Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Физика

Квантовая оптика. Элементы квантовой механики.

Физика атома и атомного ядра

Методические указания и задания к контрольной работе № 4

по трех- и четырехсеместровому курсам физики

для студентов заочной формы обучения технических специальностей

Екатеринбург

УрФУ

2010

УДК 530(075.8)

Составитель Г. В. Сакун

Научный редактор проф., д-р физ.-мат. наук А. В. Мелких

Физика. Квантовая оптика. Элементы квантовой механики. Физика атома и атомного ядра: метод. указания и задания к контрольной работе № 4 / сост. Г. В. Сакун. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 62 с.

Приведены методические указания к решению задач, примеры решения типичных задач, задачи и таблица вариантов контрольной работы № 4.

Предназначены студентам заочной формы обучения технических специальностей.

Задания составлены в соответствии с действующей рабочей программой по физике (трех- и четырехсеместровый курс), могут быть использованы также в качестве домашних заданий для студентов очной формы обучения.

Библиогр.: 9 назв., 2 прил.

Подготовлено кафедрой физики.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящих методических указаний является оказание помощи студентам-заочникам инженерно-технических специальностей высших учебных заведений в изучении курса физики.

Учебный материал программы курса разделен на четыре раздела. Каждому разделу соответствует определенная контрольная работа.

По каждой теме заданий контрольной работы приведены основные формулы и законы, необходимые для решения задач, а также подробные решения типичных задач и примеры их оформления.

Даны таблицы вариантов и тексты задач контрольных работ.

Кроме того, здесь же приведены общие методические указания, которые необходимо учитывать при выполнении и оформлении контрольных заданий.

Обязательно внимательно прочитайте указания, приведенные ниже, и учтите все рекомендации по оформлению и срокам выполнения работ!

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Основной формой обучения студента-заочника является самостоятельная работа над учебным материалом. Для облегчения этой работы в периоды экзаменационных сессий читаются лекции и проводятся лабораторные работы. Процесс изучения физики состоит из следующих этапов:

I. Самостоятельная работа над учебниками и учебными пособиями [1 – 10]. О правилах самостоятельной работы студентов над учебными пособиями подробно говорится на установочных лекциях, которые обычно читаются в УрФУ перед началом изучения каждой части курса физики; время проведения этих лекций сообщается студентам-заочникам деканатом заочного факультета.

II. Выполнение контрольных работ.

III. Прохождение лабораторного практикума.

IV. Сдача зачетов и экзаменов.

Самостоятельная работа

При самостоятельной работе над учебным материалом необходимо:

1. Изучать курс физики систематически в течение всего семестра. Ознакомление с материалом курса только лишь перед экзаменом не позволит получить глубокие и прочные знания.

2. В качестве основного учебного пособия использовать один из рекомендованных учебников. В конце методических указаний приведен список литературы для самостоятельной работы над материалом курса.

3. Составлять конспект при работе над учебным материалом, в котором записывать законы и формулы, выражающие эти законы, определения основных физических величин и сущность физических явлений и методов исследования.

4. Решить контрольные работы, которые призваны закрепить теоретический материал и позволить более глубоко разобраться в материале при решении конкретных задач.

5. Прослушать курс обзорных лекций по физике для студентов-заочников, организуемый в начале каждой сессии. Пользоваться очными консультациями преподавателей.

Выполнение контрольных работ

При выполнении контрольных работ студенту необходимо руководствоваться следующим:

1. Номер варианта контрольной работы определяется последней цифрой номера зачетной книжки студента. Номера задач каждого варианта определяются таблицей вариантов, приведенной в указаниях на с. 45.

2. Контрольные работы выполняются в обычной школьной тетради, на обложке которой приводятся сведения по следующему образцу:

Студент заочного факультета УрФУ

специальность

Андреев И. В.

Шифр   253720

Адрес: 620460, г. Верхняя Салда,

ул. Восточная, д. 16, кв. 54

Контрольная работа № 4 по физике

3. Условия задач в контрольной работе переписываются полностью без сокращений. На страницах тетради оставляются поля для замечаний преподавателя. После каждой решенной задачи необходимо оставлять место для замечаний преподавателя и для ответа на эти замечания. Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы.

4. В конце контрольной работы указывается, каким основным учебником или учебным пособием пользовался студент при изучении курса физики (название, автор, год издания).

5. На рецензию следует высылать одновременно не более одной работы во избежание одних и тех же ошибок. Очередную работу нужно высылать только после получения рецензии на предыдущую работу.

6. Если контрольная работа при первой проверке не зачтена, то студент обязан представить ее исправленный вариант на повторную проверку **не позднее чем за две недели до начала сессии**, включив те задачи, решение которых оказалось неверным. Зачтенные задачи заново переписывать не надо. Если работа для повторной проверки переписана заново, то ее надо представлять вместе с уже проверенной работой.

7. Защита выполненных, но незачтенных работ производится во время экзаменационной сессии в форме собеседования с преподавателем (дни и часы защиты работ указываются в расписании).

8. В том случае, когда работа зачтена, студенту отсылается только обложка работы с отметкой преподавателя и его подписью.

Обложка зачтенной контрольной работы предъявляется экзаменатору перед началом экзамена.

Указания к решению и оформлению задач

1. Записать условие задачи полностью.

2. Выписать численные данные и перевести их в Международную систему измерения физических величин (СИ).

3. Выполнить чертеж или рисунок, поясняющий содержание задачи, показав на нем соответствующие обозначения физических величин, используемых при решении именно этой задачи.

4. Проанализировать условия задачи и указать основные законы, которые нужно применить для решения, указать, почему их можно применить, и записать их аналитическую форму. Пояснить буквенные обозначения физических величин, входящих в эти формулы. Если величины векторные, то на рисунке показать их направления и пояснить, как определяются эти направления.

Если при решении задач применяется частная формула, не выражающая какой-нибудь закон или не являющаяся определением какой-либо физической величины, то ее следует вывести самостоятельно.

5. Необходимо сопровождать весь ход решения задачи краткими, но исчерпывающими пояснениями. Результатом анализа и решения задачи является составление системы уравнений, которая включает в себя все искомые величины.

6. Получить решение задачи в аналитическом виде, т. е. выразить искомые величины через заданные величины в буквенном виде и стандартные физические постоянные.

7. Подставить в полученную формулу численные значения всех величин, выраженных в системе СИ. Произвести вычисления и получить искомый результат. Записать ответ, указав единицы измерения искомой величины. Проанализировать полученный результат.

