|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ | | | | | |
| Федеральное государственное автономное образовательное учреждение | | | | | |
| высшего профессионального образования | | | | | |
| «Московский физико-технический институт (государственный университет)» | | | | | |
| МФТИ | | | | | |
| «УТВЕРЖДАЮ»  Проректор по учебной и методической работе  Зубцов Д.А.  « »\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20 г. | | | | | |
| Рабочая программа дисциплины (модуля) | | | | | |
| по дисциплине: | | **Физика наноструктур** | |  |  |
| по направлению: | | 010900 Прикладные математика и физика бакалавриат) | |  |  |
| профиль подготовки/ магистерская программа: | | 010970 Квантовая оптика и лазерная физика | | | |
| профиль подготовки/ магистерская программа: | |  | | | |
| факультет: | | проблем физики и энергетики | |  |  |
| кафедра: | | Лазерные системы и структурированные материалы | | |  |
| курс: | | 1 | |  |  |
| квалификация: | | магистр | |  |  |
|  | | | | | |
| ~~Семестр, формы промежуточной аттестации:~~ | | | | | |
|  | | | | | |
| ~~Аудиторных часов: всего, в том числе:~~ | | | |  |  |
|  | ~~лекции: 34 час.~~ | | |  |  |
|  | ~~практические (семинарские) занятия: 34 час.~~ | | |  |  |
|  | ~~лабораторные занятия: 0 час.~~ | | |  |  |
| ~~Самостоятельная работа: 25 час., в том числе:~~ | | | |  |  |
|  | ~~задания, курсовые работы: 21 час.~~ | | |  |  |
| ~~Подготовка к экзамену: 30 час.~~ | | | |  |  |
| ~~Всего часов: 114, всего зач. ед.: 4~~ | | | |  |  |
|  | | | | | |
| Программу составил: | | Тиходеев Сергей Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор | |  |  |
|  | | | | | |
| Программа обсуждена на заседании кафедры | | | |  |  |
|  | | | | | |
| 9 октября 2014 г. | | | |  |  |
|  | | | | | |
| СОГЛАСОВАНО: | | | |  |  |
|  | | | | | |
| Заведующий кафедрой | | | Щербаков И.А. | | |
|  | | | | | |
| Декан факультета проблем физики и энергетики  факультета радиотехники и кибернетики | | | | Леонов А.Г. | |
|  | | | | | |
| Начальник учебного управления | | | | Гарайшина И.Р. | |

**1. Цели и задачи**

Цель дисциплины

Целью дисциплины «Физика наноструктур» является формирование базовых знаний по геометрии для дальнейшего использования в других областях математического знания и дисциплинах естественнонаучного содержания; формирование математической культуры, исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

Задачи дисциплины

• формирование базовых знаний в области физики наноструктур как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;

• обучение студентов основным принципам и подходам области физики наноструктур и освоение основных теоретических методов, применимых в этой области физики;

• формирование правильных теоретических подходов к выполнению исследований сту-дентами в области физики наноструктур в рамках выпускных работ на степень магистра

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы магистратуры

Курс **«Физика наноструктур»** является введением в одно из самых интересных и приоритетных направлений развития современной физики. Это объясняется не только фундаментальностью их физических свойств, но и практической важностью этих свойств для электроники будущего. В структуре образовательной программы магистратуры он тесно связан с такими курсами как «Кинетические явления в неупорядоченных средах и наноматериалах», «Лазерная спектроскопия», «Введение в физику поверхности»,

Дисциплина **«Физика наноструктур»**базируется на материалах курсов бакалавриата: базовая и вариативная часть кода УЦ ООП Б.2**(**математическийестественнонаучный блок) по дисциплинам«Высшая математика» (математический анализ, высшая алгебра, дифференциальные уравнения и методы математической физики), блока «Общая физика» и региональной составляющей этого блока и относится к профессиональному циклу.

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций бакалавра/магистра:

способностью решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности (ОПК-1);

способностью применять теорию и методы математики для построения качественных и количественных моделей объектов и процессов в естественнонаучной сфере деятельности (ОПК-2);

способностью понимать ключевые аспекты и концепции в области их специализации (ОПК-3);

способностью применять полученные знания для анализа систем, процессов и методов (ОПК-4);

способностью логически точно, аргументированно и ясно строить устную и письменную речь, формулировать свою точку зрения, владением навыками ведения научной и общекультурной дискуссий (ОПК-5);

способностью представлять результаты собственной деятельности с использованием современных средств, ориентируясь на потребности аудитории, в том числе в форме отчетов, презентаций, докладов (ОПК-6).

