

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Ф. УТКИНА**

Кафедра «Микро- и наноэлектроника»

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.ДВ.02.02 Физика полупроводников

Рязань

Оценочные материалы – это совокупность учебно-методических материалов (контрольных заданий, описаний форм и процедур), предназначенных для оценки качества освоения обучающимися данной дисциплины как части основной профессиональной образовательной программы.

Цель – оценить соответствие знаний, умений и уровня приобретенных компетенций обучающихся целям и требованиям основной профессиональной образовательной программы в ходе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации.

Основная задача – обеспечить оценку уровня сформированности общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, приобретаемых обучающимся в соответствии с этими требованиями.

Контроль знаний проводится в форме текущего контроля и промежуточной аттестации.

Текущий контроль успеваемости проводится с целью определения степени усвоения учебного материала, своевременного выявления и устранения недостатков в подготовке обучающихся и принятия необходимых мер по совершенствованию методики преподавания учебной дисциплины (модуля), организации работы обучающихся в ходе учебных занятий и оказания им индивидуальной помощи.

К контролю текущей успеваемости относятся проверка знаний, умений и навыков, приобретенных обучающимися в ходе выполнения индивидуальных заданий на практических занятиях и лабораторных работах. При оценивании результатов освоения практических занятий и лабораторных работ применяется шкала оценки «зачтено – не зачтено». Количество лабораторных и практических работ и их тематика определена рабочей программой дисциплины, утвержденной заведующим кафедрой.

Результат выполнения каждого индивидуального задания должен соответствовать всем критериям оценки в соответствии с компетенциями, установленными для заданного раздела дисциплины.

Промежуточный контроль по дисциплине осуществляется проведением экзамена.

Форма проведения экзамена – письменный ответ по утвержденным экзаменационным билетам, сформулированным с учетом содержания учебной дисциплины. После выполнения письменной работы обучаемого производится ее оценка преподавателем и, при необходимости, проводится теоретическая беседа с обучаемым для уточнения экзаменационной оценки.

Паспорт оценочных материалов по дисциплине

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины (результаты по разделам)	Код контролируемой компетенции (или её части)	Вид, метод, форма оценочного мероприятия
1	2	3	4
1	Введение. Элементарная теория электропроводности полупроводников	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен
2	Основы зонной теории. Плотность состояний и равновесное энергетическое распределение носителей заряда в полупроводниках	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен
3	Колебания атомов кристаллической решётки	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен
4	Кинетические явления и механизмы рассеяния электронов и дырок	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен
5	Кинетические явления и перенос носителей заряда в полупроводниках	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен
6	Генерация, перенос и рекомбинация неравновесных носителей заряда	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен
7	Неупорядоченные полупроводники. Перенос носителей заряда в материалах с ловушками	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен
8	Прыжковый перенос носителей заряда	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-2.1 ПК-2.2	Экзамен

Критерии оценивания компетенций (результатов)

- 1). Уровень усвоения материала, предусмотренного программой.
- 2). Умение анализировать материал, устанавливать причинно-следственные связи.
- 3). Ответы на вопросы: полнота, аргументированность, убежденность, умение
- 4). Качество ответа (его общая композиция, логичность, убежденность, общая эрудиция)
- 5). Использование дополнительной литературы при подготовке ответов.

Уровень освоения сформированности знаний, умений и навыков по дисциплине оценивается в форме бальной отметки:

«Отлично» заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание учебно-программного материала, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «отлично» выставляется студентам, усвоившим взаимосвязь основных понятий дисциплины в их значении для приобретаемой профессии, проявившим творческие способности в понимании, изложении и использовании учебно-программного материала.

«Хорошо» заслуживает студент, обнаруживший полное знание учебно-программного материала, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе. Как правило, оценка «хорошо» выставляется студентам, показавшим систематический характер знаний по дисциплине и способным к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей учебной работы и профессиональной деятельности.

«Удовлетворительно» заслуживает студент, обнаруживший знания основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справляющийся с выполнением заданий, предусмотренных программой, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «удовлетворительно» выставляется студентам, допустившим погрешности в ответе на экзамене и при выполнении экзаменационных заданий, но обладающим необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя.