Для того чтобы разобраться в предложенных задачах и выполнить контрольную работу правильно, следует после изучения теории очередного раздела учебника внимательно разобрать помещенные в настоящих указаниях примеры решения типовых задач, близких по уровню сложности к задачам контрольной работы.

Выполнение лабораторных работ

Лабораторные работы выполняются студентами-заочниками в лабораториях кафедры физики УрФУ в периоды экзаменационных сессий, часы и даты этих занятий указываются в сессионном расписании.

Сдача зачетов и экзаменов

После выполнения всех видов работ, предусмотренных учебным планом, студенты сдают экзамен или зачет. Расписание контрольных мероприятий составляется деканатом заочного факультета.

На экзамен или зачет студент должен явиться, имея при себе зачетную книжку, в которой должна быть запись преподавателя о том, что лабораторные работы студент выполнил. Кроме этого, на руках у него должна быть корочка зачтенной контрольной работы (одной или двух согласно учебному плану).

Расписание пересдач в межсессионный период вывешивается около деканата заочного факультета и на доске объявлений на кафедре физики.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №4

Основные формулы для решения задач

Для освоения по теме «Квантовая оптика. Элементы квантовой механики. Физика атома и атомного ядра» материала и решения задач необходимо ознакомиться со следующими понятиями и законами.

Фотоны

Фотоны – это кванты (порции) электромагнитного излучения, обладающие как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Энергия W фотона определяется соотношением

$$W_ф = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda},$$

где $h = 6{,}62\cdot10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; постоянная $\hbar$ связана с постоянной Планка соотношением $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$; $\nu\,[\text{Гц}]$ – частота колебаний (число колебаний в единицу времени); ω – циклическая частота (число колебаний за время, равное 2π секунд), $\omega = 2\pi\nu$; $c = 3\cdot10^8$ м/с – скорость распространения света в вакууме; λ – длина волны электромагнитного излучения.

Массу фотона можно определить из соотношения Эйнштейна, связывающего массу и энергию: $W = mc^2$.

Отсюда
$$m_ф = \frac{W_ф}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}.$$

Следует отметить, что фотон – частица, масса покоя m_0 которого равна нулю.

Фотон обладает импульсом, модуль которого находится из известного соотношения. Для фотона $m_0 = 0$, следовательно,

$$p_ф = mc = \frac{W_ф}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Направление импульса фотона совпадает с направлением распространения электромагнитной волны.

Тепловое излучение

Количественной характеристикой теплового излучения является энергетическая светимость (интегральная излучательная способность) R_T – это энергия, излучаемая единицей поверхности тела за единицу времени по всем направлениям во всем диапазоне длин волн:

$$R_T = \frac{dW}{dtds}.$$

Спектр теплового излучения сплошной, т.е. тело испускает электромагнитные волны с длиной волны λ в пределах от 0 до ∞. При этом на разные участки спектра приходится разная энергия излучения. Если вблизи длины волны λ выбрать интервал $d\lambda$, то излучаемая энергия dR в виде электромагнитных волн, лежащих в этом интервале, пропорциональна $d\lambda$:

$$dR=r_{\lambda,T}d\lambda,$$

где $r_{\lambda,T}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от λ и от T, называется спектральной плотностью энергетической совместимости, показывает, какая энергия излучается единицей поверхности тела в единицу времени в единичном интервале длин волн вблизи данного значения λ:

$$r_{\lambda,T}=\frac{dR}{d\lambda}.$$

Энергетическая светимость R_T связана со спектральной плотностью энергетической светимости абсолютно черного тела $r_{\lambda,т}$ соотношением

$$R = \int_0^\infty r_{\lambda,T}\ d\lambda.$$

Спектральной характеристикой поглощения электромагнитных волн телом служит спектральный коэффициент поглощения:

$$a_{\lambda,T} = \frac{dW_{погл}}{dW}.$$

Он показывает, какая доля энергии dW электромагнитного излучения с длинами волн от λ до $\lambda+d\lambda$, падающей на данную площадь поверхности тела, поглощается телом. Эта величина безразмерная, зависит как от длины волны падающего излучения, так и от температуры тела.

Абсолютно черное тело (АЧТ) – это тело, полностью поглощающее падающее на него излучение всех длин волн, $a \equiv 1$.

Тела, для которых a = const<1, называются серыми. Если $a \equiv 0$, то такое тело принято называть зеркальным.

Экспериментальные законы абсолютно черного тела:

1. *Закон Стефана-Больцмана.* Энергетическая светимость R_T абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$R = \sigma T^4,$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, ее экспериментальное значение равно

$$\sigma = 5{,}7\cdot10^{-8}\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}^4).$$

2. *Закон смещения Вина (первый закон Вина).* Длина волны λ_m, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

где b – постоянная Вина. Ее экспериментальное значение

$$b = 2{,}9\cdot10^{-3}\ \text{м}\cdot\text{К}.$$

3. *Второй закон Вина.* Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела $(r_{\lambda,T})_{\max}$ пропорционально пятой степени абсолютной температуры тела:

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = c'T^5,$$

где $c' = 1{,}29\cdot10^{-5}\ \text{Вт}/(\text{м}^3\cdot\text{К}^5)$. – постоянная второго закона Вина.

Внешний фотоэлектрический эффект

Внешний фотоэлектрический эффект – явление выбивания электронов с поверхности металлов под действием падающего излучения.

Формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$W_{ф} = A_{вых} + W_{k\max},$$

где $A_{вых}$ – работа выхода электрона из металла; $W_{k\max}$ – максимальная энергия вырванных электронов (их также называют фотоэлектроны).

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона в нерелятивистском случае (υ<<c) выражается формулой

$$W_{k\max} = \frac{1}{2} m_0 \upsilon^2,$$

где m_0 – масса покоя электрона.

Красная граница фотоэффекта – максимальная длина волны (или минимальная частота), при которой фотоэффект еще наблюдается.

$$\lambda = \frac{h_c}{A} \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar c}{A}; \qquad \nu_0 = \frac{A}{h},$$

где λ_0 – максимальная длина волны излучений (ν_0 – минимальная частота), при которых еще возможен фотоэффект; c – скорость света в вакууме.

Для прекращения фототока к электродам фотоэлемента необходимо приложить задерживающее напряжение $U_з$. Максимальная начальная скорость $\upsilon_{\max}$ фотоэлектронов связана с U_3 соотношением

$$eU_з = \frac{1}{2} m_0 \upsilon^2_{\max},$$

где e и m_0 – заряд и масса фотоэлектрона соответственно.