способностью планировать и проводить теоретические (аналитические и имитационные) исследования (ПК-1);

способностью анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения) (ПК-2);

способностью выбирать и применять подходящие методы исследований для решения задач в избранной предметной области (ПК-3);

способностью критически оценивать применимость применяемых методик и методов (ПК-4);

способностью понимать принципы составления проектов работ в избранной области и экономические аспекты проектной деятельности (ПК-5)

(Примечание деканата: Компетенции преподаватель выбирает из списка в файле V\_компетенции.doc)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

* – место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
* современные проблемы физики и математики;
* теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
* принципы симметрии и законы сохранения;
* новейшие открытия естествознания;
* постановку проблем моделирования физических процессов, протекающих в твердых телах;
* о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

* эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
* представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
* работать на современном экспериментальном оборудовании;
* абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
* планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

* планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
* научной картиной мира;
* навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;
* математическим моделированием физических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Тема (раздел) дисциплины | Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу | | | | |
| № | Тема (раздел) дисциплины | Лекции | Практич. (семинар.) задания | Лаборат. работы | Задания, курсовые работы, шт.  (не более 2-х) | Самост. работа |
| № | Тема (раздел) дисциплины | Лекции | Практич. (семинар.) задания | Лаборат. работы | Задания, курсовые работы | Самост. работа |
| 1 | Основные понятия о наноструктурах и способах их изготовления. | 8 |  |  |  | 2 |
| 2 | Экспериментальные и теоретические подходы к исследованию наноструктур | 8 |  |  |  | 2 |
| 3 | Оптические свойства наноструктур | 8 |  |  |  | 3 |
| 4 | Оптические свойства фотонных кристаллов и метаматериалов | 6 |  |  |  | 3 |
| 5 | Неупругая туннельная спектроскопия в СТМ | 4 |  |  |  | 2 |
| Итого часов | | 34 |  |  |  | 12 |
| Общая трудоёмкость | | 46 час., 1 зач.ед. | | | | |

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

**1. Основные понятия о наноструктурах и способах их изготовления**

Общие понятия: что такое наноструктуры, их классификация, самые общие свойства, способы изготовления.

Полупроводниковые сверхрешетки. Блоховские осцилляции в сверхрешетках. Полупроводниковые квантовые ямы. Полупроводниковые квантовые нити и точки.

**2. Экспериментальные подходы по исследованию наноструктур**

Электронные возбуждения в полупроводниковых наноструктурах. Наноструктуры на основе углерода (фуллерены, нанотрубки).

**3. Оптические свойства наноструктур**

Оптические свойства полупроводниковых наноструктур. Экситоны в наноструктурах**.** Локализационное и диэлектрическое усиление экситонов в наноструктурах. Долгоживущие непрямые экситоны в двойных квантовых ямах и поиски их Бозе-конденсации.

**4. Оптические свойства фотонных структур и метаматериалов**

Полупроводниковые микрорезонаторы с активными квантовыми ямами, поляритонные эффекты. Поляритонный лазер. Фотонные кристаллы, в том числе с оптически активными наноструктурами (полупроводниковыми и металлическими). Фотонные структуры. Киральные фотонные структуры.

**5. Неупругая туннельная спектроскопия в СТМ**

Методы экспериментального исследования единичных адсорбированных молекул на поверхности твердого тела с использованием сканирующего туннельного микроскопа.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

**Основная литература**

Грундман М. «Основы физики полупроводников. Нанофизика и технические приложения». Москва, Физматлит, 2012 (пер. с английского). 771 с.

**Дополнительная литература**

Питер Ю., Мануэль Кардона «Основы физики полупроводников», Москва, Физматлит, 2002 (пер. с английского).

Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Москва “Мир”, 1979, 2т., 400+422 стр.

7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Edward L. Wolf, Nanophysics and Nanotechnology: An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience. 2nd Edition. Wiley, 2006. ISBN: 978-3-527-40651-7

<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3527406514.html>

8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. http://lib.mipt.ru/catalogue/1604/?t=492 – электронная библиотека Физтеха, раздел «Аналитическая геометрия».