«Неудовлетворительно» выставляется студенту, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение или приступить к профессиональной деятельности по окончании вуза без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы *(для всех видов проводимых занятий или самостоятельных работ необходимо предусмотреть материалы для проверки знаний, умений и владений навыками)*

Типовые задания в рамках самостоятельной работы студентов для укрепления теоретических знаний, развития умений и навыков, предусмотренных компетенциями, закрепленными за дисциплиной.

- Методы получения нанокластеров, квантовых точек, тонких пленок, квантовых проволок.
- Практическое применение углеродных наносистем.
- Практическое применение фотонных наносистем.
- Практическое применение бионаносистем.
- Практическое применение спинтронных наносистем.

Примеры заданий и контрольных вопросов к лабораторным работам, выполняемым для приобретения и развития знаний и практических умений, предусмотренных компетенциями.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ТУННЕЛИРОВАНИЯ

4. Контрольные вопросы

1. Расскажите про туннельный эффект.
2. Опишите основные выражения для туннельного тока.
3. Расскажите про практическое применение эффекта туннелирования.
4. Опишите, что происходит с волновой функцией электрона при его прохождении через туннельно-прозрачный барьер.

Полный перечень **заданий и вопросов** к лабораторным работам, выполняемым для приобретения и развития знаний и практических умений, предусмотренных компетенциями, приведен в соответствующих методических указаниях.

1. Методы исследования материалов и структур электроники. Методические указания к лабораторным работам / Сост.: В.Г. Литвинов, С.И. Мальченко, Н.Б. Рыбин, А.В. Ермачихин. Рязан. гос. радиотехн. университет.- Рязань, 2012.- 40 с.

2. Квантовая Физика. Методические указания к лабораторным работам/ Сост.: В.Г. Литвинов, Н.Б. Рыбин, Н.В. Рыбина, А.В. Ермачихин. Рязан. гос. радиотехн. университет.- Рязань, 2014.- 24 с.

3. Зондовые методы исследования материалов и структур электроники. Методические указания к лабораторным работам / Сост.: А.П. Авачев, В.Г. Литвинов, К.В. Митрофанов, В.Г. Мишустин. Рязан. гос. радиотехн. университет.- Рязань, 2011.- 48 с.

4. Методические рекомендации по подготовке студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций; сост.: Т.А.Холомина, Е.Н.Евдокимова / Рязан. гос. радиотехн. ун-т.- Рязань, 2016. 16 с.

5. Физика наносистем. Методические указания к лабораторным работам/ Сост.: В.Г. Литвинов, Н.Б. Рыбин, Н.В. Рыбина, А.В. Ермачихин, Д.С. Кусакин. Рязан. гос. радиотехн. университет.- Рязань, 2015.- 24 с.

6. *Физика наносистем. Методические указания к лабораторным работам/ Сост.: В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин, Рязан. гос. радиотехн. университет.- Рязань, 2017.- 32 с.*

Список **типовых контрольных вопросов** для оценки уровня сформированности знаний, умений и навыков, предусмотренных компетенциями, закрепленными за дисциплиной.

