

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
материаловедения и индустрии наносистем



В.М. Иевлев  
23.05.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**Б1.В.06 Квантование в низкоразмерных системах**

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

*04.04.02 – Химия, физика и механика материалов*

2. Профиль подготовки/специализация:

Программа «Химия, физика и механика новых функциональных материалов и наноматериалов»

3. Квалификация выпускника: *магистр*

4. Форма обучения: *очная*

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: *материаловедения и индустрии наносистем*

6. Составители программы: *Даринский Борис Михайлович, д.ф.-м.н., профессор*

7. **Рекомендована:** научно-методическим советом химического факультета, протокол №4 от 25.04.2023

8. Учебный год: 2024/2025

Семестр(ы): 3

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целью изучения дисциплины " Квантование в низкоразмерных системах" является освоение студентами основных понятий, специфики квантового движения электронов, ознакомление с достижениями и перспективами современной физики низкоразмерных электронных систем.

Основные задачи изучения дисциплины:

- формирование у студентов необходимых знаний понимания основных законов, определяющих физические свойства объектов нанометрового масштаба и структур с пониженной размерностью;
- ознакомление с основными достижениями и перспективами в области использования низкоразмерных систем.

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина входит в часть, формируемую участниками образовательных отношений (вариативная) блока Б1.

Требования к входным знаниям, умениям и навыкам: изучение данной дисциплины базируется на следующих курсах, изученных студентами ранее в бакалавриате: «Общая и неорганическая химия», «Структурная химия и кристаллохимия», «Материаловедение», «Физико-химия нанокластеров, наноструктур, наноматериалов», «Нанотехнологии», «Тонкие плёнки и гетероструктуры», «Микроскопические методы исследования структуры материалов», «Спектроскопические методы исследования материалов». В магистратуре в предыдущем семестре студенты познакомились с дисциплиной «Периодический закон и его роль в целенаправленном синтезе новых материалов», «Фундаментальные основы современного материаловедения»

## 11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ПК-3	Способен овладеть в профессиональной деятельности основными типовыми методами синтеза и анализа веществ, элементного и фазового состава, структуры и свойств материалов (включая наноматериалы)	ПК-3.1	Способен использовать знания о составе, структуре и свойствах материалов для решения задач материаловедения	знать: структурную и материаловедческую классификацию низкоразмерных систем, теоретические концепции, лежащие в основе понимания свойств и физических закономерностей, определяющих свойства и поведение низкоразмерных систем, квантовые модели эффектов в низкоразмерных системах. уметь: классифицировать конкретные низкоразмерные системы, предсказывать их свойства и интегральные устройства, в которых они могут быть использованы. Владеть: способностью проводить самостоятельные исследования имеющихся низкоразмерных систем, формулировать квантовые модели наблюдаемых эффектов, принимать решения о целесообразности разработки новых низкоразмерных устройств в технике
		ПК-3.2	Владеет основными методами синтеза и анализа вещества	знать: современные методы и технологические подходы к получению низкоразмерных систем, Уметь: выбирать способы и технологии получения современных материалов, биоматериалов и наноматериалов Владеть: Навыками разработки новых технологических подходов к созданию материалов и наноматериалов с заданными свойствами.

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 4/144.

Форма промежуточной аттестации – экзамен

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		2 семестр	3 семестр	...
Контактная работа	104		104	
в том числе:	лекции	38		38
	практические	38		38
	лабораторные	–		–
	курсовая работа	–		–
Самостоятельная работа	32		32	
Промежуточная аттестация (для экзамена)	36		36	
Итого:	144		144	