2. http://www.exponenta.ru – образовательный математический сайт.

3. http://mathnet.ru – общероссийский математический портал. 4

. http://www.edu.ru – федеральный портал «Российское образование».

5. http://benran.ru –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

6. http://www.i-exam.ru – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.

9. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. Для контроля и коррекции знаний обучающиеся могут использовать компьютерное тестирование, в том числе на портале [www.i-exam.ru](http://www.i-exam.ru). В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Matlab и др.

10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Студент, изучающий курс **«Физика наноструктур»**, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать

При подготовке к практическим занятиям необходимо повторять ранее изученные основные определения, формулировки теорем. В начале занятия, как правило, проводится короткий (10-15 минут) опрос по материалу прошедших занятий в устной или письменной форме. Обычно придерживаются следующей схемы: изучение материала лекции по конспекту в тот же день, когда была прослушана лекция (10-15 минут); повторение материала накануне следующей лекции (10-15 минут), проработка учебного материала по конспектам лекций, учебной и научной литературе, подготовка ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения (1 час неделю), подготовка к практическому занятию, решение задач (1 час). Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Обязательным требованием является выполнение домашних работ, которые оформляются в специально отведённой для этого тетради и систематически сдаются на проверку.

Промежуточный контроль знаний проводится в виде коллоквиумов, на которых студенту предлагается письменно ответить на теоретический вопрос и решить две задачи по теме коллоквиума, а также студенту в ходе освоения курса необходимо выполнить две домашних индивидуальных работы с их последующей защитой:

1) «Линии первого и второго порядка на плоскости» (см. п. 7, [4, с. 24-26], [5, с. 39-42]).

2) «Плоскость и прямая и в пространстве. Поверхности второго порядка» (см. п. 7, [3, с. 27].

Для подготовки к коллоквиумам рекомендуется опираться на следующие вопросы:

Перечень вопросов по теме «Основные понятия о наноструктурах и способах их изготовления»

1. Полупроводниковые гетеропереходы. Квазиэлектрическое поле.
2. Типы гетеропереходов и наноструктур.
3. Гетеропереходы I и II рода
4. Согласованные и напряженные наноструктуры
5. Методы изготовления слоистых гетеростру: молекулярно-лучевая эпитаксия
6. Методы выращивания наноструктур: газофазная и жидкостная эпитаксия
7. Методы наноструктуризации слоистых гетероструктур
8. Методы самоорганизации для изготовления массивов квантовых точек

Перечень вопросов по теме «Экспериментальные и теоретические подходы к исследованию наноструктур»

1. Основные экспериментальные методы исследования наноструктур.
2. Квантовая механика локализации электронов и дырок в наноструктурах с гетеропереходами I рода.
3. Квантовая механика локализации электронов и дырок в наноструктурах с гетеропереходами II рода.
4. Метод огибающих для описания электронных свойств полупроводниковых наноструктур.
5. Туннелирование электронов и дырок в наноструктурах и резонансные состояния.
6. Метод матриц переноса и рассеяния для решения уравнения Шредингера

Перечень вопросов по теме «Оптические свойства наноструктур»

1. Взаимодействие электронов и дырок в наноструктурах со светом: Гамильтониан взаимодействия и правила отбора.
2. Плотность электронных состояний в наноструктурах различной пространственной размерности
3. Экситоны в объемном полупроводнике и наноструктурах пониженной размерности
4. Эффект диэлектрического усиления экситонов в наноструктурах с различной диэлектрической проницаемостью слоев
5. Светодиоды и лазеры на квантовых наноструктурах (КЯ, КН, КТ); системы с горизонтальным и вертикальным резонатором

Перечень вопросов по теме «Оптические свойства фотонных кристаллов и метаматериалов»

1. Полупроводниковый микрорезонатор: резонаторная мода
2. Полупроводниковый микрорезонатор с квантовой ямой: экситонные поляритоны
3. Квантовый каскадный лазер
4. Фотонные кристаллы и поляритонные кристаллы
5. Понятие о метаматериалах

Перечень вопросов по теме «Неупругая туннельная спектроскопия в СТМ»

1. Сканирующая туннельная спектроскопия
2. Манипулирование одиночными молекулами и атомами

11. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации по итогам обучения

**П1. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Промежуточная аттестация по дисциплине **«Физика наноструктур»**осуществляется в форме экзамена (зачета). Экзамен (зачет) проводится в письменной (устной) форме.