1. *Современное значение физики наносистем. Классификация наносистем.*
2. *Электронные оболочки в атомах, квантовые числа.*
3. *Уравнение Шредингера, водородоподобный атом.*
4. *Атомные кластеры, квантовые точки.*
5. *Нанотрубки, нанопроволоки, системы с пониженной размерностью газа носителей заряда.*
6. *Конденсированное состояние материи. Методы получения атомных кластеров, квантовых точек, проволок, трубок, ям.*
7. *Гетероструктуры. Физические свойства и эффекты.*
8. *Многообразие электронных наносистем. Применение.*
9. *Углеродные наноструктуры. Фуллерены, графен, углеродные нанотрубки. Описание физических свойств. Методы получения. Применение.*
10. *Фотонные, оптические кристаллы. Получение, свойства, применение.*
11. *Наносистемы и квантовая оптика. Принципы работы оптического лазера.*
12. *Классификация лазеров на основе наносистем.*
13. *Двух-фотонные процессы, стимулированное Рамановское рассеяние и другие оптические эффекты.*
14. *Бионаносистемы. Классификация, методы получения.*
15. *Использование плазмонных возбуждений нано кластеров для диагностики и лечения заболеваний. Ноноконтейнеры.*
16. *Оптические свойства биотканей и плазмонные резонансы. Кластеры-зонды. Фотодеструкция клеток.*
17. *Транспортные явления в наносистемах.*
18. *Спинтронные наносистемы. Получение, свойства, физические принципы работы.*
19. *Кулоновская блокада. Наносистемы для одноэлектроники.*
20. *Методы теоретического исследования наносистем. Классификация.*
 21. *Теоретические модели наносистем и их использование.*
 22. *Элементарная теория Друде.*
 23. *Теория функционала плотности (DFT) как базовый микроскопический метод изучения наносистем.*
 24. *Классификация экспериментальных методов исследования наносистем. Сравнение и характеристики.*

Типовые тестовые задания для укрепления и проверки теоретических

знаний, развития умений и навыков, предусмотренных компетенциями, закрепленными за дисциплиной.

Тест 1

1. Главное квантовое число электрона в атоме характеризует:
 1. дрейфовую подвижность электрона;
 2. энергию электрона;
 3. проекцию импульса электрона на заданное направление;
 4. собственный механический момент.
2. Квантовая точка характеризуется:
 1. формой;
 2. размерами;
 3. структурой;
 4. всеми перечисленными параметрами.
3. В квантовых проволоках наблюдается:
 1. электронный транспорт вдоль квантовой проволоки;
 2. электронный транспорт поперек квантовой проволоки;
 3. двумерный газ носителей заряда;
 4. трехмерный газ носителей заряда.
4. К методу(ам) получения структур с квантовыми ямами относятся:
 1. метод центрифугирования;
 2. метод газовой эпитаксии;
 3. метод магнетронного распыления;
 4. все перечисленные методы.
5. Полупроводниковой гетероструктурой является:
 1. структура с квантовой ямой для носителей заряда;
 2. кремниевый p-n-переход;
 3. пленочный резистор;
 4. МДП-транзистор.
6. К углеродным наноструктурам относятся:
 1. квантовые точки и проволоки A3B5, легированные углеродом;
 2. квантовые проволоки A2B6;
 3. все перечисленное в пунктах 1 и 2;
 4. ничего из перечисленного.
7. На основе каких наносистем может быть реализован лазер:
 1. на металлических квантовых точках;
 2. на полупроводниковых квантовых ямах;
 3. на тонких слоях металлов с магнитными свойствами нанометровой толщины;
 4. на газовой смеси He-Ne малой массы и объема.
8. Изучение Рамановского рассеяния в наноструктурах позволяет:
 1. определить химический состав поверхности наносистемы;
 2. определить размеры элементов наносистемы;
 3. определить кинетические параметры носителей заряда в наносистеме;
 4. все перечисленные характеристики наносистемы.
9. К транспортным эффектам в наносистемах относятся:
 1. интерференция электронных волн;
 2. квазибаллистический транспорт;
 3. квантовый эффект Холла;
 4. все перечисленные эффекты.
10. Особенности рельефа поверхности непроводящих наносистем могут быть детально исследованы:
 1. методом сканирующей туннельной микроскопии;
 2. методом атомно-силовой микроскопии;
 3. методом растровой электронной микроскопии;
 4. методом оже-электронной спектроскопии.