Эффект Комптона

Изменение длины волны $\Delta\lambda$ фотона при рассеянии его на свободном электроне на угол θ

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta), \quad \text{или} \quad \Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = 2\frac{h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2},$$

где h – постоянная Планка; m_0 – масса покоя электрона отдачи; c – скорость света в вакууме; λ и λ' – длины волн падающего и рассеянного фотонов. Разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0$ зависит только от угла θ, образуемого направлением рассеянного излучения с направлением первичного пучка. От длины волны λ_0 и от природы рассеивающего вещества $\Delta\lambda$ не зависит.

Отношение $\lambda_C = \dfrac{h}{m_0 c}$ называется комптоновской длиной волны. При рассеянии фотона на свободном электроне $\lambda_C = 2{,}426 \cdot 10^{-12}$ м.

Волновые свойства микрочастиц

Волны де Бройля

Формула де Бройля, выражающая связь длины волны с импульсом движущейся частицы:

$$\lambda = \frac{h}{p}\ .$$

Так как импульс p в классическом приближении ($\upsilon \ll c$) выражается формулой $p = m_0\upsilon$, то

$$\lambda = \frac{h}{m_0\upsilon},$$

где m_0 – масса покоя частицы; υ – ее скорость.

Длина волны де Бройля связана с кинетической энергией микрочастицы соотношением

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0W_к}}\ .$$

Соотношение неопределенностей

а) для координаты и импульса частицы:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar\,,$$

где Δp_x – неопределенность проекции импульса частицы на ось X; Δx – неопределенность ее координаты;

б) для энергии и времени:

$$\Delta W \Delta t \geq \hbar,$$

где ΔW – неопределенность энергии данного квантового состояния; Δt – время пребывания системы в этом состоянии.

Простейшие случаи движения микрочастиц

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний

$$\frac{d^2\psi}{d^2x} + \frac{2m}{\hbar^2}(W - U) = 0,$$

где W – полная энергия частицы; $U = U(x)$ – потенциальная энергия частицы; $\psi(x)$ – координатная (или амплитудная) часть волновой функции, описывающая состояние частицы; m – масса частицы.

Вероятность dP обнаружить частицу в интервале от x до $x+dx$ (в одномерном случае для стационарных состояний) выражается формулой

$$dP = |\psi(x)|^2 dx,$$

где $|\psi(x)|^2$ – плотность вероятности (отношение вероятности того, что частица может быть обнаружена вблизи точки с координатой x в интервале от x до $(x + dx)$, к величине этого интервала dx):

$$|\psi(x)|^2 = \frac{dP}{dx}.$$

Вероятность P обнаружить частицу в интервале от x_1 до x_2 находится интегрированием dP в указанных пределах:

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

Для частицы, находящейся в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме, волновая функция имеет вид

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \cdot \sin\frac{\pi n}{l}x,$$

где l – ширина потенциальной ямы; n – энергетический уровень частицы (n = 1, 2, 3 ...).

Собственное значение энергии W_n частицы, находящейся на энергетическом уровне с номером n в бесконечно глубокой потенциальной яме, определяется формулой

$$W_n = \frac{\pi^2\hbar^2}{2ml^2}n^2,$$

где l – ширина потенциальной ямы.

Атом водорода по теории Бора

1. *Первый постулат Бора.* Атомы могут длительно пребывать только в таких состояниях, находясь в которых они не излучают энергии. Этим стационарным состояниям соответствуют определенные энергии $W_1, W_2, \ldots W_n$ атома.
2. *Второй постулат Бора.* При переходе из одного стационарного состояния в другое атом испускает или поглощает один квант энергии. Энергия излучаемого или поглощаемого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = W_m - W_n.$$

Стационарным состояниям атома соответствуют вполне определенные орбиты, по которым движутся электроны. Момент импульса (количества движения) L электрона для стационарных орбит кратен $h/2\pi$:

$$L = m\upsilon r = n\frac{h}{2\pi},$$

где r – радиус орбиты; υ – скорость электрона на этой орбите; n – целое число, называемое главным квантовым числом (n = 1,2,3,…); h – постоянная Планка.

Радиусы стационарных орбит r_n:

$$r_n = r_1 n^2,$$

где r_1 – радиус первой орбиты для атома водорода, называемый первым боровским радиусом, $r_1 = 0{,}529\cdot10^{-10}$ м.

Энергия электрона, находящегося на n-й орбите:

$$W_n = -\frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} = -\frac{13{,}6}{n^2} \text{ эВ.}$$

Минимальная энергия, необходимая для удаления из атома электрона, находящегося в основном состоянии, называется энергией ионизации:

$$W_{\text{иониз}} = W_\infty - W_1 = 13{,}6 \text{ эВ.}$$

Длина волны λ света, излучаемого атомом водорода при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую, может быть определена из сериальной формулы

$$\frac{1}{\lambda} = R'\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right),$$

где R' – постоянная Ридберга, $R' = 1{,}097 \cdot 10^7$ м; n_1 и n_2 – квантовые числа, определяющие номера орбит электрона.

Энергия кванта света, излучаемого атомом водорода при переходе с одной орбиты на другую,

$$W = W_i\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right),$$

где W_i – энергия ионизации атома водорода:

$$W_i = 13{,}6 \text{ эВ.}$$

Рентгеновские лучи

Коротковолновая граница $\lambda_{\min}$ сплошного рентгеновского спектра определяется формулой

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{|e|U},$$

где $|e|$ – заряд электрона; U – разность потенциалов, приложенная к рентгеновской трубке.

Закон Мозли: длина волны характеристического рентгеновского излучения может быть определена по формуле

$$\frac{1}{\lambda}=R'\left(Z-\sigma\right)^2\left(\frac{1}{n_1^2}-\frac{1}{n_2^2}\right),$$

где Z – порядковый номер элемента (заряд ядра в единицах элементарного заряда); σ – постоянная экранирования.

Постоянная экранирования σ для α-линии К-серии характеристического рентгеновского излучения принимается равной единице, а n_1 и n_2 – соответственно единице и двум. Формула Мозли в этом случае имеет вид

$$\frac{1}{\lambda_{\text{K}_\alpha}}=\frac{3}{4}R'(Z-1)^2.$$

Энергия фотона, соответствующего α-линии К-серии характеристического излучения, выражается формулой

$$W_{K_\alpha}=\frac{3}{4}W_i\left(Z-1\right)^2,$$

где W_i – энергия ионизации атома водорода.