Перечень контрольных вопросов:

1. Что такое полупроводниковые гетеропереходы и квазиэлектрическое поле.
2. Перечислить основные типы гетеропереходов и наноструктур.
3. В чем основное отличие гетеропереходы I и II рода
4. Чем отличаются согласованные и напряженные наноструктуры
5. В чем состоит метод молекулярно-лучевой эпитаксии
6. В чем состоит метод газофазной и жидкостной эпитаксии
7. Описать основные методы наноструктуризации слоистых гетероструктур
8. Что такое самоорганизующиеся квантовые точки
9. Описать основные экспериментальные методы исследования наноструктур.
10. В чем состоят основные закономерности квантовой механики локализации электронов и дырок в наноструктурах с гетеропереходами I рода.
11. Особенности локализации электронов и дырок в наноструктурах с гетеропереходами II рода.
12. В чем состоит метод огибающих для описания электронных свойств полупроводниковых наноструктур.
13. Основные особенности туннелирования электронов и дырок в наноструктурах и резонансные состояния.
14. Рассказать о методах матриц переноса и рассеяния для решения уравнения Шредингера
15. Взаимодействие электронов и дырок в наноструктурах со светом: Гамильтониан взаимодействия и правила отбора.
16. Плотность электронных состояний в наноструктурах различной пространственной размерности
17. Экситоны в объемном полупроводнике и наноструктурах пониженной размерности
18. Эффект диэлектрического усиления экситонов в наноструктурах с различной диэлектрической проницаемостью слоев
19. Светодиоды и лазеры на квантовых наноструктурах (КЯ, КН, КТ); системы с горизонтальным и вертикальным резонатором
20. Полупроводниковый микрорезонатор: резонаторная мода
21. Полупроводниковый микрорезонатор с квантовой ямой: экситонные поляритоны
22. Принцип работы квантового каскадного лазера
23. Что такое фотонные кристаллы и поляритонные кристаллы
24. Что такое метаматериалы.
25. В чем состоит и для чего используется метод сканирующей туннельной спектроскопии
26. Манипулирование одиночными молекулами и атомами

Примеры экзаменационных билетов (заданий, тестов и др. материалов, используемых для проведения зачета, экзамена):

Экзаменационные билеты будут состоять из двух контрольных вопросов из приведенного выше списка, а также одна задача типа приведенных ниже.

1. Квантовая яма, нить и точка с бесконечными барьерами. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри квантовой ямы с бесконечно высокими стенками. Рассмотреть все геометрии: локализацию в 1-, 2- и 3-мерной яме с размерами Lx; Lx;Ly; Lx;Ly;Lz, а также цилиндрически и сферически симметричные ямы

2. Симметричная прямоугольная квантовая яма. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри одномерной симметричной потенциальной ямы глубины V и ширины L. Найти условия, при которых число связанных уровней внутри ямы минимально, и определить это минимальное число уровней.

3. Квантовая нить. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри двумерной цилиндрически-симметричной потенциальной ямы глубины V и размера (диаметра) L.

4. Квантовая точка. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри сферически симметричной трехмерной потенциальной ямы глубины V и размера (диаметра) L.

5. Несимметричная квантовая яма. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри одномерной несимметричной потенциальной ямы ширины L. Считать, что потенциальная энергия слева от ямы равна E1, а справа E2. Найти условия, при которых число связанных уровней внутри ямы минимально, и определить это минимальное число связанных уровней/

6. Двойная квантовая яма. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри одномерной двойной симметричной потенциальной ямы. Глубина и ширина каждой ямы V и L, соответственно, и ширина барьера между ямами l. Потенциальные энергии слева, справа и между ямами считать равными 0.