Тест 2

1. Спиновое квантовое число электрона в атоме характеризует:
 1. орбитальную скорость электрона в атоме;
 2. энергию электрона;
 3. проекцию импульса электрона на заданное направление;
 4. собственный механический момент.
2. Нанотрубка характеризуется:
 1. количеством стенок;
 2. диаметром;
 3. хиральностью;
 4. всеми перечисленными параметрами.
3. В полупроводниковых квантовых ямах наблюдается:
 1. размерное квантование;
 2. эффект туннелирования;
 3. нульмерный газ носителей заряда;
 4. одномерный газ носителей заряда.
4. К методу(ам) получения квантовых точек относятся:
 1. золь-гель метод;
 2. метод газофазной эпитаксии;
 3. метод эпитаксии из молекулярных пучков;
 4. все перечисленные методы.
5. Полупроводниковой гетероструктурой является:
 1. полупроводниковая структура со слоями квантовых точек;
 2. германиевый p-n-переход;
 3. пленочный конденсатор;
 4. диодная структура Шоттки.
6. К углеродным наноструктурам относятся:
 1. фуллерен;
 2. графен;
 3. легированная углеродная нанотрубка;
 4. все перечисленное в пунктах 1 - 3.
7. В спинтронах наблюдаются эффекты:
 1. гигантского магнитосопротивления;
 2. спин-зависимое туннелирование;
 3. эффект Кондо;
 4. ничего из перечисленного.
8. Изучение одноэлектронного туннелирования возможно в:
 1. в однобарьерных наносистемах;
 2. в двухбарьерных наносистемах;
 3. в одноэлектронном транзисторе;
 4. во всех перечисленных наносистемах.
9. К транспортным эффектам в наносистемах относятся:
 5. интерференция электронных волн;
 6. квазибаллистический транспорт;
 7. квантовый эффект Холла;
 8. все перечисленные эффекты.
10. Зонная структура полупроводниковых наносистем с квантовыми ямами может быть исследована:
 1. методом сканирующей туннельной микроскопии;
 2. методом фотолюминесценции;
 3. методом спектроскопии адмиттанса;
 4. всеми перечисленными методами.
 - 5.

Примеры контрольных заданий, выполняемых обучающимися для приобретения и развития знаний и практических умений, предусмотренных компетенциями.

Волновая функция

1. Объясните, почему физический смысл имеет не сама Ψ -функция, а квадрат ее модуля $|\Psi|^2$?
2. Объясните, почему волновая функция должна быть конечной, однозначной и непрерывной.
3. Запишите выражение для вероятности W обнаружения частицы в конечном объеме V , если известна координатная пси-функция частицы $\Psi(x, y, z)$.
4. Волновая функция, описывающая некоторую частицу может быть представлена в виде $\Psi(x, t) = \psi(x) \cdot e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$. Покажите, что плотность вероятности нахождения частицы определяется только координатной Ψ -функцией.
5. Ψ -функция некоторой частицы имеет вид $\psi = \frac{A}{r} e^{-r/a}$, где r - расстояние этой частицы до силового центра; a - некоторая постоянная. Используя условие нормировки вероятностей, определите нормировочный коэффициент A .
6. Используя условие нормировки вероятностей, определите нормировочный коэффициент A волновой функции $\psi = Ae^{-r/a}$, описывающей основное состояние электрона в атоме водорода, где r - расстояние электрона от ядра, a - первый боровский радиус.
7. Используя условие нормировки вероятностей, определите нормировочный коэффициент волновой функции $\psi = Ae^{-r^2/(2a^2)}$, описывающей поведение некоторой частицы, где r - расстояние частицы от силового центра; a - некоторая постоянная.
8. Волновая функция $\psi = A \sin(2\pi x/l)$ определена только в области $0 \leq x \leq l$. Используя условие нормировки, определите нормировочный множитель A .
9. Ψ -функция некоторой частицы имеет вид $\psi = \frac{A}{r} e^{-r/a}$, где r - расстояние частицы от силового центра; a - некоторая постоянная. Определите среднее расстояние частицы до силового центра.
10. Волновая функция, описывающая некоторую частицу, имеет вид $\psi = Ae^{-r^2/(2a^2)}$, где r - расстояние этой частицы до силового центра; a - некоторая постоянная. Определите среднее расстояние частицы до силового центра.
11. Волновая функция, описывающая основное состояние электрона в атоме водорода, имеет вид $\psi = Ae^{-r/a}$, где r - расстояние электрона от ядра, a - первый боровский радиус. Определите среднее значение квадрата расстояния электрона до ядра в основном состоянии.
12. Волновая функция, описывающая некоторую частицу, имеет вид $\psi(r) = \frac{A}{r} e^{-r^2/a^2}$, где A - нормировочный множитель, равный $\frac{1}{\sqrt{\pi a} \sqrt{2\pi}}$; r - расстояние частицы от силового центра; a - некоторая постоянная. Определите среднее значение квадрата расстояния частицы до силового центра.
13. Волновая функция, описывающая основное состояние электрона в атоме водорода, имеет вид $\psi = Ae^{-r/a}$, где r - расстояние электрона от ядра, a - первый боровский радиус. Определите наиболее вероятное расстояние электрона до ядра.
14. Волновая функция, описывающая некоторую частицу, имеет вид $\psi = Ae^{-r^2/(2a^2)}$, где r - расстояние частицы от силового центра; a - некоторая постоянная. Определите наиболее вероятное расстояние частицы до силового центра.