Атом водорода в квантовой механике

В атоме водорода (или водородоподобном ионе) потенциальная энергия электрона $U(r)$ имеет вид

$$U(r)=-\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r},$$

где Z – зарядовое число; e – элементарный заряд; ε_0 – электрическая постоянная.

Собственное значение энергии E_n электрона в атоме водорода

$$W_n=-\frac{Z^2e^4m}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2n^2},$$

где $\hbar$ – постоянная Планка; n – главное квантовое число (n = 1,2,3,…).

Собственная Ψ-функция, описывающая состояние электрона в атоме водорода, определяется тремя параметрами: n – главное квантовое число, l – орбитальное квантовое число и m – магнитное квантовое число. В общем случае собственную Ψ-функцию принято записывать в виде

$\Psi_{n,l,m}(r, \upsilon, \varphi)$.

Момент импульса L и магнитный момент $p_м$, обусловленные орбитальным движением электрона:

$$L = \hbar\sqrt{l(l+1)} \ ,$$

$$p_m = \mu_Б\sqrt{l(l+1)} \ ,$$

где l – орбитальное квантовое число (l = 0,1,2,3,…,(n–1)); $\mu_Б$ – магнетон Бора ($\mu_Б = \dfrac{e\hbar}{2m}$=0,927·10^{-23} Дж/Тл).

Проекция орбитального момента импульса L_z и орбитального магнитного момента $p_{мz}$ на направление внешнего магнитного поля:

$$L_z = \hbar m,$$

$$p_{mz} = \mu_Б m,$$

где m – магнитное квантовое число (m = 0, ± 1,± 2,± 3,…,$\pm l$).

Гиромагнитное отношение для орбитальных магнитного и механического моментов

$$\frac{p_м}{L} = \frac{\mu_Б}{\hbar} = \frac{1}{2}\cdot\frac{e}{m}.$$

Момент импульса L_S и магнитный момент p_{ms}, обусловленные спином электрона:

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+\frac{1}{2})} = \hbar\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$p_{ms} = 2\mu_Б\sqrt{s(s+\frac{1}{2})} = \mu_Б\sqrt{3} \ ,$$

где s – спиновое квантовое число (s =1/2).

Проекция спиновых момента импульса L_{Sz} и магнитного момента p_{sz} на направление внешнего магнитного поля следующая:

$$L_{sz} = \hbar m_s = \pm\frac{1}{2}\hbar \ ,$$

$$p_{msz} = 2\mu_Б m_s = \pm\mu_Б,$$

где m_s – спиновое магнитное квантовое число, которое может принимать только два значения , $m_s = \pm \frac{1}{2}$, поэтому проекции L_{sz} и p_{msz} также могут принимать только два значения.

Полупроводники

Удельная проводимость собственных полупроводников

$$\sigma = en(b_n + b_p),$$

где e – элементарный заряд; n – концентрация носителей тока (электронов и дырок); b_n и b_p – подвижность электронов и дырок.

Собственная проводимость (электропроводность) σ полупроводников зависит от температуры T по закону

$$\sigma = \sigma_0 \, e^{-\Delta W/2kT},$$

где σ_0 – константа, слабо меняющаяся с температурой; ΔW – ширина запрещенной зоны (ее иногда называют энергией активации свободных носителей заряда – минимальная энергия, необходимая для образования пары электрон-дырка); k – постоянная Больцмана.

Электропроводность полупроводника обратно пропорциональна удельному сопротивлению ρ полупроводника:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Температурный коэффициент сопротивления полупроводников

$$\alpha = \frac{d\rho}{\rho dT}; \qquad \alpha = \frac{-\Delta W}{2kT^2},$$

где ρ – удельное сопротивление полупроводника.

Напряжение на гранях прямоугольного образца при эффекте Холла (холловская разность потенциалов) следующее:

$$U_H = R_H B j a,$$

где R_H – постоянная Холла; B – индукция магнитного поля; j – плотность тока; a – ширина пластины (образца).

Постоянная Холла для полупроводников типа алмаз, германий, кремний и других, обладающих носителями тока одного вида (n или p):

$$R_{\text{Н}} = \frac{3\pi}{8}\frac{1}{en},$$

где n – концентрация носителей тока.

Физика атомного ядра

Строение атомных ядер

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом: ${}^{A}_{Z}X$, где X – символ химического элемента; Z – зарядовое число (атомный номер, число протонов в ядре); A – массовое число (число нуклонов в ядре),

$$A = Z + N,$$

где Z – зарядовое число (число протонов); N – число нейтронов.

Радиус ядра определяется соотношением

$$r = r_0 A^{1/3},$$

где r_0 – коэффициент пропорциональности, который можно считать для всех ядер постоянным и равным $1{,}4\cdot 10^{-15}$ м.

Дефект массы ядра

$$\Delta m = \left[Zm_p + \left(A - Z\right)m_n\right] - m_я = \left[Zm_H + \left(A - Z\right)m_n\right] - m,$$

где m_{p}, m_n, m – соответственно массы протона, нейтрона и ядра; Z – зарядовое число ядра; A – массовое число; $m_{\text{H}} = m_{\text{p}} + m_{\text{e}}$ – масса атома водорода (${}^{1}_{1}\text{H}$); m – масса атома.

Энергия связи нуклонов в ядре

$$W_{\text{св}} = \Delta mc^2 = \left[Zm_p + \left(A - Z\right)m_n - m_я\right] c^2 = \left[Zm_H + \left(A - Z\right)m_n - m\right]c^2.$$

Во внесистемных единицах энергия связи ядра

$$W_{\text{св}} = 931{,}4\cdot\Delta m,$$

где Δm – дефект массы в атомных единицах массы (а.е.м.); 931,4 МэВ/а.е.м. – коэффициент пропорциональности. В этом случае энергия связи будет определена в мегаэлектрон-вольтах.

Удельная энергия связи (энергия связи, отнесенная к одному нуклону)

$$W_{св}^{уд} = W_{св} / A .$$

Радиоактивность

Основной закон радиоактивного распада

$$N = N_0\, e^{-\lambda t},$$

где N – число ядер, не распавшихся к моменту времени t; N_0 – число ядер в начальный момент времени (t = 0); λ – постоянная радиоактивного распада.

