеров.
2. Решить задачу по расчету плотности состояний в одномерной системе.
3. Провести расчет энергии основного состояния экситона в квантовой яме с шириной 10 нм.
4. Рассчитать изменение уровня энергии электрона при наложении магнитного поля 1 Тл на квантовую проволоку диаметром 20 нм.
5. Подготовить краткое сообщение (5–7 минут) по примесным состояниям в наноструктурах и их применению в сенсорах.

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

Контрольная работа №1 (Текущий контроль)

Вариант 1

Выберите один правильный ответ:

1 Явление размерного квантования в полупроводниках возникает, когда:

- a) длина волны де Бройля носителей заряда сравнима с размерами системы ✓
- b) температура стремится к нулю
- c) отсутствует электрическое поле
- d) энергия теплового движения велика

2 Плотность состояний в 0D системе (квантовой точке):

- a) линейно зависит от энергии
- b) постоянна
- c) представляет собой набор δ -функций ✓
- d) равна нулю

3 В квантовой яме с бесконечно высокими стенками, энергетические уровни определяются:

- a) непрерывным спектром
- b) уравнением Шредингера с потенциалом Харти
- c) условием стоячих волн ✓
- d) значением химического потенциала

4 Квантовая проволока представляет собой систему:

- a) 0D
- b) 1D ✓
- c) 2D
- d) 3D

5 При наложении магнитного поля на квантовую проволоку:

- a) энергетические уровни не изменяются
- b) возникает штарковское расщепление
- c) происходит расщепление на уровни Ландау ✓
- d) увеличивается эффективная масса

Вариант 2

Выберите один правильный ответ:

1 Эффективная длина волны де Бройля определяется:

- a) массой и скоростью электрона ✓
- b) температурой
- c) плотностью носителей
- d) плотностью состояний

2 Плотность состояний в 2D системе:

- a) не зависит от энергии ✓
- b) линейно зависит от энергии
- c) квадратично зависит от энергии
- d) представляет собой δ -функцию

3 Для квантовой точки характерно:

- a) дискретный спектр уровней ✓
- b) плотность состояний как у объемного полупроводника
- c) непрерывный спектр
- d) отсутствие ограничивающих потенциалов

4 Влияние электрического поля на электронные состояния в квантовой яме приводит к:

- a) смещению уровней энергии ✓
- b) изменению массы электрона
- c) уменьшению энергии уровня
- d) увеличению плотности состояний

5 Примесные состояния в наноструктурах моделируются аналогами:

- a) задачи Ландау
- b) задачи Кеплера
- c) водородоподобной задачи ✓
- d) задачи Кроннига-Пенни

Контрольная работа №2 (Промежуточный контроль)

Вариант 1

Выберите один правильный ответ:

1 Размерное квантование в полупроводниках связано с:

- a) высоким уровнем легирования
- b) уменьшением размеров системы до нанометров ✓
- c) увеличением температуры
- d) усилением взаимодействия с фононами

2 Плотность состояний в объемном (3D) полупроводнике:

- a) не зависит от энергии
- b) линейно зависит от энергии
- c) пропорциональна $\sqrt{E}$ ✓
- d) имеет вид δ -функции

3 Влияние магнитного поля на электрон в квантовой яме приводит к:

- a) уменьшению плотности состояний
- b) образованию уровней Ландау ✓
- c) изменению эффективной массы
- d) исчезновению размерного квантования

4 Экситон в наноструктурах – это:

- a) дырка в зоне проводимости
- b) нейтральная частица с нулевой массой
- c) связанное состояние электрона и дырки ✓
- d) примесь в квантовой яме

5 Примесь в сферической квантовой точке:

- a) не влияет на энергетические уровни
- b) приводит к появлению новых дискретных уровней ✓
- c) изменяет габаритные размеры точки
- d) вызывает термическую ионизацию

Вариант 2

Выберите один правильный ответ:

1 Квантовая точка характеризуется:

- a) квантованием в одном направлении
- b) квантованием в двух направлениях
- c) квантованием во всех трех направлениях ✓
- d) отсутствием квантования

2 Для экситона в двумерной системе энергия связи:

- a) меньше, чем в объемной системе
- b) равна энергии теплового движения
- c) больше, чем в объемной системе ✓
- d) не определяется

3 Плотность состояний в одномерной системе:

- a) обратно пропорциональна $\sqrt{E}$ ✓
- b) линейно зависит от E
- c) не зависит от E
- d) равна нулю

4 Штарковское расщепление связано с:

- a) влиянием магнитного поля
- b) взаимодействием экситонов
- c) действием электрического поля ✓
- d) наличием примесей

5 При увеличении размеров квантовой ямы энергетический разрыв:

- a) увеличивается
- b) уменьшается ✓
- c) не изменяется
- d) исчезает

Ключи ответы:

Контрольная работа №1 (Текущий контроль)

Вариант 1

- 1 a ✓
- 2 c ✓
- 3 c ✓
- 4 b ✓
- 5 c ✓

Вариант 2

- 1 a ✓
- 2 a ✓
- 3 a ✓
- 4 a ✓
- 5 c ✓

Контрольная работа №2 (Промежуточный контроль)

Вариант 1

- 1 b ✓
- 2 c ✓
- 3 b ✓

4 с ✓

5 b ✓

Вариант 2

1 с ✓

2 с ✓

3 a ✓

4 с ✓

5 b ✓

4.5. Перечень вопросов для зачета

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.