Уравнение Шредингера и его применение

15. Запишите уравнение Шредингера для стационарных состояний электрона, находящегося в атоме водорода.
16. Одномерное уравнение Шредингера (для стационарных состояний) для частицы, движущейся под действием квазиупругой силы.
17. Запишите общее уравнение Шредингера для свободной частицы, движущейся вдоль оси x , и решите это уравнение.
18. Исходя из принципа классического детерминизма и причинности в квантовой механике, объясните толкование причинности в классической и квантовой теориях.

19. Известно, что свободная квантовая частица описывается плоской монохроматической волной де Бройля. Плотность вероятности (вероятность, отнесенная к единице объема) обнаружения свободной частицы $|\psi|^2 = \psi\psi^* = |A|^2 = const$. Объясните, что означает постоянство этой величины.
20. Запишите уравнение Шредингера для стационарных состояний для свободной частицы, движущейся вдоль оси x , а также определите средством его решения собственные значения энергии. Что можно сказать об энергетическом спектре свободной частицы?

Частица в потенциальной яме

21. Волновая функция, описывающая частицу в момент времени $t = 0$, имеет вид $\Psi(x,0) = Ae^{-x^2/a^2 + ikx}$, где a и k - некоторые положительные постоянные. Определите: 1) нормировочный коэффициент A ; 2) область, в которой частица локализована.
22. Частица находится в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" шириной l с бесконечно высокими "стенками". Запишите уравнение Шредингера в пределах "ямы" ($0 \leq x \leq l$) и решите его.
23. Частица находится в одномерной "потенциальной яме" шириной l с бесконечно высокими "стенками". Выведите выражение для собственных значений энергии E_n .
24. Волновая функция, описывающая состояние частицы в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками", имеет вид $\psi(x) = A \sin kx$. Определите: 1) вид собственной волновой функции $\psi_n(x)$; 2) коэффициент A , исходя из условия нормировки вероятностей.
25. Известно, что нормированная собственная волновая функция, описывающая состояние электрона в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками", имеет вид $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi}{l} x$, где l - ширина "ямы". Определите среднее значение координаты x электрона.
26. Докажите, что собственные волновые функции, описывающие состояние частицы в одномерной "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками", являются ортогональными, т. е. удовлетворяют условию: $\int_0^l \psi_n(x)\psi_m(x)dx = 0$, если $n \neq m$. Здесь l - ширина "ямы"; n и m - целые числа.
27. Частица в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" шириной l с бесконечно высокими "стенками" находится в основном состоянии. Определите вероятность обнаружения частицы в левой трети "ямы".
28. Частица в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" шириной l с бесконечно высокими "стенками" находится в основном состоянии ($n = 2$). Определите вероятность обнаружения частицы в области $3/8l \leq x \leq 5/8l$.
29. Электрон находится в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" шириной l с бесконечно высокими "стенками". Определите вероятность W обнаружения электрона в средней трети "ямы", если электрон находится в возбужденном состоянии ($n = 3$). Поясните физический смысл полученного результата, изобразив графически плотность вероятности обнаружения электрона в данном состоянии.
30. Частица в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" шириной l с бесконечно высокими "стенками" находится в возбужденном состоянии ($n = 3$). Определите, в каких точках "ямы" ($0 \leq x \leq l$) плотность вероятности обнаружения частицы: 1) максимальна; 2) минимальна. Поясните полученный результат графически.
31. Определите, при какой ширине одномерной прямоугольной "потенциальной ямы" с бесконечно высокими "стенками" дискретность энергетического спектра электрона сравнима с его средней кинетической энергией при температуре T .
32. Докажите, что энергия свободных электронов в металле не квантуется. Примите, что ширина l прямоугольной "потенциальной ямы" с бесконечно высокими "стенками" для электрона в металле составляет 10 см.
33. Частица находится в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками". Определите, во сколько раз изменяется отношение разности соседних энергетических уровней $\Delta E_{n+1,n} / E_n$ частицы при переходе от $n = 3$ к $n = 8$. Объясните физическую сущность полученного результата.
34. Определить собственную энергию электрона в потенциальном ящике шириной 10\AA , если он находится на третьем разрешенном уровне.
35. Определить минимальный энергетический интервал между соседними уровнями для электрона в потенциальном ящике, если ширина ящика $l = 10\text{\AA}$.
36. Энергия электрона, находящегося в потенциальном ящике, в основном состоянии равна 5эВ . Определить длину волны де Бройля на втором разрешенном уровне.
37. Какова вероятность обнаружения электрона в середине потенциального ящика на основном уровне?