Период полураспада $T_{1/2}$ – промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в два раза. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}.$$

Число ядер, распавшихся за время t:

$$\Delta N = N - N_0 = N_0\,(1 - e^{-\lambda t}).$$

В случае, если промежуток времени Δt, за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, то число распавшихся ядер можно определить по формуле

$$\Delta N = \lambda N_0 \Delta t.$$

Среднее время жизни τ радиоактивного ядра, т.е. промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшится в e раз:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Число N атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A,$$

где m – масса изотопа; μ – его молярная масса; N_A – постоянная Авогадро.

Правила смещения:

- для α- распада $\ {}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{2}^{4}He + {}_{Z-2}^{A-4}Y$;
- для β^-- распада $\ {}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{-1}^{0}e + {}_{Z+1}^{A}Y$;

▪ для β^+- распада $\quad {}_Z^AX \to {}_{+1}^{0}e + {}_{Z-1}^{A}Y$.

Активность A радиоактивного изотопа есть величина, равная отношению числа dN ядер, распавшихся в изотопе, к промежутку времени dt, за который произошел распад. Активность определяется по формуле

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N,$$

или (после замены N по основному закону радиоактивного распада)

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где $A_0 = \lambda N_0$ – активность изотопа в начальный момент времени, t = 0. Единица измерения активности в системе СИ $[A] = \dfrac{\text{расп}}{\text{с}}$ = Бк (беккерель)

Удельная активность изотопа (активность изотопа на единицу массы вещества) :

$$a = A/m.$$

Ядерные реакции

Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2[(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

где m_1 и m_2 – массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы; (m_3+m_4) – сумма масс покоя ядер продуктов реакции; c – скорость света в вакууме.

При числовом подсчете энергии ядерной реакции массы ядер удобно заменить массами нейтральных атомов, выраженными в атомных единицах массы (а.е.м.), а энергию ядерной реакции вычислять во внесистемных единицах (МэВ). При этом коэффициент пропорциональности в формуле c^2 = 931,4 МэВ/а.е.м., где c – скорость света в вакууме.

Примеры решения задач

П р и м е р 1

Температура T абсолютно черного тела изменилась при нагревании от T_1 = 1000 К до T_2 = 3000 К. Во сколько раз увеличилась при этом его энергетическая светимость R_T? Насколько изменилась длина волны λ, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости? Во сколько раз увеличилась его максимальная спектральная плотность энергетической светимости $(r_{\lambda,T})_{\max}$?

Дано: T_1 = 1000 К, T_2 = 3000 К.

Определить: 1) $\dfrac{R_{T2}}{R_{T1}} = ?$ 2) $\Delta\lambda = \lambda_{m1} - \lambda_{m2} = ?$ 3) $\dfrac{(r_{\lambda,T})_{\max 2}}{(r_{\lambda,T})_{\max 1}} = ?$

Решение:

1. Изменение энергетической светимости тела определим, используя закон Стефана – Больцмана:

$$\frac{R_{T2}}{R_{T1}} = \frac{\sigma T_2^4}{\sigma T_1^4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4.$$

2. Используя закон смещения Вина (первый закон Вина), можно определить длину волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости при температурах T_1 и T_2:

$$\lambda_{m1} = \frac{b}{T_1}, \quad \lambda_{m2} = \frac{b}{T_2},$$

тогда

$$\Delta\lambda = \lambda_{m1} - \lambda_{m2} = \frac{b}{T_1} - \frac{b}{T_2}.$$

3. Изменение максимальной спектральной плотности энергетической светимости можно найти, используя второй закон Вина:

$$\frac{(r_{\lambda,T})_{\max 2}}{(r_{\lambda,T})_{\max 1}} = \frac{c' T_2^5}{c' T_1^5} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^5.$$

Произведем вычисления:

$$\frac{R_{T2}}{R_{T1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = \left(\frac{3000}{1000}\right)^4 = 3^4 = 81.$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{m1} - \lambda_{m2} = \frac{b}{T_1} - \frac{b}{T_2} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{1000} - \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{3000} = 1{,}9 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

$$\frac{\left(r_{\lambda,T}\right)_{\max 2}}{\left(r_{\lambda,T}\right)_{\max 1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^5 = \left(\frac{3000}{1000}\right)^5 = 3^5 = 243.$$

Ответ: $\frac{R_{T2}}{R_{T1}} = 81$, $\Delta\lambda = \lambda_{m1} - \lambda_{m2} = 1{,}9 \cdot 10^{-6}$ м, $\frac{\left(r_{\lambda,T}\right)_{\max 2}}{\left(r_{\lambda,T}\right)_{\max 1}} = 243$.

П р и м е р 2

Принимая Солнце за черное тело, определить, насколько уменьшится масса Солнца за год вследствие излучения. Температура поверхности Солнца T = 5800 К. Излучение Солнца считать постоянным Радиус Солнца $R = 6{,}95 \cdot 10^8$ м.

Дано: Δt = 1 год, T = 5800 К, $R = 6{,}95 \cdot 10^8$ м.

Определить: Δm = ?

Решение:

По условию излучение Солнца является постоянным, тогда, используя определение энергетической светимости тела, можно определить энергию, излучаемую Солнцем за время Δt с площади поверхности S:

$$R_T = \frac{W}{S\Delta t}, \quad W = R_T S\Delta t,$$

где S – площадь поверхности Солнца, $S = 4\pi R^2$; R_T определим из закона Стефана-Больцмана, $R_T = \sigma T^4$, тогда

$$W = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2 \Delta t.$$

Для того чтобы определить массу, теряемую Солнцем вследствие излучения, воспользуемся формулой Эйнштейна для взаимосвязи массы и энергии:

$$W = \Delta m c^2,$$

где c – скорость света в вакууме, $c = 3\cdot 10^8$ м/с,

отсюда $\quad \Delta m = \dfrac{W}{c^2} = \dfrac{\sigma T^4 \cdot 4\pi R^2 \Delta t}{c^2}$.

Произведем вычисления:

$$\Delta m = \frac{5{,}67\cdot 10^{-8}\cdot 5800^4\cdot 4\cdot 3{,}14\cdot \left(6{,}95\cdot 10^8\right)^2\cdot 365\cdot 24\cdot 3600}{\left(3\cdot 10^8\right)} = 1{,}36\cdot 10^{17} \text{ кг.}$$

Ответ: $\quad \Delta m = 1{,}36\cdot 10^{17}$ кг.