7. Подбарьерное туннелирование. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от одномерного барьера высоты U и толщины l. Считать, что потенциалы свободного пространства справа и слева от барьера совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E < U (туннелирование сквозь барьер). (Метод матриц переноса)

8. Надбарьерное отражение. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от одномерного барьера высоты U и толщины l. Считать, что потенциалы свободного пространства справа и слева от барьера совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E > U (Надбарьерное отражение). (Метод матриц переноса)

9. Резонансное туннелирование. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от двух последовательных одномерных барьеров высоты U и толщины l, разнесенных в пространстве на расстояние L. Считать, что потенциалы свободного пространства справа, слева и между барьерами совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E < U (туннелирование сквозь барьер). (Метод матриц переноса).

10.  Надъямное отражение. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от двух последовательных одномерных барьеров высоты U и толщины l, разнесенных в пространстве на расстояние L. Считать, что потенциалы свободного пространства справа, слева и между барьерами совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E > U (Надъямное отражение). (Метод матриц переноса).

11.  Сверхрешетка. Найти решение для спектра и волновых функций электрона в одномерной сверхрешетке, состоящей из бесконечной последовательности квантовых ям глубины V, ширины L и расстоянием между ямами l (период сверхрешетки L+l)

12.  Эффективная масса в двухзоном приближении. Вычислить эффективную массу электрона и дырки в двухзонном kp-приближении.

13. Двумерный экситон. Найти собственные энергии и собственные функции двумерного экситона, то есть связанного состояния положительного (дырки) и отрицательного (электрона) зарядов с массами m\_e,h. Считать, что и электрон и дырка движутся свободно по одной и той же плоскости, а Кулоновское взаимодействие между ними такое же, как в трехмерном пространстве.

14. Одномерный экситон. Найти собственные энергии и собственные функции одномерного экситона, то есть связанного состояния положительного (дырки) и отрицательного (электрона) зарядов с массами m\_e,h. Считать, что и электрон и дырка движутся свободно по одной и той же прямой, а Кулоновское взаимодействие между ними такое же, как в трехмерном пространстве.

15. TE и TM моды в планарном симметричном волноводе. Вычислить частоты собственных мод (как функции импульса фотона вдоль волновода) планарного диэлектрического волновода толщины d, диэлектрической проницаемости \epsilon\_w, в воздухе с \epsilon = 1. Примечание. Электрическое (магнитное) поле TE (TM) моды в планарном волноводе перпендикулярно импульсу фотона и параллельно плоскости волновода. Для решения задачи для TE (TM) моды нужно через уравнения Максвелла написать замкнутое волновое уравнение для этой единственной компоненты электрического (магнитного) поля, а также воспользоваться граничными условиями Максвелла.

16. Поверхностный плазмон. Вычислить частоту поверхностного плазмона (как функцию его

импульса), распространяющегося по плоской поверхности полубесконечного металла в воздухе. Диэлектрическую проницаемость металла описать формулой Друде. Примечание. Магнитное поле поверхностной плазмонной моды перпендикулярно импульсу плазмона (направленному вдоль поверхности) и параллельно поверхности металла. Для решения задачи нужно через уравнения Максвелла написать замкнутое волновое уравнение для этой единственной компоненты магнитного поля, а также воспользоваться граничными условиями Максвелла. Проанализировать также вопрос о том, возможно ли аналогичное решение для электрического поля.

17. Поверхностный плазмон и эффект Брюстера. Проанализировать связь между поверхностным плазмоном и углом Брюстера.

18. Фотон в планарном микрорезонаторе. Рассчитать эффективную массу локализованного фотона в планарном микрорезонаторе из пары Брэгговских зеркал.

Примеры **П2. Критерии оценивания**

*Пример для экзаменационного билета из трех вопросов:*

1. Что такое полупроводниковые гетеропереходы и квазиэлектрическое поле.
2. Полупроводниковый микрорезонатор: резонаторная мода.
3. Надъямное отражение. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от двух последовательных одномерных барьеров высоты U и толщины l, разнесенных в пространстве на расстояние L. Считать, что потенциалы свободного пространства справа, слева и между барьерами совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E > U (Надъямное отражение). (Метод матриц переноса).

