

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
РАЗДЕЛ 1. Учебный план.....	4
РАЗДЕЛ 2. Основные сведения о дисциплине.....	5
РАЗДЕЛ 3. Рекомендуемая литература.....	6
РАЗДЕЛ 4. Электронный адрес кафедры физики и электронные средства информации.....	6
РАЗДЕЛ 5. Структура дисциплины.....	7
РАЗДЕЛ 6. Учебная программа дисциплины «Физические основы современных технологий» и методические указания к изучению тем программы.....	8
РАЗДЕЛ 7. Терминология (понятийный аппарат).....	14
РАЗДЕЛ 8. Лабораторные занятия	15
РАЗДЕЛ 9. Контрольные работы.....	16
9.1. Требования к оформлению контрольных работ.....	16
9.2. Методические указания к решению задач.....	19
9.3. Темы контрольных работ.....	20
Задача №1 по теме «Корпускулярно-волновой дуализм в наномире»...	20
Задачи №2 и №3 по теме «Физика низкоразмерных систем в микро- и наноэлектронике».....	22
Задача №4 по теме «Атомы и молекулы».....	26
Задача №5 по теме «Электроны в кристаллах».....	29
Задачи №6 и №7 по теме «Квантовая теория электропроводности».....	31
Задача №8 по теме «Физические основы радиационных технологий и ядерной энергетики».....	36
РАЗДЕЛ 10. Ответы.....	38
Приложения.....	40

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физические основы современных технологий» (ФОСТ) относится к математическому и естественнонаучному циклу дисциплин (код УЦ ООП Б.2.7). Она является непосредственным продолжением дисциплины «Физика» и развитием рассматриваемых в ней проблем на основе современных концепций и технических приложений. Круг вопросов ФОСТ взаимосвязан с философией, использует ее законы и подкрепляет их примерами. Являясь частью современной физики, фундаментальной дисциплиной, ФОСТ логически, содержательно и методически взаимосвязана с другими дисциплинами, модулями и практиками. ФОСТ готовит студентов к эксплуатационной, исследовательской, конструкторской и технологической деятельности на основе использования последних достижений науки и техники, развивает способность использовать в познавательной и профессиональной деятельности современные знания из области естественных наук.

Предлагаемое издание содержит методические указания к изучению и варианты контрольной работы по дисциплине «Физические основы современных технологий» для самостоятельной работы студентов третьего курса заочного отделения направления 162500. Большое внимание уделено важнейшим и сравнительно новым направлениям в современной электронной технике. Важную роль в развитии умений будущих специалистов, в приобретении ими практических навыков играет самостоятельная работа студентов над решением задач. Для повышения ее эффективности в начале каждой темы приведены краткие теоретические сведения, основные расчетные формулы и методические указания к решению задач. Кроме того, подробно разобраны примеры решения типовых задач и для всех задач контрольной работы приведены ответы. Приложение содержит необходимые для решения задач справочные материалы.

Все справочные материалы и решения примеров приведены в Международной системе единиц (СИ).

РАЗДЕЛ 1. УЧЕБНЫЙ ПЛАН

дисциплины «Физические основы современных технологий» для направления 162500 (3-й курс)

Объем часов по учебному плану ДО		Объем и распределение аудиторных часов занятий для ЗО				Виды СРС			Форма итогового контроля
Общие	Аудит	Аудит. занятия	Лекции	Практ. занятия	Лаб. занятия	КП	КР	Кр	
144	54	12	8	-	4	-	-	1	Зачет

РАЗДЕЛ 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ

Целями освоения дисциплины «Физические основы современных технологий» являются:

- формирование целостного представления о процессах и явлениях, лежащих в основе работы современной техники, о фундаментальных физических законах, управляющих ими, о возможностях современных методов познания природы;
- подготовка специалистов к смене технологий;
- овладение знаниями по физическим основам современных технологий для освоения общепрофессиональных и специальных дисциплин.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:**

- перспективу применения новейших достижений физической науки в наукоемких сферах;
- физические законы, явления и процессы, лежащие в основе современной техники и диагностики технического состояния;
- физические основы работы современных электротехнических приборов и устройств;
- физические основы техносферной безопасности.

- **Уметь:**

- использовать новую технику в производственной деятельности;
- квалифицированно подходить к постановке задач, выбору объектов исследования в связи с их строением и структурой при решении научных, научно-прикладных и технологических проблем;
- пользоваться общенаучной и специальной литературой, раскрывающей принципы работы новой техники.

- **Владеть:**

- культурой мышления, способностью к обобщению, анализу, восприятию современной научной информации, постановкой цели и выбором путей ее достижения;
- методами научно обоснованного выбора соответствующей технологии контроля состояния элементов авиационной техники, наиболее подходящей для решения конкретной задачи.

Базовыми дисциплинами для ФОСТ являются: классический курс физики, математический анализ, алгебра и геометрия, философия. Обучающийся должен владеть знаниями курса физики и математики по программе среднего образования и технического вуза.

Освоение курса ФОСТ необходимо как предшествующее для формируемых дисциплин: электротехника, электроника и схемотехника, диагностика электротехнических систем, моделирование технологических процессов, экология, безопасность жизнедеятельности, философия.

РАЗДЕЛ 3. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

Учебники, учебные пособия (в том числе в электронном виде)

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - СПб.: Изд-во «Лань», 2011. - Кн. 3, 5.
2. Лозовский В.Н., Константинова Г.С., Лозовский С.В. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность: учебное пособие. - 2-е изд., испр. - СПб.: Изд-во «Лань», 2008.
3. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М. Основы нанотехнологии в технике: учебное пособие. МГОУ, 2006. www.iqlib.ru

Литература по выполнению лабораторных работ

4. Бутюгин М.А., Новиков С.М. Пособие по выполнению лабораторной работы КС-5. - М.: МГТУ ГА, 2008. e-ресурс МГТУ ГА.
5. Козлов В.Д., Новиков С.М. Пособие по выполнению лабораторной работы КМ-3. - М.: МГТУ ГА, 2011. e-ресурс МГТУ ГА.

Дополнительная литература

6. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. - М.: Nanotechnology News Network, 2005. www.nanonewsnet.ru
7. Лебедев А.Н. Физика полупроводниковых приборов, - М.: Физматлит, 2008 .

Пособия выдаются в деканате перед началом семестра, а также размещены на сайте университета (e-ресурс) или на странице кафедры физики на вкладке «Студенту-заочнику»: <http://www.mstuca.ru/about/structure/kafedral/>.

РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕКТРОННЫЙ АДРЕС КАФЕДРЫ ФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИИ

1. Электронный адрес кафедры физики (для консультаций)

kf@mstuca.aero

2. Электронные библиотечные ресурсы МГТУ ГА

<http://www.mstuca.ru/biblio/>

3. Перечень адресов порталов и сайтов в Интернете, содержащих учебную информацию по дисциплине:

www.nanonewsnet.ru, www.rusnanonet.ru, www.nanomet.ru, www.nature.web.ru

4. Справочники, учебники и учебные пособия

4.1. Третьяков Ю.Д. Нанотехнологии. Азбука для всех. Физматлит, 2009. www.nanometer.ru

4.2. Образовательные ресурсы Интернета. <http://www.alleng.ru/edu/phys9.htm>

РАЗДЕЛ 5. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

- I. Естественнонаучные идеи и открытия, определяющие современные технологии.
 - Тема 1. Введение. Корпускулярно-волновой дуализм в наномире.
 - Тема 2. Физика низкоразмерных систем в микро- и наноэлектронике.
 - Тема 3. Атомы и молекулы.
- II. Элементы физики конденсированного состояния в современных технологиях.
 - Тема 4. Жидкости и кристаллы.
 - Тема 5. Жидкие кристаллы.
 - Тема 6. Лазеры.
 - Тема 7. Электроны в кристаллах.
 - Тема 8. Квантовая теория электропроводности. Сверхпроводимость.
- III. Технологии современной электроники.
 - Тема 9. Термоэлектрические и контактные явления.
 - Тема 10. Основы современной полупроводниковой электроники.
 - Тема 11. Технологии современных полупроводниковых устройств.
- IV. Нанотехнологии.
 - Тема 12. Инструменты, методы и материалы нанотехнологии.
 - Тема 13. Квантовые компьютеры.
- V. Наукоёмкие и высокие технологии.
 - Тема 14. Современная физика в прикладных сферах.
 - Тема 15. Физические основы радиационных технологий и ядерной энергетики.

РАЗДЕЛ 6. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ» И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ПРОГРАММЫ

I. Естественнонаучные идеи и открытия, определяющие современные технологии

Тема 1. Введение. Корпускулярно-волновой дуализм в наномире

Введение. Цели и задачи курса «Физические основы современных технологий». Предмет ФОСТ. Структура курса. Квантовая механика как фундаментальная основа современных технологий. Волновые свойства микрочастиц. Длина волны де-Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм фотонов и микрочастиц. Соотношения неопределенностей Гейзенберга. Волновая функция, ее математическое представление и физический смысл.

Литература [1, кн. 5, стр. 69 – 84; 2, стр. 58 – 68].

Центральные вопросы темы: корпускулярно-волновой дуализм в микромире, гипотеза де-Бройля, физический смысл волновой функции, соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Вопросы для самоконтроля

1. Можно ли применять законы динамики Ньютона при описании микрообъектов (например: а) электрон в атоме; б) свободный электрон)?
2. В чем состоит смысл понятия корпускулярно-волновой дуализм?
3. Рассчитайте длину волны де-Бройля электрона, прошедшего разность потенциалов 10 В, и человека массой 60 кг, бегущего со скоростью 5 км/ч.
4. Каков физический смысл волновой функции?

Тема 2. Физика низкоразмерных систем в микро- и нанoeлектронике

Квантовые размерные эффекты в современных технологиях. Уровни энергии частиц в квантовых ямах (2D), нитях (1D) и точках (0D). Прохождение частицами потенциальных барьеров. Туннельный эффект. Квантовый гармонический осциллятор.

Литература [1, кн. 5, стр. 85 – 101; 2, стр. 71 – 78].

Центральные вопросы темы: уравнение Шредингера – основное уравнение квантовой механики, квантование энергии в квантовых ямах, туннельный эффект.

Вопросы для самоконтроля

1. Условия проявления квантовых размерных эффектов.
2. Какую информацию о состоянии микрочастицы позволяет получить уравнение Шредингера?
3. Может ли энергия частицы, находящейся в квантовой яме, принимать любые значения?
4. В чем сущность туннельного эффекта?