П р и м е р 3

На металлическую пластинку падает монохроматический свет с длиной волны λ = 0,413 мкм. Поток фотоэлектронов, вырываемых с поверхности металла, полностью задерживается, когда разность потенциалов тормозящего электрического поля достигает $|U|$ = 0,90 В. Вычислить работу выхода $A_{\text{вых}}$ и красную границу фотоэффекта λ_0.

Дано: λ = 0,413 мкм, $|U|$=0,90 В.

Определить: $A_{\text{вых}}$ = ? λ_0 = ?

Решение:

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта имеем

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{1}{2} m\upsilon^2_{\max}.$$

Максимальная начальная скорость $\upsilon_{\max}$ фотоэлектронов связана с задерживающим напряжением U соотношением

$$|e|\cdot|U| = \frac{1}{2} m\upsilon^2_{\max},$$

где e и m – заряд и масса фотоэлектрона соответственно. Следовательно,

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + |e|\cdot|U| .$$

Отсюда найдем работу выхода:

$$A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda} - |e| \cdot |U|.$$

Уравнение Эйнштейна для красной границы: $hc/\lambda_0 = A$. Следовательно,

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A}.$$

Подставляя числовые значения, произведем вычисления:

$$\text{А} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}}{0{,}43 \cdot 10^{-6}} - 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}9 = 3{,}38 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2{,}11 \text{ эВ};$$

$$\lambda_0 = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8}}{3{,}38 \cdot 10^{-19}} = 0{,}588 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Ответ: $A_{\text{вых}} = 3{,}38 \cdot 10^{-19}$ Дж = 2,11 эВ, $\lambda_0 = 0{,}588 \cdot 10^{-6}$ м = 588 нм.

П р и м е р 4

Фотон с энергией W = 0,75 МэВ рассеялся на свободном электроне под углом θ = 60°. Принимая, что кинетическая энергия и импульс электрона до соударения с фотоном были пренебрежимо малы, определить: 1) энергию W' рассеянного фотона; 2) кинетическую энергию $W_к$ электрона отдачи; 3) направление его движения.

Дано: W = 0,75 МэВ, $\theta = 60^0$, $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Определить: W' = ? $W_к$ = ? φ = ?

Решение:

Энергию рассеянного фотона найдем, воспользовавшись формулой Комптона:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta).$$

Выразив длину волн λ' и λ через энергии W и W' соответствующих фотонов, получим

$$\frac{hc}{W'} - \frac{hc}{W} = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta).$$

Разделим обе части этого равенства на hc: $\frac{1}{W'} - \frac{1}{W} = \frac{1-\cos\theta}{m_0c^2}$.

Отсюда, обозначив для краткости энергию покоя электрона m_0c^2 через W_0, найдем

$$W' = \frac{W}{(W/W_0)(1-\cos\theta)+1}. \quad (1)$$

Подставив числовые значения величин, получим

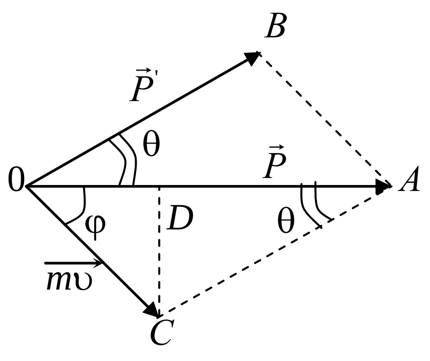
$$W' = \frac{0{,}75\cdot10^6\cdot1{,}6\cdot10^{-19}}{\left(\frac{0{,}75\cdot10^6\cdot1{,}6\cdot10^{-19}}{9{,}1\cdot10^{-31}\cdot9\cdot10^{16}}\right)(1-0{,}5)+1} = 0{,}69\cdot10^{-13}\text{Дж} = 0{,}43\ \text{МэВ}.$$

Кинетическая энергия электрона отдачи, как это следует из закона сохранения энергии, равна разности между энергией W падающего фотона и энергией W' рассеянного фотона:

$$W_к = W - W' = 0{,}32\ \text{МэВ}.$$

Направление движения электрона отдачи найдем, применив закон сохранения импульса, согласно которому импульс падающего фотона $\vec{P}$ равен векторной сумме импульсов рассеянного фотона $\vec{P}'$ и электрона отдачи $m\vec{\upsilon}$:

$$\vec{P} = \vec{P}' + m\vec{\upsilon}.$$



Векторная диаграмма импульсов изображена на рисунке. Все векторы проведены из точки 0, где находился электрон в момент соударения с фотоном. Угол φ определяет направление движения электрона отдачи.

Из треугольника OCD находим

$$\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{|CD|}{|OD|} = \frac{|CA|\sin\theta}{|OA|-|CA|\cos\theta}$$

или $\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{P'\sin\theta}{P-P'\cos\theta} = \frac{\sin\theta}{P/P'-\cos\theta}$.

Так как $P = W/c$ и $P' = W'/c$, то

$$\mathrm{tg}\ \varphi = \frac{\sin\theta}{W/W' - \cos\theta}. \qquad (2)$$

Преобразим формулу (2) так, чтобы угол φ выражался непосредственно через величины W и θ, заданные в условии задачи. Из формулы (1) следует

$$\frac{W}{W'} = \frac{W}{W_0}\left(1-\cos\theta\right)+1. \qquad (3)$$

Заменим в формуле (2) соотношение W/W' по формуле (3):

$$\mathrm{tg}\ \varphi = \frac{\sin\theta}{\left(1+W/W_0\right)\left(1-\cos\theta\right)}.$$

Учитывая, что sin θ = 2sin (θ/2)·cos (θ/2) и 1–cos θ = 2sin^2 (θ/2), после соответствующих преобразований получим

$$\mathrm{tg}\ \varphi = \frac{\mathrm{ctg}\ \left(\theta/2\right)}{1+W/W_0}. \qquad (4)$$

После подстановки числовых значений и вычисления по формуле (4) найдем

$$\mathrm{tg}\ \varphi = \frac{\mathrm{ctg}\ \pi/6}{1+\dfrac{0{,}75\cdot 10^{6}\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}}{9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot 9\cdot 10^{16}}} = 0{,}701,$$

откуда $\varphi=35^0$.

Ответ: $W' = 0{,}43$ МэВ, $W_к$ = 0,32 МэВ, $\varphi=35^0$.

П р и м е р 5

Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов U = 51 кВ. Найти длину волны де Бройля λ.