За первое и второе задание студент получает от 0 до 3 баллов, за третье – от 0 до 4 баллов за каждое в зависимости от полноты представленного ответа (решения). Количество набранных баллов определяет оценку за экзамен:

|  |  |
| --- | --- |
| Оценка | Набранные баллы |
| отлично (10) | более 9 |
| отлично (9) | от 8 до 9 включительно |
| хорошо (8) | от 7 до 8 включительно |
| хорошо (7) | от 6 до 7 включительно |
| хорошо (6) | от 5 до 6 включительно |
| удовлетворительно (5) | от 4 до 5 включительно |
| удовлетворительно (4) | от 3 до 4 включительно |
| удовлетворительно (3) | от 2 до 3 включительно |
| неудовлетворительно (2) | от 1 до 2 включительно |
| неудовлетворительно (1) | не более 1 |

**П3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Порядок проведения экзамена, особенности оценки выполненных заданий.

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется от 30 минут до 1 часа на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена (зачета) обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой и вычислительной техникой.

Экзаменационные билеты по курсу **«Физика наноструктур»**

Билет №1.

1. Что такое полупроводниковые гетеропереходы и квазиэлектрическое поле. Перечислить основные типы гетеропереходов и наноструктур.
2. Квантовая яма, нить и точка с бесконечными барьерами. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри квантовой ямы с бесконечно высокими стенками. Рассмотреть все геометрии: локализацию в 1-, 2- и 3-мерной яме с размерами Lx; Lx;Ly; Lx;Ly;Lz, а также цилиндрически и сферически симметричные ямы

Билет №2.

1. В чем основное отличие гетеропереходы I и II рода. Чем отличаются согласованные и напряженные наноструктуры
2. Симметричная прямоугольная квантовая яма. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри одномерной симметричной потенциальной ямы глубины V и ширины L. Найти условия, при которых число связанных уровней внутри ямы минимально, и определить это минимальное число уровней.

Билет №3.

1. В чем состоит метод молекулярно-лучевой эпитаксии
2. Квантовая нить. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри двумерной цилиндрически-симметричной потенциальной ямы глубины V и размера (диаметра) L.

Билет №4.

1. В чем состоит метод газофазной и жидкостной эпитаксии.
2. Квантовая точка. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри сферически симметричной трехмерной потенциальной ямы глубины V и размера (диаметра) L.

Билет №5.

1. Описать основные методы наноструктуризации слоистых гетероструктур. Что такое самоорганизующиеся квантовые точки
2. Несимметричная квантовая яма. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри одномерной несимметричной потенциальной ямы ширины L. Считать, что потенциальная энергия слева от ямы равна E1, а справа E2. Найти условия, при которых число связанных уровней внутри ямы минимально, и определить это минимальное число связанных уровней/

Билет №6.

1. Описать основные экспериментальные методы исследования наноструктур.
2. Двойная квантовая яма. Найти собственные энергии и собственные функции электрона, локализованного внутри одномерной двойной симметричной потенциальной ямы. Глубина и ширина каждой ямы V и L, соответственно, и ширина барьера между ямами l. Потенциальные энергии слева, справа и между ямами считать равными 0.

Билет № 7.

1. В чем состоят основные закономерности квантовой механики локализации электронов и дырок в наноструктурах с гетеропереходами I рода.
2. Подбарьерное туннелирование. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от одномерного барьера высоты U и толщины l. Считать, что потенциалы свободного пространства справа и слева от барьера совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E < U (туннелирование сквозь барьер). (Метод матриц переноса)

Билет №8.

1. Особенности локализации электронов и дырок в наноструктурах с гетеропереходами II рода.
2. Надбарьерное отражение. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от одномерного барьера высоты U и толщины l. Считать, что потенциалы свободного пространства справа и слева от барьера совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E > U (Надбарьерное отражение). (Метод матриц переноса)

Билет №9.

1. В чем состоит метод огибающих для описания электронных свойств полупроводниковых наноструктур.
2. Резонансное туннелирование. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от двух последовательных одномерных барьеров высоты U и толщины l, разнесенных в пространстве на расстояние L. Считать, что потенциалы свободного пространства справа, слева и между барьерами совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E < U (туннелирование сквозь барьер). (Метод матриц переноса).

Билет №10.

1. Основные особенности туннелирования электронов и дырок в наноструктурах и резонансные состояния.
2. Надъямное отражение. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от двух последовательных одномерных барьеров высоты U и толщины l, разнесенных в пространстве на расстояние L. Считать, что потенциалы свободного пространства справа, слева и между барьерами совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E > U (Надъямное отражение). (Метод матриц переноса).

Билет №11.