### 13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК *
<b>1. Лекции</b>			
1.1	Определение и классификация систем пониженной размерности	Двумерные квантовые системы, квантовые нити, квантовые точки, периодические структуры, сверхрешетки, тонкие пленки, МДП-структуры, гетероструктуры, дельталегированные-слои, поверхностные структуры	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11233">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11233</a>
1.2	Квантование в низкоразмерных системах	Двумерные квантовые системы, квантовые нити, квантовые точки, периодические структуры. Энергетический спектр, плотность состояний. Примесные состояния.	
1.3	Кинетика электронов в низкоразмерных системах	Время релаксации. Рассеяние электронов на примесных атомах и флуктуациях концентрации, фонах, границах неоднородностей. Баллистический транспорт. Туннелирование. Вольтамперная характеристика	
1.4	Динамика и кинетика электронов в стационарном электромагнитном поле.	Энергетический спектр, уровни Ландау, плотность состояний. Целочисленный и дробный эффект Холла.	
1.5	Электрические свойства квантовых нитей и точек.	Баллистическая проводимость квантовых нитей. Низкоразмерные системы с кулоновской блокадой. Применение низкоразмерных систем в технических устройствах.	
1.6	Сверхрешетки. Классификация сверхрешеток	Энергетический спектр сверхрешеток. Метод сильной связи. Энергетический спектр сверхрешеток. Модель Кронига-Пенни	
1.7	Квантовая яма на основе двойной гетероструктуры.	Размерное квантование электронов и дырок в модели Кейна.	
<b>2. Практические занятия</b>			
2.1	Определение и	Квантование в нульмерных системах	

	классификация систем пониженной размерности	Энергетический спектр	
2.2	Квантование в низкоразмерных системах	Квантование в одномерных системах Энергетический спектр. Энергетическая плотность. Квантование в двумерных системах Энергетический спектр. Энергетическая плотность	–
2.3	Сверхрешетки. Классификация сверхрешеток	Квантование в сверхрешетках Энергетический спектр. Энергетическая плотность	–
2.4	Электрические свойства квантовых нитей и точек.	Туннельный эффект	–
2.5	Кинетика электронов в низкоразмерных системах	Двумерные системы, одномерные системы.	–

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Определение и классификация систем пониженной размерности	5	5		5	15
2	Квантование в низкоразмерных системах	5	5		5	15
3	Кинетика электронов в низкоразмерных системах	5	5		5	15
4	Динамика и кинетика электронов в стационарном электромагнитном поле.	5	5		5	15
5	Электрические свойства квантовых нитей и точек.	6	6		4	16
6	Сверхрешетки. Классификация сверхрешеток	6	6		4	16
7	Квантовая яма на основе двойной гетероструктуры	6	6		4	16
	Итого:	38	38	–	32	144

### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Данный курс основан на сочетании лекционных и практических занятий. Достаточно большое внимание уделено самостоятельной работе студентов, в рамках которой необходимо уделять внимание более углубленному изучению отдельных разделов дисциплины, работе с литературными источниками, статьями в ведущих научных журналах и специализированных изданиях, поиску информации.

### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины (список литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ и используется общая сквозная нумерация для всех видов источников)

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Погосов В.В. Введение в физику зарядовых и размерных эффектов. Поверхность, кластеры, низкоразмерные системы / В.В. Погосов. – М. : Физматлит, 2006. – 328 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
2	Физика низкоразмерных систем : Учебное пособие для студ. вузов, обуч. по направлению "Техн. физика" / А. Я. Шик, Л. Г. Бакуев, С. Ф. Мусихин, С. А. Рыков; Под общ.ред. В.И.Ильина, А. Я. Шика. – СПб. : Наука, 2001. – 154 с.
3	Андо Т. Электронные свойства двумерных систем : Пер. с англ / Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн. – М. : Мир, 1985. – 415 с.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)\*:

№ п/п	Ресурс
1.	<a href="https://www.lib.vsu.ru/">https://www.lib.vsu.ru/</a> - сайт Зональной Научной Библиотеки Воронежского государственного университета
2.	<a href="http://www.nanometer.ru/">http://www.nanometer.ru/</a> - Нанотехнологическое сообщество «Нанометр»
3.	<a href="http://www.chem.msu.ru/rus/">http://www.chem.msu.ru/rus/</a> - Chemnet - официальное электронное издание Химического факультета МГУ в Internet,
4.	<a href="http://www.e-library.ru">www.e-library.ru</a> - информационный портал в области науки, технологии, медицины и образования, содержащий рефераты и полные тексты более 12 млн научных статей и публикаций.
5.	<a href="http://iric.imet-db.ru/">http://iric.imet-db.ru/</a> - База данных IRIC (Information Resources of Inorganic Chemistry) содержит краткую информацию об информационных системах в области неорганической химии и материаловедения.
6.	<a href="https://www.lib.vsu.ru/">https://www.lib.vsu.ru/</a> - сайт Зональной Научной Библиотеки Воронежского государственного университета

**16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы** (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных), курсовых работ и др.)

№ п/п	Источник
1.	

**17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):** При реализации дисциплины используются различные типы лекций – вводные лекции, информационные лекции с визуализацией (мультимедийные презентации), по отдельным темам – обзорные. На практических занятиях: выступление с рефератами, семинарские занятия. Текущая аттестация осуществляется в форме контрольных работ, промежуточная – по КИМ. Использование ЭУМК <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11233>

**18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Мультимедийный проектор BENQ, экран, ноутбук

**19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций**

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Определение и классификация систем пониженной размерности	ПК-3	ПК-3.1 ПК-3.2	Устный опрос
2.	Квантование в	ПК-3	ПК-3.1	Устный опрос

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
	низкоразмерных системах		ПК-3.2	
3.	Кинетика электронов в низкоразмерных системах	ПК-3	ПК-3.1 ПК-3.2	Устный опрос
4.	Динамика и кинетика электронов в стационарном электро-магнитном поле.	ПК-3	ПК-3.1 ПК-3.2	Устный опрос
5.	Электрические свойства квантовых нитей и точек.	ПК-3	ПК-3.1 ПК-3.2	Устный опрос
6.	Сверхрешетки. Классификация сверхрешеток	ПК-3	ПК-3.1 ПК-3.2	Устный опрос
7.	Квантовая яма на основе двойной гетероструктуры.	ПК-3	ПК-3.1 ПК-3.2	Устный опрос
Промежуточная аттестация форма контроля – экзамен				<i>Перечень вопросов</i>

## 20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

### 20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

- Перечень вопросов к экзамену и порядок формирования КИМ
1. Квантование на примере тонких пленок полупроводников и полуметаллов. Условия проявления размерного квантования
  2. Классификация и основные параметры гетеропереходов.
  3. Квантовая яма на основе двойной гетероструктуры. Описание электронных состояний методом огибающей Приближение эффективной массы
  4. Квантовая яма на основе двойной гетероструктуры. Размерное квантование дырок.
  5. Квантовая яма на основе двойной гетероструктуры. Размерное квантование электронов и дырок в модели Кейна.
  6. Размерное квантование в сверхрешетках .
  7. Размерное квантование в гетероструктурах типа GeSi
  8. Энергетический спектр плотности электронных состояний и статистика носителей заряда в квантовых ямах, проволоках и точках
  9. Экситоны и мелкие примесные состояния в размерно-квантованных гетероструктурах
  10. Модулированное легирование. Подавление примесного рассеяния за счет пространственно неоднородного легирования. Транзистор с высокой подвижностью электронов.
  11. Универсальные флуктуации кондактанса. Температурное и полевое тушение квантовой лестницы проводимости.
  12. Резонансное туннелирование. Резонансно-туннельный диод

13. Дельта-легированный слой.
14. Структуры со сдвоенной потенциальной ямой
15. Сверхрешетки. Классификация сверхрешеток
16. Энергетический спектр сверхрешеток. Метод сильной связи
17. Эффект магнитосопротивления в системе квантовых точек.
18. Поляроны в низкоразмерных системах
19. Специфика фазовых переходов в низкоразмерных системах
20. Кондактанс баллистического проводника. Формула Ландауэра
21. Одноэлектронная проводимость в системе квантовых точек

Каждый КИМ содержит 2 вопроса из разных разделов программы.