38. Определить вероятность нахождения электрона в потенциальном ящике на расстоянии $l/3$ (l - ширина ящика), если электрон находится на третьем разрешенном уровне.
39. Определить, на каком уровне в потенциальном ящике находится электрон, если отношение разности энергий вышестоящего уровня (и неизвестного) к неизвестному равно $3/5$.

Частицы и потенциальные барьеры

40. Частица с энергией E движется в положительном направлении оси x и встречает на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой U и конечной шириной l , причем $E < U$. Запишите уравнение Шредингера для областей 1, 2 и 3.
41. Для условия предыдущей задачи запишите решения уравнений Шредингера для областей 1, 2 и 3. Ψ -функция обычно нормируется так, что $A_1 = 1$. Представьте графически качественный вид Ψ -функций.
42. Электрон с энергией $E = 5$ эВ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 10$ эВ и шириной $l = 0,1$ нм. Определите коэффициент D прозрачности потенциального барьера.
43. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $l = 0,1$ нм. Определите в электрон-вольтах разность энергий $U - E$, при которой вероятность прохождения электрона сквозь барьер составит $0,5$.
44. Протон с энергией $E = 5$ эВ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 10$ эВ и шириной $l = 0,1$ нм. Определите вероятность прохождения протоном этого барьера. Во сколько раз надо сузить барьер, чтобы вероятность прохождения его протоном была такой же, как для электрона при выше приведенных условиях.
45. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $l = 0,1$ нм. Разность между высотой потенциального барьера и энергией движущегося в положительном направлении оси x электрона $U - E = 5$ эВ. Определите, во сколько раз изменится коэффициент прозрачности D потенциального барьера для электрона, если разность $U - E$ возрастает в 4 раза.
46. Частица с энергией E движется в положительном направлении оси x и встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой U , причем $E > U$. Запишите уравнение Шредингера для областей 1 и 2.
47. Для условия предыдущей задачи запишите решение уравнений Шредингера для областей 1 и 2. Ψ -функция обычно нормируется так, что $A_1 = 1$. Представьте графически качественный вид Ψ -функций.
48. Частица с энергией $E = 10$ эВ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 5$ эВ. Определите коэффициент преломления n волн де Бройля на границе потенциального барьера.
49. Электрон с длиной волны де Бройля $\lambda = 100$ пм, двигаясь в положительном направлении оси x , встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 100$ эВ. Определите длину волны де Бройля после прохождения барьера.
50. Частица с энергией $E = 50$ эВ, двигаясь в положительном направлении оси x , встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 20$ эВ. Определите вероятность отражения частицы от этого барьера.
51. Частица массой $m = 10^{-19}$ кг, двигаясь в положительном направлении оси x со скоростью $v = 20$ м/с, встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 100$ эВ. Определите коэффициент отражения R волн де Бройля на границе потенциального барьера.
52. Частица с энергией E движется в положительном направлении оси x и встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой U , причем $E < U$. Запишите уравнение Шредингера для областей 1 и 2.
53. Для условия предыдущей задачи запишите решение уравнений Шредингера для областей 1 и 2. Ψ -функция обычно нормируется так, что $A = 1$. Представьте графически качественный вид Ψ -функций.
54. Электрон с длиной волны λ де Бройля, равной 120 пм, движется в положительном направлении оси x и встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 200$ эВ. Определите коэффициент отражения R волн де Бройля на границе потенциального барьера.
55. Частица с энергией E движется в положительном направлении оси x и встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный барьер высотой U , причем $E < U$. Принимая $A_1 = 1$ (как это обычно делается) и используя условия непрерывности волновой функции и ее первой производной на границе областей 1 и 2, определите плотность вероятности $|\psi_2(0)|^2$ обнаружения частицы в точке $x = 0$ области 2.
56. Частица с энергией E движется в положительном направлении оси x и встречает на своем пути бесконечно широкий прямоугольный потенциальный барьер высотой U , причем $E < U$. Принимая $A_1 = 1$ (как обычно делается) и используя условия непрерывности волновой функции и ее первой производной на границе областей 1 и 2, определите плотность вероятности обнаружения частицы на расстоянии x от потенциального барьера.
57. Определить длину волны де Бройля для электрона, прошедшего над потенциальным барьером, если коэффициент преломления равен $1/3$, а высота барьера 9 эВ.