Тема 3. Атомы и молекулы

Состояние электрона в атоме водорода. Пространственное распределение пси-функции в атоме водорода. Многоэлектронные атомы. Принцип Паули. Распределение электронов в атомах по состояниям. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева. Объяснение химических свойств элементов в квантовой теории. Связь атомов в молекулах. Ионная и ковалентная связи. Электронные, колебательные и вращательные состояния многоатомных молекул. Молекулярные спектры.

Литература [1, кн. 5, стр. 103 – 109, 143 – 152; 2, стр. 68 – 71].

Центральные вопросы темы: спин электрона, принцип Паули, распределение электронов в многоэлектронных атомах по состояниям, связи атомов в молекулах.

Вопросы для самоконтроля

1. Что определяет главное квантовое число в атоме водорода? Какие значения оно может принимать?
2. Поясните структуру электронных уровней в сложных атомах.
3. Для каких частиц применим принцип Паули?
4. Какие частицы называют фермионами?

II. Элементы физики конденсированного состояния в современных технологиях

Тема 4. Жидкости и кристаллы

Дырочная модель жидкости. Кристаллическое состояние. Элементы геометрии кристаллов. Дефекты в кристаллах. Точечные дефекты в кристаллах. Краевые и винтовые дислокации. Дислокации и пластичность. Влияние структуры и дефектов на электрические и механические свойства. Металлические нанокластеры.

Литература [1, кн. 3, стр. 129 – 143].

Центральные вопросы темы: кристаллическая решетка, дефекты в кристаллах, влияние структуры и дефектов на электрические и механические свойства.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды дефектов возникают в кристаллах?
2. Как дефекты влияют на свойства кристаллов?
3. Какие структуры называются нанокластерами?

Тема 5. Жидкие кристаллы

Жидкие кристаллы (ЖК). Особенности жидкокристаллического состояния вещества. Сметические и нематические структуры. Эффект Фредерикса. Влияние электромагнитных полей на структурные свойства жидких кристаллов. S- и В- эффекты, «твист»-эффект, эффект «гость-хозяин». Применение ЖК в современных технологиях. Полупроводниковые OLED-технологии. Преимущества OLED-дисплеев. Сравнительные характеристики.

Литература [1, кн. 3, стр. 129 – 143].

Центральные вопросы темы: классификация жидких кристаллов, физические основы работы ЖК экранов.

Вопросы для самоконтроля

1. Как электромагнитные поля могут влиять на структуру жидких кристаллов?
2. Поясните «твист-эффект».
3. Поясните явление поляризации света.
4. Поясните принципиальную схему работы пикселя в ЖК мониторе.

Тема 6. Лазеры

Оптический квантовый генератор (лазер). Поглощение фотонов атомами. Спонтанное и вынужденное излучения. Принцип детального равновесия. Трехуровневый лазер. Газовые лазеры. Процесс генерации. Создание инверсной заселенности. Способы накачки. Свойства лазерного излучения. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Применение лазеров в современных технологиях. Голография.

Литература [1, кн. 5, стр. 167 – 179; 2, стр. 110 – 113].

Центральные вопросы темы: инверсия заселенности энергетических уровней, трехуровневый рубиновый лазер, свойства лазерного излучения.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем различие между спонтанным и вынужденным излучением?
2. Поясните принцип работы трехуровневого лазера.
3. Свойства лазерного излучения.
4. Поясните понятие инверсной заселенности.

Тема 7. Электроны в кристаллах

Модель свободных электронов. Квантовая теория свободных электронов в металлах. Распределение электронов проводимости в металле по квантовым состояниям. Уровень Ферми. Динамика свободных электронов в кристаллах.

Литература [1, кн. 5, стр. 218 – 235; 2, стр. 78 – 83].

Центральные вопросы темы: модель свободных электронов, спектр энергии свободных электронов в металлах, энергия Ферми.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы основные положения модели свободных электронов?
2. Что такое энергия Ферми?
3. Как заполнены состояния с энергией меньшей, чем энергия Ферми при нулевой температуре?
4. Как заполнены состояния с энергией большей, чем энергия Ферми при нулевой температуре?

Тема 8. Квантовая теория электропроводности. Сверхпроводимость

Энергетические уровни в атомах и энергетические зоны в кристаллах. Зоны Бриллюэна. Распределение электронов по квантовым состояниям в кристалле. Проводники, диэлектрики и полупроводники. Собственная проводимость полупроводников и ее зависимость от температуры. Сверхпроводимость. Куперовские пары. Понятие о высокотемпературной сверхпроводимости. Эффект Джозефсона. Захват и квантование магнитного потока.

Литература [1, кн. 5, стр. 224 – 250; 2, стр. 83 –100].

Центральные вопросы темы: энергетические зоны в кристаллах, зона проводимости, запрещенная зона, сверхпроводимость.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое валентная зона, свободная зона, запрещенная зона?
2. В чем различие расположения электронов по энергетическим зонам в атомах проводников, диэлектриков, полупроводников?
3. Какие носители зарядов обеспечивают проводимость полупроводников?
4. Чем отличается металл от диэлектрика с точки зрения зонной теории?
5. Как изменяется электропроводность собственных полупроводников при увеличении температуры?
6. Поясните понятие куперовской пары.
7. Свойства сверхпроводников.

III. Технологии современной электроники

Тема 9. Термоэлектрические и контактные явления

Термоэлектронная эмиссия. Контактная разность потенциалов. Эффект Зеебека. Явление Пельтье. ТермоЭДС. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Термоэмиссионные и термоэлектрические преобразователи.

Литература [1, кн. 5, стр. 251 – 268].

Центральные вопросы темы: термоэмиссия, контактная разность потенциалов, термоЭДС.

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните понятие работы выхода электронов из металлов.
2. В чем состоит явление термоэлектронной эмиссии. Где оно применяется?
3. Каковы причины появления контактной разности потенциалов?
4. Термоэлектронная эмиссия и ее закономерности.
5. Принцип работы термоэмиссионных генераторов электроэнергии.
6. Принцип работы термоэлектрических генераторов электроэнергии.

Тема 10. Основы современной полупроводниковой электроники

Этапы развития электроники. Примесная проводимость полупроводников. p - n переходы. Туннелирование в p - n переходе. Туннельные диоды, стабилитроны. Гетеропереходы. Резонансно-туннельные диоды.

Литература [1, кн. 5, стр. 269 – 275; 2, стр. 58 – 63, 100 – 115].

Центральные вопросы темы: примесные полупроводники, p - n переходы, туннелирование в p - n переходе.

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните понятие дырочной проводимости.
2. Какими свойствами должна обладать примесь, чтобы из чистого кремния получить полупроводник n -типа?
3. Какими свойствами должна обладать примесь, чтобы из чистого кремния получить полупроводник p -типа?
4. Поясните причину образования запирающего слоя в p - n переходах.
5. Какая характеристика определяет равновесие в p - n переходах?
6. Поясните характер ВАХ p - n переходов с точки зрения носителей зарядов.

Тема 11. Технологии современных полупроводниковых устройств

Транзисторы. Планарная технология интегральных микросхем (ИМС). Методы формирования ИМС. Литография.

Оптоэлектронные приборы. Технология светодиодов. Фотоэлементы. Тепловидение. Инжекционные полупроводниковые лазеры. Лазеры на двойных гетероструктурах. Лазеры на квантовых ямах, нитях, точках и сверхрешетках. Технологии оптоволоконной связи.

Литература [2, стр. 118 – 141, 159 – 180].

Центральные вопросы темы: транзисторы, литография, оптоэлектронные приборы.

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните принцип работы светодиодов.
2. Поясните принцип работы биполярных транзисторов.
3. Поясните технологию литографии.
4. Поясните понятие сверхрешетки в микроэлектронике.

IV. Нанотехнологии

Тема 12. Инструменты, методы и материалы нанотехнологии

Сканирующие зондовые микроскопы. Фуллерены, углеродные нанотрубки, графены. Их свойства, способы получения и перспективы применения. Топливные ячейки. Ионные и фрактальные кластеры. Свойства наночастиц. Алмазоиды.

Литература [2, стр. 240 – 295].

Центральные вопросы темы: общие принципы сканирующей зондовой микроскопии, углеродные наноструктуры, кластеры.

Вопросы для самоконтроля

1. Как используется туннельный эффект в зондовой микроскопии?
2. Какая структура называется фуллереном?
3. Каковы основные свойства нанотрубок?
4. Какая структура называется графеном?

Тема 13. Квантовые компьютеры

Квантовые компьютеры. Спинтроника. Гигантское магнитосопротивление (ГМС). ГМС-считывающие головки, ГМС-элементы памяти. Молеетроника. Нанопотоника. Фотонные кристаллы. Углеродная наноэлектроника.

Литература [2, стр. 181 –197].

Центральные вопросы темы: гигантское магнитосопротивление (ГМС), фотонные кристаллы, молеетроника.

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните понятие спина электрона.
2. Поясните механизм намагниченности ферромагнетиков.
3. Как работают ГМС-считывающие головки?
4. Как работают ГМС-элементы памяти?

V. Наукоёмкие и высокие технологии**Тема 14. Современная физика в прикладных сферах**

Основы технологии космических полетов. Скорость истечения реактивной струи. Движение тел с переменной массой. Формула Циолковского. Уравнение Мещерского. Ионные двигатели. Солнечный парус. Космический лифт.

Квантовые гироскопы. Микро- и нано-электромеханические системы. Сенсоры.

Литература [1, кн. 1, стр. 92 –128, 177 – 198].

Центральные вопросы темы: ионные двигатели, солнечный парус, космический лифт.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова роль закона сохранения импульса в реактивном движении?
2. Каков принцип работы солнечного паруса?
3. Какое излучение используется в квантовых гироскопах?
4. Какова роль биений в квантовых гироскопах?

Тема 15. Физические основы радиационных технологий и ядерной энергетики

Строение ядра, модели ядра. Ядерные силы. Энергия связи ядер. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. α -распад, β -распад. Деление ядер. Цепная реакция деления. Атомная энергетика. Реакции синтеза легких ядер. Термоядерные реакции. Возможность контролируемого термоядерного синтеза. Энергетика будущего.

Литература [1, кн. 5, стр. 277 – 317].