1. Рассказать о методах матриц переноса и рассеяния для решения уравнения Шредингера.
2. Сверхрешетка. Найти решение для спектра и волновых функций электрона в одномерной сверхрешетке, состоящей из бесконечной последовательности квантовых ям глубины V, ширины L и расстоянием между ямами l (период сверхрешетки L+l)

Билет №12.

1. Взаимодействие электронов и дырок в наноструктурах со светом: Гамильтониан взаимодействия и правила отбора.
2. Эффективная масса в двухзоном приближении. Вычислить эффективную массу электрона и дырки в двухзонном kp-приближении.

Билет №13.

1. Плотность электронных состояний в наноструктурах различной пространственной размерности.
2. Двумерный экситон. Найти собственные энергии и собственные функции двумерного экситона, то есть связанного состояния положительного (дырки) и отрицательного (электрона) зарядов с массами m\_e,h. Считать, что и электрон и дырка движутся свободно по одной и той же плоскости, а Кулоновское взаимодействие между ними такое же, как в трехмерном пространстве.

Билет №14.

1. Экситоны в объемном полупроводнике и наноструктурах пониженной размерности.
2. Одномерный экситон. Найти собственные энергии и собственные функции одномерного экситона, то есть связанного состояния положительного (дырки) и отрицательного (электрона) зарядов с массами m\_e,h. Считать, что и электрон и дырка движутся свободно по одной и той же прямой, а Кулоновское взаимодействие между ними такое же, как в трехмерном пространстве.

Билет №15.

1. Эффект диэлектрического усиления экситонов в наноструктурах с различной диэлектрической проницаемостью слоев.
2. TE и TM моды в планарном симметричном волноводе. Вычислить частоты собственных мод (как функции импульса фотона вдоль волновода) планарного диэлектрического волновода толщины d, диэлектрической проницаемости \epsilon\_w, в воздухе с \epsilon = 1. Примечание. Электрическое (магнитное) поле TE (TM) моды в планарном волноводе перпендикулярно импульсу фотона и параллельно плоскости волновода. Для решения задачи для TE (TM) моды нужно через уравнения Максвелла написать замкнутое волновое уравнение для этой единственной компоненты электрического (магнитного) поля, а также воспользоваться граничными условиями Максвелла.

Билет №16.

1. Светодиоды и лазеры на квантовых наноструктурах (КЯ, КН, КТ); системы с горизонтальным и вертикальным резонатором.
2. Поверхностный плазмон. Вычислить частоту поверхностного плазмона (как функцию его импульса), распространяющегося по плоской поверхности полубесконечного металла в воздухе. Диэлектрическую проницаемость металла описать формулой Друде. Примечание. Магнитное поле поверхностной плазмонной моды перпендикулярно импульсу плазмона (направленному вдоль поверхности) и параллельно поверхности металла. Для решения задачи нужно через уравнения Максвелла написать замкнутое волновое уравнение для этой единственной компоненты магнитного поля, а также воспользоваться граничными условиями Максвелла. Проанализировать также вопрос о том, возможно ли аналогичное решение для электрического поля.

Билет №17.

1. Полупроводниковый микрорезонатор: резонаторная мода. Полупроводниковый микрорезонатор с квантовой ямой: экситонные поляритоны
2. Поверхностный плазмон и эффект Брюстера. Проанализировать связь между поверхностным плазмоном и углом Брюстера.

Билет №18.

1. Принцип работы квантового каскадного лазера.
2. Фотон в планарном микрорезонаторе. Рассчитать эффективную массу локализованного фотона в планарном микрорезонаторе из пары Брэгговских зеркал.

Билет №19.

1. Что такое фотонные кристаллы и поляритонные кристаллы. Что такое метаматериалы.
2. Подбарьерное туннелирование. Вычислить вероятности прохождения и отражения электрона от одномерного барьера высоты U и толщины l. Считать, что потенциалы свободного пространства справа и слева от барьера совпадают и равны нулю. Вероятности рассчитать как функции энергии электрона E. Рассмотреть случай E < U (туннелирование сквозь барьер). (Метод матриц переноса)

Билет №20.

1. В чем состоит и для чего используется метод сканирующей туннельной спектроскопии. Манипулирование одиночными молекулами и атомами
2. Эффективная масса в двухзоном приближении. Вычислить эффективную массу электрона и дырки в двухзонном kp-приближении.