Описание технологии проведения

На подготовку письменного ответа на вопросы КИМ (на листах ответов) даётся 60 минут, после этого проводится устная беседа.

Для оценивания результатов обучения на экзамене/зачете используются следующие показатели (ЗУНЫ из 19.1):

- 1) знание учебного материала и владение понятийным аппаратом современной теории квантовых низкоразмерных систем;
- 2) знание современных представлений о квантовых моделях явлений в низкоразмерных системах;
- 3) умение иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований;
- 4) умение использовать полученные знания для прогнозирования свойств низкоразмерных систем;
- 5) владение навыками научно обоснованного теоретического исследования с целью интерпретации и предсказания свойств синтезируемых низкоразмерных материалов.

Для оценивания результатов обучения на экзамене используется 4-балльная шкала: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Соотношение показателей, критериев и шкалы оценивания результатов обучения.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
<i>Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для решения практических задач в области современной науки о низкоразмерных системах</i>	<i>Повышенный уровень</i>	<i>Отлично</i>
<i>Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен знания для решения практических задач в области квантовой теории низкоразмерных систем, допускает отдельные ошибки при рассмотрении отдельных при описании современных представлений о специфике низкоразмерных систем.</i>	<i>Базовый уровень</i>	<i>Хорошо</i>
<i>Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен описать основные теории и современные представления о низкоразмерных системах, допускает грубые ошибки при ответе.</i>	<i>Пороговый уровень</i>	<i>Удовлетворительно</i>
<i>Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки</i>	<i>–</i>	<i>Неудовлетворительно</i>

### **20.3 Фонд оценочных средств сформированности компетенций студентов, рекомендуемый для проведения диагностических работ**

ОПК-3\_Способен использовать в профессиональной деятельности базовые знания в области математических и смежных естественных наук

### Перечень заданий для оценки сформированности компетенции:

#### 1) открытые задания (средний уровень сложности):

1. Дан оператор  $\hat{A} = \frac{d}{dx}$ . Найдите  $\varphi(x) = \hat{A}^2 \sin x$ . (Ответ:  $\varphi(x) = -\sin x$ .)

2. Найдите  $\hat{A}^2 f(x)$ , если  $\hat{A} = x \frac{d}{dx}$ , а  $f(x) = \cos x$ . (Ответ:  $\hat{A}^2 f(x) = -(x \cos x + \sin x)$ .)

3. Какие из приведённых пар операторов коммутируют:

а)  $x$  и  $y$ ; б)  $\partial/\partial x$  и  $\partial/\partial y$ ; в)  $x$  и  $\partial/\partial y$ ;

г)  $x$  и  $\partial/\partial x$ ; д)  $x$  и  $\partial^2/\partial x^2$ ? (Ответ: а) да; б) да; в) да; г) нет; д) нет.)

4. Линейны ли операторы: а) извлечения корня б) возведения в квадрат в) дифференцирования г) двукратного дифференцирования д) интегрирования (Ответ: а) нет; б) нет; в) да; г) да; д) да)

5. Операторы  $\hat{A}$  и  $\hat{B}$  — самосопряжённые. Будет ли оператор  $\hat{A}\hat{B}$  самосопряжённым? (Ответ: да)

6. Найдите собственное значение оператора  $\hat{A} = -\frac{d^2}{dx^2}$ , принадлежащее собственной функции  $f(x) = \sin(2x)$ .

(Ответ:  $A = 4$ )

7. Найдите собственное значение оператора  $\hat{A} = -\frac{d^2}{dx^2} + x^2$ , принадлежащее собственной функции  $f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}$ .

(Ответ:  $A = 1$ )

8. Найдите коммутаторы операторов:

а)  $[\hat{x}, \hat{p}_y]$ ; б)  $[\hat{x}, \hat{p}_x]$ ; в)  $[\hat{p}_x, \hat{p}_y]$ .