Центральные вопросы темы: дефект массы, радиоактивность, ядерные силы, деление ядер, цепная реакция деления, реакции синтеза легких ядер.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите состав атомного ядра. Что такое нуклон?
2. Каков характерный размер атома? Атомного ядра?
3. Что такое зарядовое число ядра и чему оно равно?
4. Закон радиоактивного распада.
5. Энергия связи ядер.
6. Поясните причину освобождения энергии при синтезе ядер.
7. Поясните причину освобождения энергии при делении ядер.

РАЗДЕЛ 7. ТЕРМИНОЛОГИЯ (ПОНЯТИЙНЫЙ АППАРАТ)

Гетеропереход – контакт двух различных полупроводников.

Гигантское магнитосопротивление (ГМС) – квантовомеханический эффект, наблюдаемый в тонких металлических плёнках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоёв. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоёв.

Графен – двумерная модификация углерода.

Жидкие кристаллы – вещества, в которых структурная упорядоченность является промежуточной между упорядоченностью обычных жидкостей и твердых кристаллических тел.

Квантовые размерные эффекты – эффекты, проявляющиеся в частицах с характерным размером менее 10 нм, при которых электроны ведут себя подобно электронам в изолированном атоме.

Нанотехнологии – совокупность процессов, позволяющих создавать материалы, устройства и технические системы, функционирование которых определяется наноструктурой, т.е. упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм.

Наноэлектроника – формирующаяся сегодня область техники, которая занимается разработкой физических и технологических основ создания интегральных электронных схем с характерными размерами элементов менее 100 нм.

Оптоэлектроника – научно-техническое направление, в котором используются эффекты взаимного преобразования электрических и оптических сигналов в веществе и на этой основе создаются устройства для генерации, передачи, хранения, обработки и отображения информации.

Принцип Паули (принцип запрета) — один из фундаментальных принципов квантовой механики, согласно которому два и более тождественных фермиона (частиц с полуцелым спином) не могут одновременно находиться в одном квантовом состоянии.

Сверхпроводимость — свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура).

Сверхрешётка – твердотельная структура, в которой помимо периодического потенциала кристаллической решётки имеется дополнительный потенциал, период которого существенно превышает постоянную решётки.

Спинтроника (спиновая электроника) — раздел квантовой электроники, занимающийся изучением спинового токопереноса (спин-поляризованного транспорта) в твердотельных веществах, в частности в гетероструктурах ферромагнетик-парамагнетик или ферромагнетик-сверхпроводник.

Термоядерная реакция - слияние двух лёгкие атомных ядер в одно более тяжёлое (синтез) при достаточной кинетической энергии их теплового движения.

Туннельный эффект – преодоление частицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия меньше высоты барьера.

Фотонные кристаллы – оптическая среда с периодическим изменением коэффициента преломления в масштабе, сопоставимом с длиной волны света.

Фуллерен – молекула углерода, имеющая структуру покрышки футбольного мяча.

РАЗДЕЛ 8. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

Каждый студент заочной формы обучения выполняет 1 лабораторную работу продолжительностью 4 часа по разделу 3 в соответствии с графиком*:

ЛР-КМ-3. Атом водорода.

ЛР-КС-5. Изучение термоэлектронной эмиссии из металлов.

** В рамках тем наименования работ могут меняться в зависимости от конкретных условий (загруженность лаборатории, техническое состояние установок и пр.); описания лабораторных работ можно скачать на сайте университета в разделе «Электронная библиотека» либо взять в лаборатории кафедры физики на время проведения занятий.*

РАЗДЕЛ 9. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

9.1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом дисциплины «Физические основы современных технологий» направления 162500 каждый студент выполняет одну контрольную работу плановой трудоемкостью 32 часа.

При оформлении контрольной работы студенту-заочнику необходимо руководствоваться следующим:

1. Контрольные работы выполняются черной или синей пастой шариковой ручки в обычной школьной тетради (12 страниц в клетку), на обложке которой приводятся сведения по следующему образцу:

Контрольная работа по дисциплине
«Физические основы современных технологий»
Вариант № 45

Студента заочного факультета МГТУ ГА
Иванова А.П.
Шифр АК – 117345

Адрес: г. Тюмень, ул. Авиационная, д. 10, кв. 5

2. Выбор варианта задания осуществляется в соответствии с присвоенным студенту на период обучения номером **Шифра**.

3. Студент-заочник должен решить **восемь задач** того варианта, номер которого совпадает с двумя последними цифрами его **Шифра**. Задачи варианта выбираются по **табл. 1**, приведенной ниже.

4. Условия задач переписываются в тетрадь полностью, без сокращений. Для замечаний преподавателя на страницах тетради обязательно оставляются поля шириной 3 – 4 см.

5. Решение задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями.

6. Решение задач рекомендуется сначала сделать в общем виде, а затем произвести численные расчеты.

Задания, оформленные с нарушением этих требований или содержащие ошибки, возвращаются на доработку, которая выполняется в той же тетради.

Таблица 1

Вар. №	Темы учебной программы и номера задач							
	Тема 1	Тема 2	Тема 2	Тема 3	Тема 7	Тема 8	Тема 8	Тема 15
0	1.10	2. 10	3. 10	4. 10	5. 10	6. 10	7. 10	8. 10
1	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
2	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2	6.2	7.2	8.2
3	1.3	2.3	3.3	4.3	5.3	6.3	7.3	8.3
4	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4	6.4	7.4	8.4
5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
6	1.6	2.6	3.6	4.6	5.6	6.6	7.6	8.6
7	1.7	2.7	3.7	4.7	5.7	6.7	7.7	8.7
8	1.8	2.8	3.8	4.8	5.8	6.8	7.8	8.8
9	1.9	2.9	3.9	4.9	5.9	6.9	7.9	8.9
10	1.10	2.1	3.2	4.3	5.4	6.5	7.6	8.7
11	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.8
12	1.2	2.3	3.4	4.5	5.6	6.7	7.8	8.9
13	1.3	2.4	3.5	4.6	5.7	6.8	7.9	8.10
14	1.4	2.5	3.6	4.7	5.8	6.9	7.10	8.1
15	1.5	2.6	3.7	4.8	5.9	6.10	7.1	8.2
16	1.6	2.7	3.8	4.9	5.10	6.1	7.2	8.3
17	1.7	2.8	3.9	4.10	5.1	6.2	7.3	8.4
18	1.8	2.9	3.10	4.1	5.2	6.3	7.4	8.5
19	1.9	2.10	3.1	4.2	5.3	6.4	7.5	8.6
20	1.10	2.2	3.4	4.6	5.8	6. 10	7.2	8.4
21	1.1	2.3	3.5	4.7	5.9	6.1	7.3	8.5
22	1.2	2.4	3.6	4.8	5. 10	6.2	7.4	8.6
23	1.3	2.5	3.7	4.9	5.1	6.3	7.5	8.7
24	1.4	2.6	3.8	4.10	5.2	6.4	7.6	8.8
25	1.5	2.7	3.9	4.1	5.3	6.5	7.7	8.9
26	1.6	2.8	3.10	4.2	5.4	6.6	7.8	8. 10
27	1.7	2.9	3.1	4.3	5.5	6.7	7.9	8.1
28	1.8	2.10	3.2	4.4	5.6	6.8	7. 10	8.2
29	1.9	2.1	3.3	4.5	5.7	6.9	7.1	8.3
30	1.10	2.3	3.6	4.9	5.2	6.5	7.8	8.1
31	1.1	2.4	3.7	4. 10	5.3	6.6	7.9	8.2
32	1.2	2.5	3.8	4.1	5.4	6.7	7.10	8.3
33	1.3	2.6	3.9	4.2	5.5	6.8	7.1	8.4
34	1.4	2.7	3.10	4.3	5.6	6.9	7.2	8.5
35	1.5	2.8	3.1	4.4	5.7	6.10	7.3	8.6
36	1.6	2.9	3.2	4.5	5.8	6.1	7.4	8.7
37	1.7	2.10	3.3	4.6	5.9	6.2	7.5	8.8
38	1.8	2.1	3.4	4.7	5. 10	6.3	7.6	8.9

39	1.9	2.2	3.5	4.8	5.1	6.4	7.7	8.10
40	1.10	2.4	3.8	4.2	5.6	6.10	7.4	8.8
41	1.1	2.5	3.9	4.3	5.7	6.1	7.5	8.9
42	1.2	2.6	3.10	4.4	5.8	6.2	7.6	8.10
43	1.3	2.7	3.1	4.5	5.9	6.3	7.7	8.1
44	1.4	2.8	3.2	4.6	5.10	6.4	7.8	8.2
45	1.5	2.9	3.3	4.7	5.1	6.5	7.9	8.3
46	1.6	2.10	3.4	4.8	5.2	6.6	7.10	8.4
47	1.7	2.1	3.5	4.9	5.3	6.7	7.1	8.5
48	1.8	2.2	3.6	4.10	5.4	6.8	7.2	8.6
49	1.9	2.3	3.7	4.1	5.5	6.9	7.3	8.7
50	1.10	2.5	3.10	4.5	5.10	6.5	7.10	8.5
51	1.1	2.6	3.1	4.6	5.1	6.6	7.1	8.6
52	1.2	2.7	3.2	4.7	5.2	6.7	7.2	8.7
53	1.3	2.8	3.3	4.8	5.3	6.8	7.3	8.8
54	1.4	2.9	3.4	4.9	5.4	6.9	7.4	8.9
55	1.5	2.10	3.5	4.10	5.5	6.10	7.5	8.10
56	1.6	2.1	3.6	4.1	5.6	6.1	7.6	8.1
57	1.7	2.2	3.7	4.2	5.7	6.2	7.7	8.2
58	1.8	2.3	3.8	4.3	5.8	6.3	7.8	8.3
59	1.9	2.4	3.9	4.4	5.9	6.4	7.9	8.4
60	1.10	2.6	3.2	4.8	5.4	6.10	7.6	8.2
61	1.1	2.7	3.3	4.9	5.5	6.1	7.7	8.3
62	1.2	2.8	3.4	4.10	5.6	6.2	7.8	8.4
63	1.3	2.9	3.5	4.1	5.7	6.3	7.9	8.5
64	1.4	2.10	3.6	4.2	5.8	6.4	7.10	8.6
65	1.5	2.1	3.7	4.3	5.9	6.5	7.1	8.7
66	1.6	2.2	3.8	4.4	5.10	6.6	7.2	8.8
67	1.7	2.3	3.9	4.5	5.1	6.7	7.3	8.9
68	1.8	2.4	3.10	4.6	5.2	6.8	7.4	8.10
69	1.9	2.5	3.1	4.7	5.3	6.9	7.5	8.1
70	1.10	2.7	3.4	4.1	5.8	6.5	7.2	8.9
71	1.1	2.8	3.5	4.2	5.9	6.6	7.1	8.10
72	1.2	2.9	3.6	4.3	5.10	6.7	7.2	8.1
73	1.3	2.10	3.7	4.4	5.1	6.8	7.3	8.2
74	1.4	2.1	3.8	4.5	5.2	6.9	7.4	8.3
75	1.5	2.2	3.9	4.6	5.3	6.10	7.5	8.4
76	1.6	2.3	3.10	4.7	5.4	6.1	7.6	8.5
77	1.7	2.4	3.1	4.8	5.5	6.2	7.7	8.6
78	1.8	2.5	3.2	4.9	5.6	6.3	7.8	8.7
79	1.9	2.6	3.3	4.10	5.7	6.4	7.9	8.8