Дано: $e = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл, $m_0 = 9{,}1\cdot 10^{-31}$ кг, U = 51 В.

Определить: λ =?

Решение:

Длина волны де Бройля λ частицы зависит от ее импульса p и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{h}{p}, \tag{1}$$

где h – постоянная Планка.

Импульс частицы можно определить, если известна ее кинетическая энергия W. Связь импульса с кинетической энергией определяется соотношением

$$W_k = \frac{p^2}{2m_0}, \quad p = \sqrt{2m_0 W_k}, \tag{2}$$

где m_0 – масса покоя частицы.

Формула (1) с учетом соотношения (2) запишется в виде

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 W_k}}. \tag{3}$$

Как известно, кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U, равна

$$W_k = eU .$$

Подставим данное выражение кинетической энергии в формулу (3) и получим окончательное выражение

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eU}} .$$

Подставим численные значения:

$$\lambda = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}51 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}} = 1{,}72 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Ответ: $\lambda = 1{,}72 \cdot 10^{-10}$ м.

П р и м е р 6

Кинетическая энергия электрона в атоме составляет величину порядка W = 10 эВ. Используя соотношения неопределенностей, определить: 1) минимальные линейные размеры атома; 2) естественную ширину $\Delta\lambda$

спектральной линии излучения атома при переходе его из возбужденного состояния в основное. Среднее время τ жизни атома в возбужденном состоянии принять равным 10^{-8} с, а длину волны излучения равной $\lambda = 600$ нм.

Дано: $W = 10$ эВ, $\tau = 1\cdot10^{-8}$ с, $\lambda = 600$ нм.

Определить: $l_{\min} = ?$ $\Delta\lambda = ?$

Решение:

1. Неопределенность координат и импульса электрона связаны соотношением

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \tag{1}$$

где Δx – неопределенность координаты электрона; Δp_x – неопределенность его импульса. Из этого соотношения следует, что чем точнее определяется положение частицы в пространстве ($\Delta x \to 0$), тем более неопределенным становится ее импульс (т.е. $\Delta p_x \to \infty$), а следовательно, и энергия частицы. Пусть атом имеет линейные размеры l, тогда электрон атома будет находиться где-то в пределах области с неопределенностью $\Delta x = l/2$. Соотношение неопределенностей (1) можно записать в этом случае в виде $\frac{l}{2}\Delta p_x \geq \hbar$, откуда

$$l \geq \frac{2\hbar}{\Delta p_x}. \tag{2}$$

Физически разумная неопределенность импульса Δp_x не должна превышать значения самого импульса p, т.е. $\Delta p_x \leq p$. Импульс p связан с кинетической энергией W_k соотношением $p = \sqrt{2m_0W_k}$.

Заменим Δp_x значением $\sqrt{2m_0W_k}$ (такая замена не увеличит l). Переходя от неравенств (2) к равенству, получим

$$l_{\min} = \frac{2\hbar}{\sqrt{2m_0T}}.$$

Подставив числовые значения, найдем

$$l_{\min} = \frac{2\cdot1,054\cdot10^{-34}}{\sqrt{2\cdot9,1\cdot10^{-31}\cdot10\cdot1,6\cdot10^{-19}}} = 0,12\cdot10^{-9}\,\text{м}.$$

2. При переходе атомов из возбужденного состояния в основное существует некоторый разброс (или неопределенность) в энергии испускаемых фотонов. Это связано с тем, что энергия возбужденного состояния не является точно определенной, а имеет конечную ширину ΔW. Согласно соотношению неопределенностей энергии и времени, ширина ΔW энергетического уровня возбужденного состояния связана со средним временем жизни атомов в этом состоянии соотношением

$$\Delta W\tau = \hbar .$$

Вследствие конечной ширины уровня энергии возбужденного состояния энергия фотонов, испускаемых атомами, также имеет разброс, равный ширине энергетического уровня. Тогда

$$\Delta W = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{h}{2\pi\tau}. \qquad (3)$$

Поскольку энергия фотона W связана с длиной волны λ соотношением

$$W = \frac{hc}{\lambda}, \qquad (4)$$

то разбросу ΔW энергии соответствует разброс $\Delta\lambda$ длин волн. Для того чтобы найти $\Delta\lambda$, продифференцируем выражение (4) по λ и заменим бесконечно малые приращения соответствующих величин на конечные:

$$dW = -\frac{hc}{\lambda^2}d\lambda, \qquad \Delta W = \frac{hc}{\lambda^2}\Delta\lambda. \qquad (5)$$

Входящий в это выражение конечный интервал длин волн $\Delta\lambda$ и есть естественная ширина спектральной линии. Выразив $\Delta\lambda$ из формулы (5) и заменив ΔW согласно (3), получим

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c\tau 2\pi}.$$

Произведем вычисления:

$$\Delta\lambda = \frac{\left(600\cdot 10^{-9}\right)^2}{3\cdot 10^8\cdot 10^8\cdot 2\cdot 3{,}14} = 1{,}9\cdot 10^{-14}\ \text{м} .$$

Ответ: $\Delta\lambda = 1{,}9\cdot 10^{-14}$ м .

П р и м е р 7

Электрон находится в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l в возбужденном состоянии, $n = 2$. Построить график зависимости плотности вероятности $\left|\psi_2(x)\right|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0 < x < l$) плотность вероятности нахождения частицы максимальна, а в каких минимальна; 2) вероятность того, что электрон, находящийся в возбужденном состоянии ($n = 2$), будет обнаружен в средней трети ямы.

Дано: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, $n = 2$, $x_1 = \frac{l}{3}$, $x_2 = \frac{2l}{3}$.

Определить: x_{max} =? x_{min} =? P =?