58. Определить показатель преломления волн де Бройля для электронов, если коэффициент отражения их от барьера равен 0,25.
59. Определить, какой энергией должен обладать электрон для прохождения через барьер прямоугольной формы толщиной 10Å и высотой 9 эВ, если коэффициент прозрачности равен 0,5.
60. Электрон с энергией 49 эВ набегаёт на потенциальный барьер высотой 24 эВ. Определить показатель преломления волн де Бройля.
61. Определить коэффициент прозрачности барьера для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 51 В, если высота барьера 76 эВ и его ширина 2Å . Барьер прямоугольной формы.
62. Определить разность энергии электрона и высоты потенциального барьера, если его вероятность нахождения на расстоянии 1Å от границы барьера равна 0,3.
63. Определить энергию электрона, набегающего на потенциальный барьер высотой 9 эВ, если коэффициент преломления волн де Бройля $4/5$.
64. Построить график зависимости коэффициента прозрачности прямоугольного барьера высотой 25 эВ от его ширины для электронов с энергией 20 эВ.
65. Построить график зависимости коэффициента прозрачности прямоугольного потенциального барьера шириной 8Å от разности $U - E$ для $E < U$, где U - высота потенциального барьера.

Линейный гармонический осциллятор

66. Докажите, что волновая функция $\psi(x) = A x e^{-\frac{\sqrt{mk}}{2\hbar} x^2}$ может быть решением уравнения Шредингера для гармонического осциллятора, масса которого m и постоянная квазиупругой силы k . Определите собственное значение полной энергии осциллятора.
67. Частица массой m движется в одномерном потенциальном поле $U(x) = kx^2/2$ (гармонический осциллятор). Волновая функция, описывающая поведение частицы в основном состоянии, имеет вид $\psi(x) = A e^{-ax^2}$, где A - нормировочный коэффициент; a - положительная постоянная. Используя уравнение Шредингера, определите: 1) постоянную a ; 2) энергию частицы в этом состоянии.
68. Объясните физический смысл существования энергии нулевых колебаний для квантового гармонического осциллятора. Зависит ли наличие нулевых колебаний от формы "потенциальной ямы"?
69. Математический маятник можно рассматривать в качестве гармонического осциллятора. Определите в электрон-вольтах энергию нулевых колебаний для маятника длиной $l = 1\text{ м}$, находящегося в поле тяготения Земли.
70. Рассматривая математический маятник массой $m = 100\text{ г}$ и длиной $l = 0,5\text{ м}$ в виде гармонического осциллятора, определите классическую амплитуду A маятника, соответствующую энергии нулевых колебаний этого маятника.