Продолжение табл. 1

80	1.10	2.8	3.6	4.4	5.2	6.10	7.8	8.6
81	1.1	2.9	3.7	4.5	5.3	6.1	7.9	8.7
82	1.2	2.10	3.8	4.6	5.4	6.2	7.10	8.8
83	1.3	2.1	3.9	4.7	5.5	6.3	7.1	8.9
84	1.4	2.2	3.10	4.8	5.6	6.4	7.2	8.10
85	1.5	2.3	3.1	4.9	5.7	6.5	7.3	8.1
86	1.6	2.4	3.2	4.10	5.8	6.6	7.4	8.2
87	1.7	2.5	3.3	4.1	5.9	6.7	7.5	8.3
88	1.8	2.6	3.4	4.2	5.10	6.8	7.6	8.4
89	1.9	2.7	3.5	4.3	5.1	6.9	7.7	8.5
90	1.10	2.9	3.8	4.7	5.6	6.5	7.4	8.3
91	1.1	2.10	3.9	4.8	5.7	6.6	7.5	8.4
92	1.2	2.1	3.10	4.9	5.8	6.7	7.6	8.5
93	1.3	2.2	3.1	4.10	5.9	6.8	7.7	8.6
94	1.4	2.3	3.2	4.1	5.10	6.9	7.8	8.7
95	1.5	2.4	3.3	4.2	5.1	6.10	7.9	8.8
96	1.6	2.5	3.4	4.3	5.2	6.1	7.10	8.9
97	1.7	2.6	3.5	4.4	5.3	6.2	7.1	8.10
98	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2	8.1
99	1.9	2.8	3.7	4.6	5.5	6.4	7.3	8.2

9.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

В пособие включены задачи различной сложности, однако для их решения не требуется знаний, выходящих за рамки учебной программы по дисциплине «Физические основы современных технологий». Прежде чем приступать к решению задач, следует изучить материал соответствующего раздела учебника. Необходимые для решения задач формулы приведены в начале каждой темы контрольной работы. Перед решением задачи своего варианта полезно разобрать пример решения типовой задачи по рассматриваемой теме.

Прежде всего установите, какие физические закономерности лежат в основе решения задачи. Затем с помощью формул, выражающих эти закономерности, следует найти решение задачи или части ее в буквенных обозначениях, причем искомая величина должна быть выражена через заданные величины. После этого можно перейти к подстановке числовых данных, выраженных обязательно в одной и той же системе единиц. Как правило в СИ. Числовой ответ обязательно должен иметь наименование единицы измерения.

При получении числового ответа следует обращать внимание на точность окончательного результата, которая не должна превышать точности исходных величин. Большую часть задач достаточно решать с точностью до двух-трех значащих цифр.

9.3. ТЕМЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Задача №1 по теме «Корпускулярно-волновой дуализм в наномире»

Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы

Корпускулярно-волновой дуализм является важнейшим внутренним свойством всех материальных объектов природы и заключается в том, что они обладают одновременно корпускулярными и волновыми характеристиками. Впервые корпускулярно-волновой дуализм был обнаружен у света. В 1905 г. А. Эйнштейн ввел понятие частиц света – **фотонов**, несущих **квант** (порцию) энергии ε_{ϕ} и обладающих импульсом \vec{p}_{ϕ} . Эти характеристики связаны с частотой ν и длиной волны λ электромагнитного излучения формулами

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu \quad \text{и} \quad \vec{p}_{\phi} = \frac{h}{\lambda} \vec{n}, \quad (1)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - **постоянная Планка**, \vec{n} - единичный вектор направления движения фотона.

Наличие у электромагнитных волн свойств частиц побудило **Луи де Бройля** высказать в 1924 г. **гипотезу** о всеобщем характере корпускулярно-волнового дуализма. Не только фотоны, но и любая движущаяся частица с энергией E и импульсом \vec{p} обладает волновыми свойствами, которые соответствуют длине волны и частоте, определяемым по формулам

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{p} \quad \text{и} \quad \nu_{\text{Б}} = \frac{E}{h}. \quad (2)$$

Гипотеза де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме всех квантовых объектов ограничивает возможность применения к микрочастицам понятий координаты и импульса в их классическом понимании. Дуализм фотонов и электронов имеет большое значение в развитии современных технологий в электронике, материаловедении и других наукоемких отраслях и особенно в продвижении нанотехнологий.

Пример решения задачи

Пример 1. Сравнить длину волн де Бройля молекулы водорода с ее диаметром. Считать, что молекула имеет скорость, равную средней квадратичной скорости молекул газообразного водорода при температуре 0°C . Диаметр молекулы водорода $d = 0,27$ нм.

Решение

Из молекулярно-кинетической теории следует, что средняя квадратичная скорость молекул газа определяется по формуле

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $T = 273$ К – абсолютная температура газа, m – масса молекулы газа. С учетом этого формулу де Бройля (2) запишем в виде

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{mv_{\text{ср.кв.}}} = \frac{h}{\sqrt{3mkT}} = h \sqrt{\frac{N_A}{3MkT}},$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ - число Авогадро, $M = 0,002$ кг/моль - молярная масса водорода.

После подстановки этих величин и расчета получим $\lambda_{\text{Б}} \approx 0,11$ нм. Эта величина одного порядка с размерами молекулы водорода.

Ответ: $\lambda_{\text{Б}} \approx 0,11$ нм.

Задачи для самостоятельного решения

1.1. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов $U = 200$ В, имеет длину волны де Бройля $\lambda = 2,02$ пм. Найдите массу частицы, если ее заряд численно равен заряду электрона.

1.2. Определите дополнительную энергию, которую необходимо сообщить протону с кинетической энергией $T = 1$ кэВ, чтобы длина волны де Бройля уменьшилась в 3 раза.

1.3. Определите радиус окружности, по которой движется протон в однородном магнитном поле с индукцией $B = 15$ мТл, если его длина волны де Бройля равна 197 нм.

1.4. Определите энергии фотона и электрона, если длина волны того и другого равна 0,1 нм.

1.5. Протон, электрон и фотон имеют одинаковую длину волны $\lambda = 0,1$ нм. Определите соотношение их скоростей.

1.6. Определите кинетическую энергию электрона, если его длина волны де Бройля равна 1 пм.

1.7. Какую разность потенциалов должен пройти электрон из состояния покоя, чтобы его длина волны стала равной 0,16 нм?

1.8. Электрон движется по окружности радиусом $r = 0,5$ см в однородном магнитном поле с индукцией $B = 8$ мТл. Определите его дебройлевскую длину волны.

1.9. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля для него была равна 1 пм?

1.10. Чему равна скорость атома гелия, если его длина волны де Бройля равна 0,1 нм?

Задачи №2 и №3 по теме «Физика низкоразмерных систем в микро- и нанoeлектронике»

Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы

В классической механике состояние частицы задается радиус-вектором \vec{r} и импульсом \vec{p} , изменение которых определяется с помощью второго закона Ньютона. В физике микромира классическое определение состояния утрачивает смысл и можно говорить лишь о **вероятности** обнаружения частицы в той или иной области пространства. Эта вероятность определяется через **пси-функцию** (волновую функцию) $\Psi(x, y, z, t)$, которая является решением уравнения Шредингера и задает **состояние микрочастицы**.

В частности, для частицы массы m , локализованной в **одномерной потенциальной яме** со стороной l и с абсолютно непроницаемыми стенками, решение уравнения Шредингера дает набор собственных функций ψ_n и собственных значений полной энергии E_n :

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n x}{l}, \quad E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots \infty. \quad (3)$$

Эти результаты качественно объясняют закономерности поведения частиц (электронов, фотонов и т.п.), локализованных в некоторой области (в атомах, кристаллах, квантовых точках и т.д.). Знание пси-функции позволяет определить вероятность W обнаружения частицы в заданной области пространства. Например, в одномерном случае, вероятность обнаружения частицы в пределах области $[x_1, x_2]$ равна

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx. \quad (4)$$

Если потенциальная яма имеет форму куба со стороной l с абсолютно непроницаемыми стенками, то собственные функции и собственные значения энергии зависят от трех квантовых чисел $\{n_1, n_2, n_3\}$

$$\psi_{n_1 n_2 n_3} = \sqrt{\frac{2^3}{l^3}} \sin \frac{\pi n_1 x}{l} \sin \frac{\pi n_2 y}{l} \sin \frac{\pi n_3 z}{l},$$

$$E_{n_1 n_2 n_3} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2). \quad (5)$$

При этом возможны состояния с различными наборами квантовых чисел, но имеющие одинаковую энергию. Число таких состояний называется **кратностью вырождения** собственных значений энергии.

В нанoeлектронике широко используются структуры, включающие **потенциальный барьер**, – пространственно ограниченную область высокой потенциальной энергии частицы в силовом поле, с одной или с двух сторон которой потенциальная энергия более или менее резко спадает (туннельные диоды, гете-

роструктуры и т.п.). На рис. 1 приведен потенциальный барьер простейшей формы для случая движения частицы вдоль оси Ox . Максимальное значение потенциальной энергии U_0 называется высотой барьера.

Решение стационарного уравнения Шредингера для частиц, движущихся в области потенциального барьера, приводит к отличным от классической физики выводам. Если частица с энергией $E < U_0$ налетает на прямоугольный потенциальный барьер конечной ширины l (рис. 1), то у нее имеется вероятность отразиться, вероятность проникнуть в область 2 и вероятность пройти потенциальный барьер (**туннельный эффект**) и попасть в область 3.