Ответ: а)  $[\hat{x}, \hat{p}_y] = 0$ ; б)  $[\hat{x}, \hat{p}_x] = i\hbar$ ; в)  $[\hat{p}_x, \hat{p}_y] = 0$ .

9. Найдите коммутаторы операторов:

а)  $[\hat{x}, \hat{L}_x]$ ; б)  $[\hat{y}, \hat{L}_x]$ .

Ответ: а)  $[\hat{x}, \hat{L}_x] = 0$ ; б)  $[\hat{y}, \hat{L}_x] = -i\hbar z$ .

10. На основе выражения  $\hat{L}_x = y\hat{p}_z - z\hat{p}_y$  найдите коммутаторы операторов:

а)  $[\hat{p}_x, \hat{L}_x]$ ; б)  $[\hat{p}_y, \hat{L}_x]$ .

Ответ: а)  $[\hat{p}_x, \hat{L}_x] = 0$ ; б)  $[\hat{p}_y, \hat{L}_x] = -i\hbar \hat{p}_z$ .

11. Найдите собственные функции и собственные значения  $T_x$  оператора  $T_x = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + Ax$ . Указание. Введите обозначение  $\psi$  и учтите, что дифференциальное уравнение вида  $\psi'' + k^2 \psi = 0$  имеет общее решение  $\psi = C_1 \cos kx + C_2 \sin kx$  где  $A$  и  $B$  — произвольные постоянные. Ответ:

$f_{T_x}(x) = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx}$ , где  $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ ,  $E$  — любое положительное число

12. Стационарное состояние частицы описывается волновой функцией вида  $\Psi(x) = Ce^{-\alpha x}$ , где  $C$  — некоторая постоянная, а  $0 \leq x \leq \infty$ . Какому условию должен удовлетворять вещественный параметр  $\alpha$ , чтобы  $\Psi(x)$  удовлетворяла стандартным условиям? Изменится ли ответ, если движение частицы будет происходить на отрицательной полуоси  $x$ ? Ответ:  $\alpha > 0$ . Во втором случае  $\alpha < 0$

13. Волновая функция  $\Psi$ , описывающая состояние микросистемы, может быть разложена по собственным функциям

$$\Psi = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2 + \frac{1}{2} f_5 + \frac{\sqrt{2}}{2} f_6.$$

оператора следующим образом:



Какие значения соответствующей динамической переменной  $A$  могут появиться при её измерении и с какими

вероятностями? Ответ:  $P(A = A_2) = \frac{1}{2}$ ;  $P(A = A_3) = \frac{1}{6}$ ;  $P(A = A_6) = \frac{1}{3}$ . Остальные  $P$  равны нулю.

14. Волновые функции  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  являются решениями стационарного уравнения Шрёдингера  $\hat{H}\Psi = E\Psi$  для собственных значений  $E_1$  и  $E_2$ . Будет ли суперпозиция  $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$  решением этого уравнения? Ответ: нет

### Критерии и шкалы оценивания заданий ФОС:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный).

2) открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности):

- 2 балла – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный).

3) открытые задания (мини-кейсы, средний уровень сложности):

- 5 баллов – задание выполнено верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход выполнения (при необходимости));
- 2 балла – выполнение задания содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода его выполнения (если оно было необходимым), или задание выполнено не полностью, но получены промежуточные (частичные) результаты, отражающие правильность хода выполнения задания, или, в случае если задание состоит из нескольких подзаданий, верно выполнено 50% таких подзаданий;
- 0 баллов – задание не выполнено или выполнено неверно (получен неправильный ответ, ход выполнения ошибочен или содержит грубые ошибки).

**Задания раздела 20.3 рекомендуются к использованию при проведении диагностических работ с целью оценки остаточных результатов освоения данной дисциплины (знаний, умений, навыков).**