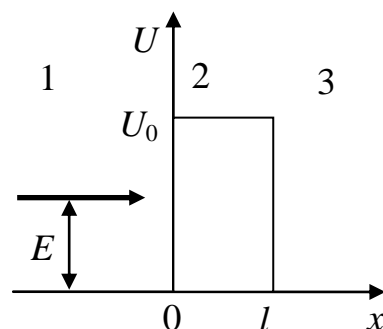


Рис. 1

Соответствующий **коэффициент прохождения (пропускания или прозрачности) D** определяется по формуле

$$D \approx e^{-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}}. \quad (6)$$

Вероятность отражения (**коэффициент отражения**) R и коэффициент прохождения D связаны соотношением $R + D = 1$.

Примеры решения задач

Пример 2. Электрон, находящийся в потенциальной яме кубической формы с абсолютно непроницаемыми стенками, перешел из возбужденного состояния с квантовыми числами $\{4;2;1\}$ на соседнее состояние с меньшей энергией. Сторона куба $l = 1$ нм. Определить выделившуюся при этом энергию и кратность вырождения нового состояния.

Решение

Первоначальное состояние имеет энергию (см. формулу (5))

$$E_{4,2,1} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (4^2 + 2^2 + 1^2) = 21 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2}.$$

Соседним состоянием с меньшей энергией может быть состояние, для которого сумма квадратов квантовых чисел равна 20, 19, 18 и меньше. Перебирая возможные числа, определяем, что ближайшими являются 3 состояния с квантовыми числами $\{1;3;3\}$, $\{3;1;3\}$ и $\{3;3;1\}$, имеющие одинаковую энергию

$$E_{1,3,3} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (1^2 + 3^2 + 3^2) = 19 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2}.$$

Следовательно, кратность вырождения нового состояния равна трем, а выделившуюся при переходе энергию рассчитаем по формуле

$$\Delta E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (21 - 19) = \frac{3,14^2 \cdot 1,05^2 \cdot 10^{-68} \cdot 2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-18}} \text{ Дж} \approx 1,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,75 \text{ эВ}.$$

Ответ: $\Delta E = 0,75$ эВ.

Пример 3. Протон и позитрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов $\Delta\varphi = 10$ кВ и встретили на своем пути прямоугольные потенциальные барьеры (рис. 1) одинаковой высоты $U_0 = 20$ кэВ и ширины $l = 0,1$ нм. Во сколько раз отличаются коэффициенты прозрачности для позитрона и протона.

Решение

Протон и позитрон имеют одинаковые положительные заряды, равные элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, но различные массы. Масса позитрона равна массе электрона, а масса протона в 1836 раз больше ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг). Пройдя одинаковую разность потенциалов, они приобретают одинаковую кинетическую энергию $E = e\Delta\varphi$. Тогда отношение коэффициентов прозрачности (6) запишем в виде

$$\eta = \frac{D_e}{D_p} = \frac{e^{-\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_e U_0 - E}}}{e^{-\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_p U_0 - E}}} = e^{\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_e U_0 - E} + \frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_p U_0 - E}}$$

$$\text{Или } \eta = e^{\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2U_0 - E} \sqrt{m_p} - \sqrt{m_e}} = e^{\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_e U_0 - E} \sqrt{1836 - 1}}$$

Произведем вычисления

$$\eta = e^{\frac{2 \cdot 10^{-13}}{10^{-34}} \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \sqrt{1836 - 1}} = e^{4,28} = 72,2.$$

Ответ: $\eta = 72,2$.

Задачи для самостоятельного решения

2.1-2.10. В табл. 2. заданы квантовые числа состояния электрона в кубической потенциальной яме с абсолютно непроницаемыми стенками. Сторона куба $l = 1$ нм. Определите кратность вырождения соответствующей этому состоянию энергии и разность энергий заданного состояния с соседним, имеющим либо большую энергию (в таблице обозначено как Б), либо меньшую (в таблице обозначено как М).

Таблица 2

Номер задачи	n_1	n_2	n_3	Соседнее состояние		Номер задачи	n_1	n_2	n_3	Соседнее состояние
2.1	4	3	1	Б		2.6	1	3	1	Б
2.2	5	1	1	М		2.7	4	4	2	М
2.3	2	1	3	Б		2.8	4	1	1	М
2.4	5	3	1	М		2.9	2	3	2	М
2.5	4	4	1	М		2.10	1	3	3	М

3.1. Позитрон, имеющий кинетическую энергию $T = 6$ эВ, встречает на своем пути прямоугольный потенциальный барьер (рис. 1) высотой $U_0 = 12$ эВ и шириной $l = 1$ нм. Какова должна быть энергия протона, чтобы вероятность его прохождения этого же барьера была такой же, как у позитрона?

3.2. Электрон с энергией $E = 4,9$ эВ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой $U_0 = 5$ эВ (рис. 1). При какой ширине барьера вероятность прохождения электрона через него будет равна 0,2?

3.3. Две частицы, позитрон и протон, обе с энергией $E = 5$ эВ, движутся в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер (рис. 1) высотой $U_0 = 10$ эВ. Ширина барьера $l = 1$ пм. Определите отношение вероятностей прохождения частицами этого барьера.

3.4. Прямоугольный потенциальный барьер (рис. 1) имеет ширину $l = 0,1$ нм. При какой разности $U_0 - E$ вероятность прохождения электрона через барьер равна 0,9?

3.5. При какой ширине прямоугольного потенциального барьера (рис. 1) коэффициент прозрачности для электронов равен 0,01, если разность энергий $U_0 - E = 10$ эВ?

3.6. Ширина прямоугольного потенциального барьера (рис. 1) равна 0,2 нм. Полная механическая энергия налетающего на него электрона на 1 эВ меньше высоты барьера. Во сколько раз изменится вероятность прохождения электрона через барьер, если эта разность энергий возрастет в 10 раз?

3.7. Электрон проходит через прямоугольный потенциальный барьер шириной $l = 0,5$ нм (рис. 1). Высота U_0 барьера больше энергии E электрона на 1%. Вычислить коэффициент прозрачности барьера, если энергия электрона: 1) $E = 10$ эВ; 2) $E = 100$ эВ.

3.8. Протон с энергией $E = 5$ эВ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер (рис. 1) высотой $U_0 = 10$ эВ и шириной $l = 0,1$ нм. Во сколько раз необходимо сузить барьер, чтобы вероятность прохождения его протоном была такой же, как для позитрона при вышеприведенных условиях?

3.9. Разность между высотой прямоугольного потенциального барьера (рис. 1) и полной механической энергией пролетающего через него электрона равна 5 эВ. Ширина барьера $l = 0,1$ нм. Во сколько раз изменится коэффициент прозрачности потенциального барьера для электрона, если разность вышеназванных энергий возрастет в 4 раза?

3.10. Процесс α -распада ядра можно смоделировать как прохождение α -частицей через прямоугольный потенциальный барьер (рис. 1) высотой $U_0 = 10$ МэВ и шириной $l = 10^{-15}$ м. Найдите коэффициент прозрачности барьера для α -частиц, имеющих энергию $E = 5$ МэВ.

Задача №4 по теме «Атомы и молекулы»

Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы

Опыты Э. Резерфорда доказали, что атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса, и движущихся на периферии электронов. Решение уравнения Шредингера с учетом взаимодействия в такой системе зарядов дает собственные функции, содержащие три целочисленные параметра n, l, m . Эти параметры называются **квантовыми числами** и могут принимать следующие значения:

- **главное** квантовое число $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$;
- **азимутальное (орбитальное)** квантовое число $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$;
- **магнитное** квантовое число $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.

В атоме водорода эти числа определяют соответственно квантование трех величин: энергии электрона E_n , модуля момента импульса M и проекции момента импульса электрона на физически выделенную ось (например Oz) M_z :

$$E_n = -\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}; \quad M = \hbar\sqrt{l(l+1)}; \quad M_z = m\hbar. \quad (7)$$

Из экспериментальных фактов следует, что у электрона имеется собственный момент импульса – **спин**, проекция которого на физически выделенную ось M_{sz} определяется формулой

$$M_{sz} = m_s\hbar, \quad \text{где } m_s = \pm s, \quad s = \frac{1}{2} \text{ – спиновое квантовое число.} \quad (8)$$

В результате состояние электрона в атоме водорода характеризуется четырьмя квантовыми числами n, l, m, m_s . В атомной физике принята система условных обозначений состояния электрона с различными значениями числа l : если $l = 0$, то состояние называется s-состояние, при $l = 1$ – p-состояние, $l = 2$ – d-состояние, $l = 3$ – f-состояние, $l = 4$ – g-состояние и далее по алфавиту. Значение главного квантового числа указывается цифрой перед условным обозначением квантового числа l . Например, электрон в состоянии с $n = 4$ и $l = 2$ обозначается 4d. С учетом этих обозначений уровни энергии в атоме водорода удобно изображать в виде схемы, приведенной на рис. 2. На ней в качестве примера указаны возможные переходы из 4d в 1s состояние.

При определенном значении квантового числа n азимутальное квантовое число l может принимать n значений от 0 до $n-1$, а при каждом значении l квантовое число m может принимать $2l+1$ значение. Совокупность состояний электрона с одинаковым главным квантовым числом n называется оболочкой. В свою очередь, оболочка состоит из подоболочек – состояний с одинаковыми значениями квантового числа l . При переходе электрона с одного уровня энергии на другой происходит испускание или поглощение кванта энергии в виде фотона, который обладает моментом импульса. Поэтому закон сохранения мо-

мента импульса накладывает ограничения на переходы в виде **правила отбора**: возможны переходы между состояниями, для которых выполняется условие $\Delta l = \pm 1$. (9)

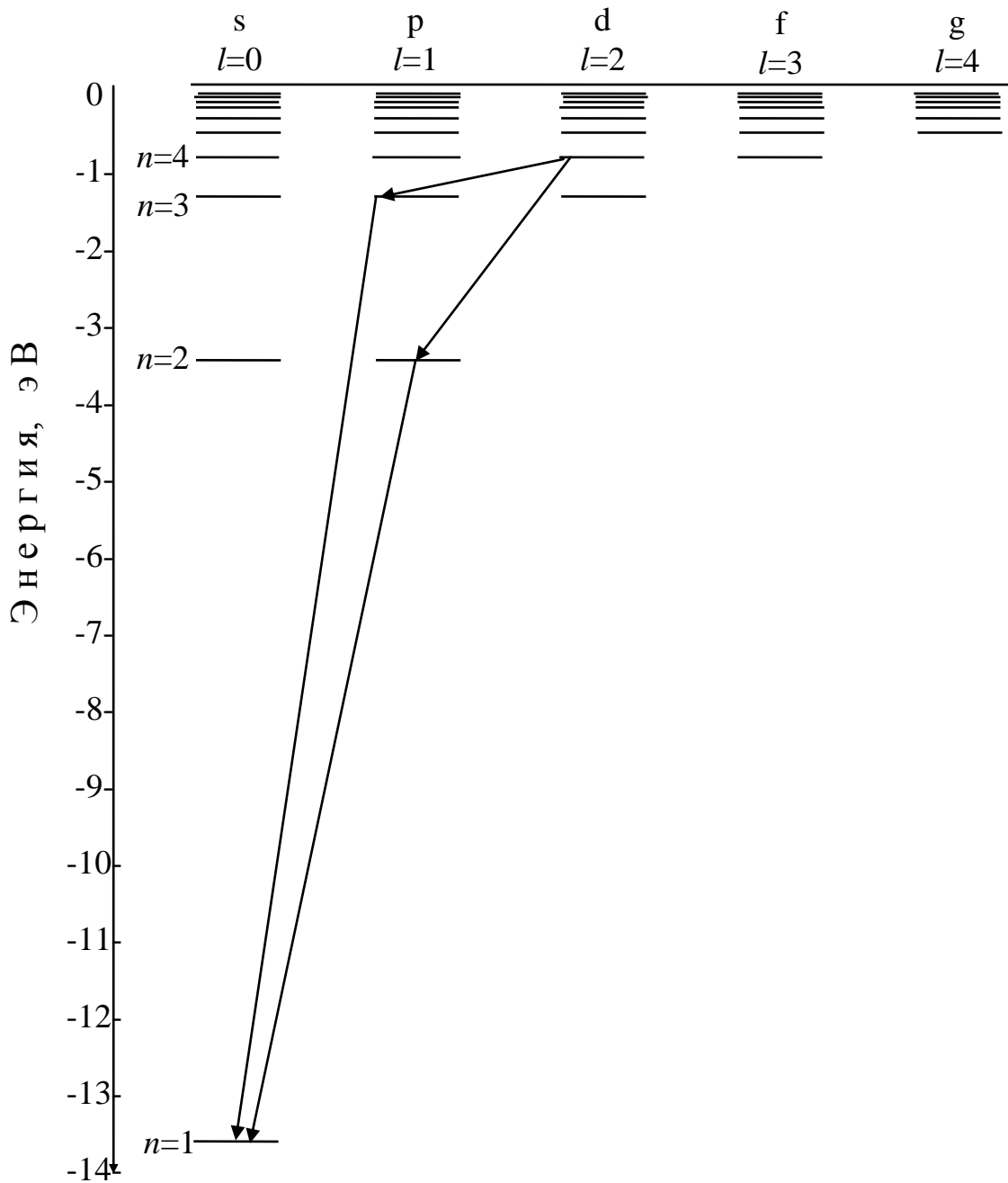


Рис. 2

Пример решения задачи

Пример 4. Электрон в атоме водорода находится в 4d состоянии. Какой максимальный квант энергии может выделиться при его самопроизвольном переходе в основное состояние?

Решение

Правило отбора (9) накладывает ограничение на прямой переход из 4d в 1s состояние. Поэтому переход возможен только в два этапа: из 4d в какое-либо p-состояние, а затем в основное 1s. Соответственно при переходе будет выделено два кванта энергии. Возможными являются переходы (рис. 2) $4d \rightarrow 3p \rightarrow 1s$ и $4d \rightarrow 2p \rightarrow 1s$. Энергия перехода определяется с помощью формулы (7)

$$\Delta E = -\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n_j^2} - \frac{1}{n_i^2}\right).$$

Ее величина будет максимальной при переходе $3p \rightarrow 1s$ ($n_i = 1, n_j = 3$). Произведем расчет

$$\begin{aligned} \Delta E &= -9^2 \cdot 10^{18} \cdot \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6^4 \cdot 10^{-76}}{2 \cdot 1,05^2 \cdot 10^{-68}} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{1^2}\right) \text{ Дж} \approx \\ &\approx 19,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 12,1 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

Ответ: $\Delta E = 12,1 \text{ эВ}$.

Задачи для самостоятельного решения

4.1-4.10. В атоме водорода электрон находится в возбужденном состоянии, указанном в табл. 3. В соответствии с номером варианта выполните одно из следующих заданий:

1. Найдите максимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в одно из низших состояний. Какое это состояние?
2. Найдите минимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в одно из низших состояний. Какое это состояние?
3. Найдите минимальный квант энергии, который необходим для перевода электрона в одно из состояний с большей энергией. Какое это состояние?

Таблица 3

Номер задачи	Состояние электрона	Номер задания	Номер задачи	Состояние электрона	Номер задания
4.1	3p	1	4.6	4f	1
4.2	4f	2	4.7	3s	3
4.3	5d	1	4.8	5p	1
4.4	4d	3	4.9	4p	3
4.5	4p	2	4.10	5f	2

Задача №5 по теме «Электроны в кристаллах»

Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы

В металлах валентные электроны атомов коллективизируются и образуют своего рода газ отрицательных частиц обволакивающий положительно заряженные ионы кристаллической решетки. В первом приближении силы притяжения, действующие со стороны ионов на эти электроны, можно усреднить и представить в виде постоянного потенциала $U_0 < 0$. Такие электроны могут свободно перемещаться в области, ограниченной размерами кристалла, что дает основание применить к ним результаты решения задачи о квантовании энергии частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме. Полученный спектр энергетических состояний заселяется электронами в соответствии с **принципом Паули** (в каждом квантовом состоянии может находиться не более одного электрона). Поэтому имеющаяся в металле совокупность электронов при нулевой температуре распределяется по самым низким доступным для них энергетическим уровням. Заполненный уровень с максимальной энергией называется **уровнем Ферми**, а соответствующая ему энергия E_F – **энергией Ферми**. При нулевой температуре в каждом квантовом состоянии с энергией меньше значения E_F находится по одному электрону. В состояниях с большей энергией электроны при нулевой температуре отсутствуют. В металлах с концентрацией валентных электронов n значение энергии Ферми можно рассчитать по формуле

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} 3\pi^2 n^{\frac{2}{3}}, \quad (10)$$

а среднее значение энергии электронов

$$\langle E \rangle = \frac{3}{5} E_F. \quad (11)$$

Пример решения задачи

Пример 5. Определить концентрацию свободных электронов в металле при температуре $T = 0$ К, если известно, что их средняя энергия равна 1,5 эВ.

Решение

Концентрацию свободных электронов определим с помощью формулы (10) для энергии Ферми, которая связана со средней энергией свободных электронов соотношением (11). После преобразований запишем расчетную формулу

$$n = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2mE_F}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{10m\langle E \rangle}{3\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Выполнив расчет, получим $n = 2,1 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Ответ: $n = 2,1 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Задачи для самостоятельного решения

Примечание: при решении нижеследующих задач воспользуйтесь данными табл. 2 Приложения.

5.1. Определите температуру, при которой средняя кинетическая энергия молекул идеального газа равна средней энергии свободных электронов в меди при температуре $T = 0 \text{ К}$.

5.2. Определите суммарную кинетическую энергию свободных электронов в 1 см^3 золота при температуре $T = 0 \text{ К}$.

5.3. Определите число свободных электронов, приходящихся на один атом лития при температуре $T = 0 \text{ К}$, если энергия Ферми лития равна $E_F = 4,2 \text{ эВ}$. Плотность лития равна 530 кг/м^3 , молярная масса – $0,0069 \text{ кг/моль}$.

5.4. Определите отношение концентраций свободных электронов в двух металлах при температуре $T = 0 \text{ К}$, если известно, что энергия Ферми в одном из них в три раза больше, чем в другом.

5.5. Определите число свободных электронов, приходящихся на один атом алюминия при температуре $T = 0 \text{ К}$, если энергия Ферми равна $E_F = 11,7 \text{ эВ}$. Плотность алюминия равна 2700 кг/м^3 , молярная масса – $0,027 \text{ кг/моль}$.

5.6. Определите концентрацию свободных электронов в металле, если их средняя кинетическая энергия при температуре $T_s = 0 \text{ К}$ такая же, как у молекул идеального газа при температуре $T_r = 30000 \text{ К}$.

5.7. Определите среднюю кинетическую энергию свободных электронов в литии при температуре $T = 0 \text{ К}$.

5.8. Определите максимальную скорость свободных электронов в серебряном слитке при температуре $T = 0 \text{ К}$.

5.9. Определите максимальное значение импульса свободных электронов в рубидии при температуре $T = 0 \text{ К}$.

5.10. Определите энергию Ферми для калия.

Задачи №6 и №7 по теме «Квантовая теория электропроводности. Сверхпроводимость»

Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы

а) электропроводность чистых полупроводников

Если при решении уравнения Шредингера для электронов в металлах учитывать периодичность силового поля ионов кристаллической решетки, то в результате получится, что спектр значений энергии электронов состоит из *разрешенных* – 1, 2, 3 и *запрещенных* – 4, 5 *зон* шириной ΔE (рис. 3).

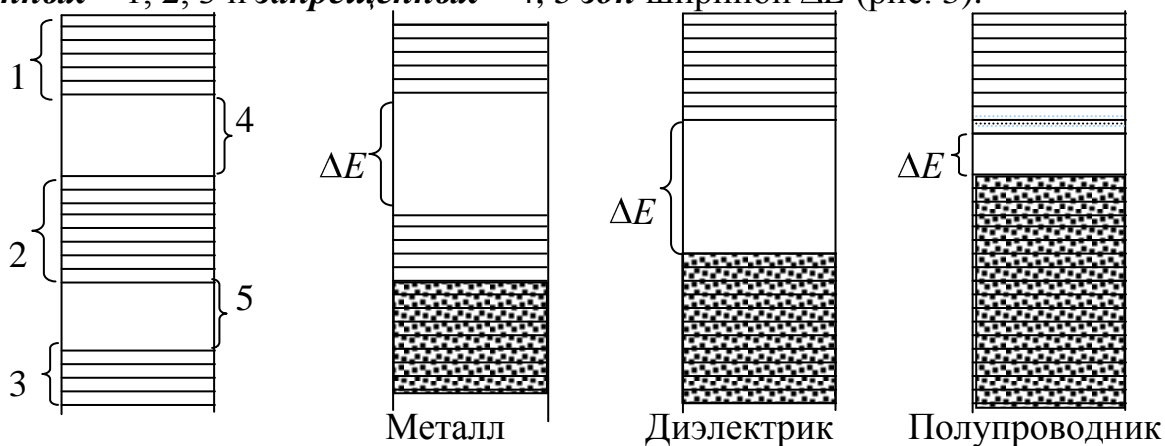


Рис. 3

Разрешенная зона, в которой при температуре $T = 0$ К находятся валентные электроны атомов, называется валентной зоной. В зонах выше валентной при температуре $T = 0$ К электроны отсутствуют. Такие зоны называются свободными. В зависимости от степени заполнения валентной зоны и ширины запрещенной зоны ΔE химически чистые кристаллы можно разбить на три класса: металлы, диэлектрики и полупроводники. В *металлах* электроны заселяют нижнюю часть валентной зоны. При воздействии электрического поля часть электронов переходит в такие свободные квантовые состояния этой же зоны, которые предполагают движение в направлении воздействия внешнего поля. Именно эти электроны и становятся теми упорядоченно движущимися зарядами, которые создают электрический ток. В *диэлектриках* все уровни энергии в валентной зоне при температуре $T = 0$ К заполнены, а ширина запрещенной зоны ΔE настолько велика, что в обычных температурных условиях при воздействии электрического поля вероятность перехода электронов на более высокие энергетические уровни в свободной зоне практически нулевая, и электрический ток в диэлектриках не возникает. В химически *чистых полупроводниках* характер заполнения зон при температуре $T = 0$ К отличается от предыдущего случая только тем, что ширина запрещенной зоны ΔE относительно невелика и в обычных условиях энергия теплового движения оказывается достаточной для того, чтобы вероятность перехода электронов в свободную зону стала ощутимой. Перешедшие в свободную зону электроны, как и электроны в металлах, могут получить дополнительную энергию от электрического поля и создать

электрический ток. В любом случае распределение электронов по энергетическим уровням в зонах описывается функцией Ферми-Дирака. При этом можно приближенно считать, что в чистых полупроводниках уровень Ферми находится посередине запрещенной зоны $E_F = \frac{1}{2}\Delta E$. Используя функцию распределения электронов по состояниям, можно получить, что концентрация электронов проводимости n_e (и дырок) в чистом полупроводнике пропорциональна бoльцмановскому множителю

$$n_e \sim e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}. \quad (12)$$

Поскольку электропроводность σ пропорциональна концентрации носителей тока, можно сделать вывод, что для чистых полупроводников она изменяется по закону

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \text{ где } \sigma_0 \approx \text{const}. \quad (13)$$

б) сверхпроводимость

Сверхпроводимость – свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения T_k (**критическая температура**).

Кроме отсутствия электросопротивления, для сверхпроводящего состояния характерно то, что магнитное поле не проникает в толщину сверхпроводника. Однако достаточно сильное внешнее магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Значение напряженности магнитного поля H_k , при котором это происходит, называется **критическим полем**. Значение H_k зависит от температуры материала в соответствии с формулой

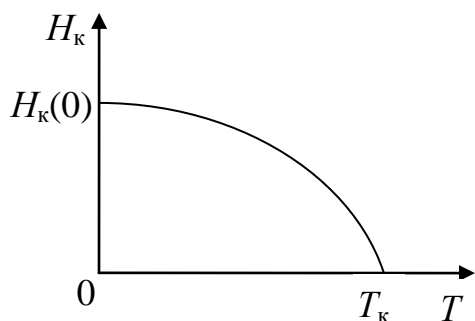


Рис. 4

$$H_k(T) = H_k(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_k} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

Примерный вид этой зависимости приведен на рис. 4. В проводниках 2-го рода эта зависимость более сложная. Если увеличивать силу тока, текущего через сверхпроводник, то при некотором значении i_k собственное магнитное поле проводника разрушает сверхпроводящее состояние. Это значение называют **критическим током**.

Примеры решения задач

Пример 6. Образец из чистого полупроводника нагревают на $\Delta T = 125$ К от температуры $T_1 = 250$ К. При этом его удельная электрическая проводимость увеличивается в 800 раз. Как она изменится при последующем нагревании еще на $\Delta T = 125$ К?

Решение

Используя формулу (13) для температурной зависимости удельной электрической проводимости чистого полупроводника, запишем отношение ее значения σ_2 при температуре $T_2 = T_1 + \Delta T$ к значению σ_1 при температуре T_1

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = e^{\frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad \text{или} \quad \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \frac{\Delta E}{2k} \frac{\Delta T}{T_1 T_2}.$$

Аналогичное соотношение для значений σ_3 при температуре $T_3 = T_1 + 2\Delta T$ и σ_2 имеет вид

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_2} = e^{\frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3} \right)} \quad \text{или} \quad \ln \frac{\sigma_3}{\sigma_2} = \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3} \right) = \frac{\Delta E}{2k} \frac{\Delta T}{T_2 T_3}.$$

Решая полученную систему уравнений (исключая ширину запрещенной зоны ΔE), находим

$$\ln \frac{\sigma_3}{\sigma_2} = \frac{\Delta E}{2k} \frac{\Delta T}{T_2 T_3} = \frac{\Delta T}{T_2 T_3} \frac{T_1 T_2}{\Delta T} \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{T_1}{T_3} \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{T_1}{T_1 + 2\Delta T} \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}.$$

Учитывая, что $T_1 + 2\Delta T = 2T_1$, упростим это выражение

$$\ln \frac{\sigma_3}{\sigma_2} = \frac{T_1}{T_1 + 2\Delta T} \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \ln \sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}}.$$

Тогда
$$\frac{\sigma_3}{\sigma_2} = \sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \approx 28,3.$$

Ответ: удельная электрическая проводимость увеличивается еще в 28,3 раза.

Пример 7. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для олова в отсутствие магнитного поля равна 3,7 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет $2,4 \cdot 10^4$ А/м. Рассчитать максимально допустимое значение тока при температуре $T = 2$ К для провода диаметром $d = 1$ мм, изготовленного из сверхпроводящего олова.

Решение

Для сверхпроводников первого рода справедливо соотношение

$$H_k(T) = H_k(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_k} \right)^2 \right],$$

где $H_k(T)$ – критическая напряженность магнитного поля при температуре T . Тогда при $T = 2$ К для олова

$$H_k(2\text{К}) = 2,4 \cdot 10^4 \cdot \left[1 - \left(\frac{2,0}{3,7} \right)^2 \right] = 1,7 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Предельный ток ограничивается критической напряженностью магнитного поля на поверхности образца. Для цилиндрического провода диаметром d справедлива формула

$$H_{\text{пов}} = \frac{i}{\pi d},$$

где $H_{\text{пов}}$ – напряженность магнитного поля на поверхности провода, по которому протекает ток i . Тогда максимально допустимое значение тока при температуре $T = 2$ К для провода диаметром $d = 1$ мм, изготовленного из сверхпроводящего олова, рассчитывается по формуле

$$i_k = \pi d H_k(2) = 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 10^4 = 53,4 \text{ А.}$$

Таким образом, предельный ток пропорционален диаметру провода, а не площади его поперечного сечения.

Ответ: $i_k = 53,4$ А.

Задачи для самостоятельного решения

6.1-6.10. При изменении температуры чистого беспримесного полупроводника от значения T_1 до T_2 меняются собственная концентрация носителей от n_1 до n_2 , его удельная электрическая проводимость от σ_1 до σ_2 и электросопротивление от R_1 до R_2 . По данным, приведенным в табл. 4, найдите величину, указанную в последнем столбце.

Обозначения: ΔE - ширина запрещенной зоны полупроводника, E_F - уровень Ферми, отсчитанный от верхней границы валентной зоны.

Таблица 4

Номер задачи	$\frac{n_2}{n_1}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	$\frac{R_2}{R_1}$	T_1 , К	T_2 , К	ΔE , эВ	E_F , эВ	Найдите
6.1		5,2		300	400			ΔE
6.2	37,5			400	500			E_F
6.3			5	550	500			E_F
6.4		10		400	500			E_F
6.5		2,7		273		0,72		T_2
6.6	2,28			273	283			ΔE
6.7			6	800			0,7	T_2
6.8	10			700		5,4		T_2
6.9			2,45	290	273			ΔE
6.10	8			400		0,54		T_2

7.1. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для олова в отсутствие магнитного поля равна 3,7 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет 24 кА/м. Определить для температуры $T = 2$ К диаметр провода из сверхпроводящего олова, по которому может протекать ток $i = 100$ А без разрушения сверхпроводящего состояния.

7.2. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для свинца в отсутствие магнитного поля равна 7,26 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре $T = 4,9$ К составляет 34,8 кА/м. Определить критическую напряженность магнитного поля H_k для свинца при температуре 0 К.

7.3. По ванадиевому проводу круглого сечения диаметром 1 мм, находящемуся в жидком гелии, течет ток силой 50 А. После того, как весь гелий испарился, температура стала повышаться и при $T = 4,9$ К проводник перешел в обычное (не сверхпроводящее) состояние. Для ванадия критическая напряженность магнитного поля $H_k(0)$ при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет 109 кА/м. Найти температуру перехода ванадия в сверхпроводящее состояние в отсутствие магнитного поля.

7.4. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для олова в отсутствие магнитного поля равна 3,69 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет 24 кА/м. Определить критическую напряженность магнитного поля H_k для олова при температуре 3 К.

7.5. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для свинца в отсутствие магнитного поля равна 7,26 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре $T = 4,9$ К составляет 34,8 кА/м. Какой силы ток можно пропускать по проводу из свинца диаметром 1 мм при температуре 0 К без разрушения сверхпроводящего состояния.

7.6. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для ванадия в отсутствие магнитного поля равна 5,3 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет 109 кА/м. Какой силы ток можно пропускать по проводу из ванадия диаметром 1 мм при температуре $T = 3$ К без разрушения сверхпроводящего состояния.

7.7. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для свинца в отсутствие магнитного поля равна 7,26 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет 63,9 кА/м. Какой диапазон рабочих температур рекомендован для работы изделия, в котором используется свинцовый провод диаметром 1 мм в сверхпроводящем состоянии, если необходимо, чтобы по нему протекал ток силой 100 А?

7.8. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для олова в отсутствие магнитного поля равна 3,69 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре $T = 3$ К составляет 8,2 кА/м. Какой силы ток

можно пропускать по проводу из олова диаметром 1 мм при температуре 0 К без разрушения сверхпроводящего состояния.

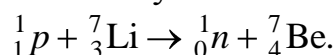
7.9. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для свинца в отсутствие магнитного поля равна 7,26 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре $T = 4,9$ К составляет 34,8 кА/м. Определить критическую напряженность магнитного поля H_k для свинца при температуре 3 К.

7.10. Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k для ванадия в отсутствие магнитного поля равна 5,3 К, а критическая напряженность магнитного поля H_k при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет 109 кА/м. В эксперименте было установлено, что сверхпроводящее состояние ванадиевого провода диаметром 2 мм исчезает при силе тока свыше 200 А. Какова была при этом температура провода?

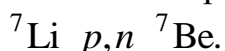
Задача №8 по теме «Физические основы радиационных технологий и ядерной энергетики»

Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы

Ядерной реакцией называется процесс, идущий при столкновении ядра или элементарной частицы с другим ядром, в результате которого изменяется нуклонный состав исходного ядра, а также появляются новые частицы среди продуктов реакции. При записи ядерной реакции слева пишется сумма исходных частиц, затем ставится стрелка, а за ней сумма конечных продуктов. Например,



Эту же реакцию можно записать в более короткой символической форме

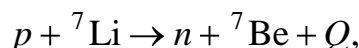


При рассмотрении ядерных реакций используются точные **законы сохранения**: энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и другие. Если в качестве элементарных частиц в ядерной реакции фигурируют только нейтроны, протоны и γ -кванты, то в процессе реакции сохраняется и число нуклонов. Тогда должны соблюдаться баланс нейтронов и баланс протонов в начальном и конечном состояниях. Для реакции ${}^7\text{Li} \quad p, n \quad {}^7\text{Be}$ получим:

- число протонов $3 + 1 = 0 + 4$;
- число нейтронов $4 + 0 = 1 + 3$.

Пользуясь этим правилом можно идентифицировать одного из участников реакции, зная остальных. Достаточно частыми участниками ядерных реакций являются α -частицы (${}^4\text{He}$ – ядра гелия), дейтроны (${}^2\text{H}$ – ядра тяжелого изотопа водорода, содержащие кроме протона по одному нейтрону) и тритоны (${}^3\text{H}$ – ядра сверхтяжелого изотопа водорода, содержащие кроме протона два нейтрона).

Разность энергий покоя начальных и конечных частиц определяет энергию реакции. Она может быть как больше нуля, так и меньше нуля. В более полной форме рассмотренная выше реакция записывается так:



где Q – энергия реакции. Для ее расчета с помощью таблиц свойств ядер сравнивают разность суммарной массы исходных участников реакции и суммарной массы продуктов реакции (в а.е.м.). Затем полученная разность масс пересчитывается в энергетические единицы (1 а.е.м. соответствует 931,5 МэВ).

Пример решения задачи

Пример 8. При бомбардировке нейтронами ядер изотопа бора ${}^{10}\text{B}$ наблюдается испускание α -частиц. Какое получается остаточное ядро? Рассчитать энергию реакции.

Решение

Запишем уравнение реакции в виде ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0n \rightarrow ? + {}^4_2\text{He}$. Для нее баланс протонов $5 + 0 = Z + 2$, баланс нейтронов $5 + 1 = N + 2$. Очевидно, что $Z = 3$ и $N = 4$. Следовательно, остаточное ядро – ${}^7_3\text{Li}$. Для расчета энергии реакции сравним суммы масс ядра мишени и нейтрона с суммой масс образовавшихся ядер (в а.е.м.). Используя данные таблицы (см. Приложения), получим:

$$M({}^{10}\text{B}) + m({}^1n) = 10,01294 + 1,00867 = 11,02161,$$

$$M({}^7\text{Li}) + M({}^4\text{He}) = 7,01601 + 4,00260 = 11,01861.$$

Разность масс $\Delta m = 0,003$ а.е.м., что в пересчете соответствует высвобождаемой энергии $Q = 0,003 \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 2,7945 \text{ МэВ}$.

Ответ: остаточное ядро – ${}^7_3\text{Li}$, $Q = 2,7945 \text{ МэВ}$.

Задачи для самостоятельного решения

8.1 -8.10. В табл. 5 приведены ядерные реакции, соответствующие варианту задания. Используя данные табл. 4 Приложения, определите недостающее в записи ядро или частицу и энергию реакции.

Таблица 5

Номер задачи	Ядерная реакция	Номер задачи	Ядерная реакция
8.1	${}^6\text{Li} + ? \rightarrow {}^8\text{Be} + {}^4\text{He}$	8.6	${}^6\text{Li} + ? \rightarrow {}^8\text{Be} + {}^1\text{H}$
8.2	${}^{12}\text{C} + {}^2\text{H} \rightarrow ? + {}^{11}\text{B}$	8.7	${}^{10}\text{B} + {}^6\text{Li} \rightarrow ? + {}^4\text{He}$
8.3	${}^{16}\text{O} + {}^7\text{Li} \rightarrow ? + {}^3\text{H}$	8.8	${}^{17}\text{O} + {}^1\text{H} \rightarrow ? + {}^4\text{He}$
8.4	${}^{14}\text{N} + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^{18}\text{F} + ?$	8.9	${}^{18}\text{O} + {}^6\text{Li} \rightarrow ? + {}^4\text{He} + n$
8.5	${}^{11}\text{B} + {}^7\text{Li} \rightarrow ? + {}^3\text{H}$	8.10	$? + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{14}\text{N} + n$

РАЗДЕЛ 10. ОТВЕТЫ

Задача №1

№	Ответ	№	Ответ
1.1	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг	1.6	0,8 МэВ
1.2	8 кэВ	1.7	59 В
1.3	1,4 мкм	1.8	0,1 нм
1.4	12,4 кэВ, 0,15 эВ	1.9	822 В
1.5	$v_p:v_e:v_\phi = 10^{-3}:2,4:100$	1.10	995 м/с

Задача №2

№	Ответ	№	Ответ
2.1	6, $\Delta E = 0,377$ эВ	2.6	3, $\Delta E = 0,377$ эВ
2.2	4, $\Delta E = - 0,377$ эВ	2.7	3, $\Delta E = - 0,377$ эВ
2.3	6, $\Delta E = 1,131$ эВ	2.8	3, $\Delta E = - 0,377$ эВ
2.4	6, $\Delta E = - 0,377$ эВ	2.9	3, $\Delta E = - 1,131$ эВ
2.5	3, $\Delta E = - 1,131$ эВ	2.10	3, $\Delta E = - 0,377$ эВ

Задача №3

№	Ответ	№	Ответ
3.1	12 эВ	3.6	83,4
3.2	0,5 нм	3.7	0,2; 0,06
3.3	2,6	3.8	43
3.4	0,8 эВ	3.9	Ум. в 9,85 раза
3.5	140 пм	3.10	0,14

Задача №4

№	Ответ	№	Ответ
4.1	1s; 12,1 эВ	4.6	3d; 0,66 эВ
4.2	3d; 0,66 эВ	4.7	4p; 0,66 эВ
4.3	2p; 2,85 эВ	4.8	1s; 13,0 эВ
4.4	5f или 5d; 0,31 эВ	4.9	5s или 5d; 0,31 эВ
4.5	3s или 3d; 0,66 эВ	4.10	4d; 0,31 эВ

Задача №5

№	Ответ	№	Ответ
5.1	32000 К	5.6	$7,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$
5.2	31,4 кДж	5.7	2,8 эВ
5.3	1	5.8	1400 км/с
5.4	5,2	5.9	$7,2 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
5.5	3	5.10	2,1 эВ

Задача №6

№	Ответ	№	Ответ
6.1	0,34 эВ	6.6	1,1 эВ
6.2	0,625 эВ	6.7	972 К
6.3	0,76 эВ	6.8	738 К
6.4	0,4 эВ	6.9	0,72 эВ
6.5	292 К	6.10	545 К

Задача №7

№	Ответ	№	Ответ
7.1	$d_{100} = 1,87 \text{ мм}$	7.6	$i \approx 233 \text{ А}$
7.2	$H_k(0) = 63,9 \text{ кА/м}$	7.7	$T < 5,1 \text{ К}$
7.3	$T_k = 5,3 \text{ К}$	7.8	$i = 75,4 \text{ А}$
7.4	$H_k = 8,2 \text{ кА/м}$	7.9	$H_k = 53 \text{ кА/м}$
7.5	$i \approx 200 \text{ А}$	7.10	$T = 4,5 \text{ К}$

Задача №8

№	Ответ	№	Ответ
8.1	20.819 МэВ	8.6	16.786 МэВ
8.2	-10.47 МэВ	8.7	23.725 МэВ
8.3	2.264 МэВ	8.8	1.202 МэВ
8.4	1.938 МэВ	8.9	4.304 МэВ
8.5	8.533 МэВ	8.10	0.158 МэВ

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Название	Обозначение и величина
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Коэффициент пропорциональности в законе Кулона	$k = 9 \cdot 10^9$ Н·м ² /Кл ²
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрон-вольт	1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

2. ПЛОТНОСТЬ ρ И МОЛЯРНАЯ МАССА M НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ, У КОТОРЫХ НА КАЖДЫЙ АТОМ ПРИХОДИТСЯ В СРЕДНЕМ ПО ОДНОМУ СВОБОДНОМУ ЭЛЕКТРОНУ

Металл	Литий	Калий	Рубидий	Цезий	Медь	Серебро	Золото
ρ , кг/м ³	530	870	1530	1870	8900	10500	19300
M , кг/моль	0,0069	0,0391	0,0855	0,1329	0,0635	0,1079	0,1970

3. МАССЫ НЕКОТОРЫХ НУКЛИДОВ

Z	Нуклид	Масса, а.е.м.	Z	Нуклид	Масса, а.е.м.
0	n	1,00867	6	¹² C	12,00000
1	¹ H	1,00783	6	¹³ C	13,00335
1	² H	2,01410	6	¹⁴ C	14,00324
1	³ H	3,01605	7	¹⁴ N	14,00307
2	³ He	3,01603	8	¹⁶ O	15,99491
2	⁴ He	4,00260	8	¹⁷ O	16,99913
3	⁶ Li	6,01513	8	¹⁸ O	17,99916
3	⁷ Li	7,01601	9	¹⁸ F	18,00095
4	⁸ Be	8,00531	9	¹⁹ F	18,99840
5	¹⁰ B	10,01294	9	²⁰ F	19,99998
5	¹¹ B	11,00931	10	²⁰ Ne	19,99244