Решение:

1. Для частицы, находящейся в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной яме, волновая функция имеет вид

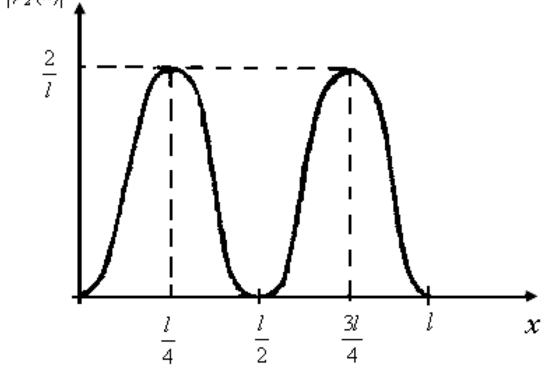
$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n}{l} x, \tag{1}$$

где l – ширина потенциальной ямы; n – энергетический уровень частицы (n = 1, 2, 3 ...). Возбужденному состоянию (по условию задачи $n = 2$) отвечает собственная функция

$$\psi_2(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \cdot \sin \frac{2\pi}{l} x, \tag{2}$$

а плотность вероятности $\left|\psi_2(x)\right|^2$ определяется выражением

$$\left|\psi_2(x)\right|^2 = \frac{2}{l} \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{l} x. \tag{3}$$



При построении графика зависимости плотности вероятности $\left|\psi_2(x)\right|^2$ от координаты x следует учесть, что плотность вероятности на краях потенциальной ямы будет равна нулю, а число пиков на зависимости $|\psi_2(x)|^2$ будет равно номеру квантового состояния *n*. По условию задачи $n = 2$, тогда график зависимости плотности вероятности $|\psi_2(x)|^2$ от координаты x имеет вид, как на рисунке.

Как видно из графика, плотность вероятности максимальна в точках с координатами $x_1 = l/4$ и $x_2 = 3l/4$. Минимальное значение плотности вероятности равно нулю и достигается в точке $x_3 = l/2$. По свойству непрерывности волновой функции плотность вероятности принимает нулевые значения и на границах ямы в точках с координатами $x = 0$ и $x = l$. Найденные значения координат максимумов и минимумов можно получить и аналитически.

Плотность вероятности $|\psi_2(x)|^2$ для рассматриваемого случая определяется выражением (2). Для удобства дальнейших преобразований введем обозначение

$$y = |\psi_2(x)|^2.$$

Тогда $y = \frac{2}{l}\sin^2\frac{2\pi}{l}x$. Проведем исследование этой функции на экстремумы. Возьмем первую производную *y* по *x*, приравняем полученное выражение к нулю и, решая полученное уравнение, найдем значения *x*, отвечающие экстремумам *y*:

$$y' = \frac{2}{l}2\sin\frac{2\pi}{l}x\cdot\cos\frac{2\pi}{l}x\left(\frac{2\pi}{l}\right) = \frac{4\pi}{l^2}\sin\frac{4\pi}{l}x = 0,$$

$$\sin\frac{4\pi}{l}x = 0, \quad \frac{4\pi}{l}x = k\pi, \quad x = k\frac{l}{4},$$

где $k = 0, 1, 2, 3\ldots$

Определим значения координаты x при различных значениях k:

k	0	1	2	3	4
x	0	$\frac{l}{4}$	$\frac{l}{2}$	$\frac{3l}{4}$	l

При $k > 4$ значения *x* превышают l ($x > l$), что противоречит физическому смыслу, так как в этом случае частица должна выходить за пределы потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками, что невозможно.

Для ответа на вопрос, максимум или минимум имеет функция при найденных значениях x, необходимо установить знак второй производной y'' при значениях x_1, x_2 и x_3.

$$y''=\frac{4\pi}{l^2}\cos\frac{4\pi}{l}x\left(\frac{4\pi}{l}\right)=\frac{16\pi^2}{l^3}\cos\frac{4\pi}{l}x:$$

1) $x_1=\dfrac{l}{4};\ y''=\dfrac{16\pi^2}{l^3}\cos\dfrac{4\pi}{l}\cdot\dfrac{l}{4}=\dfrac{16\pi^2}{l^3}\cos\pi=\dfrac{16\pi^2}{l^3}(-1)<0;$

2) $x_2=\dfrac{l}{2};\ y''=\dfrac{16\pi^2}{l^3}\cos\dfrac{4\pi}{l}\cdot\dfrac{l}{2}=\dfrac{16\pi^2}{l^3}\cos2\pi=\dfrac{16\pi^2}{l^3}(1)>0;$

3) $x_3=\dfrac{3l}{4};\ y''=\dfrac{16\pi^2}{l^3}\cos\dfrac{4\pi}{l}\cdot\dfrac{3l}{4}=\dfrac{16\pi^2}{l^3}\cos3\pi=\dfrac{16\pi^2}{l^3}(-1)<0.$

Следовательно, в точках $x_1=\dfrac{l}{4}$ и $x_3=\dfrac{3l}{4}$ плотность вероятности $|\psi_2(x)|^2$ будет максимальна, а в точке $x_2=\dfrac{l}{2}$, $|\psi_2(x)|^2$ – минимальна (см. рисунок).

2. Вероятность P обнаружить частицу в интервале $x_1 < x < x_2$ определяется следующим равенством:

$$P=\int_{x_1}^{x_2}|\psi_n(x)|^2dx, \tag{4}$$

$\psi_n(x)$ – нормированная собственная волновая функция, описывающая состояние электрона в потенциальном ящике – см. формулу (1).

Возбужденному состоянию (n = 2) отвечает собственная функция – см. формулу (3):

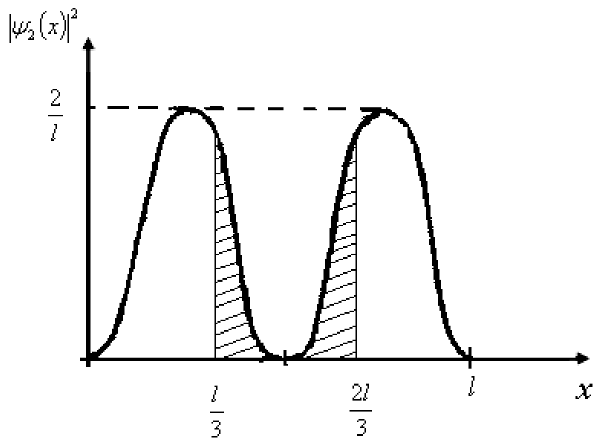
$$\psi_2(x)=\sqrt{\frac{2}{l}}\cdot\sin\frac{2\pi}{l}x.$$

Подставив $\psi_2(x)$ в подынтегральное выражение формулы (4) и вынося постоянные величины за знак интеграла, получим

$$P=\frac{2}{l}\cdot\int_{x_1}^{x_2}\sin^2\frac{2\pi}{l}xdx. \tag{5}$$

Графически вероятность обнаружить микрочастицу в интервале $x_1<x<x_2$ внутри потенциальной ямы определяется как площадь фигуры под графиком

зависимости плотности вероятности $\left|\psi_2(x)\right|^2$ от координаты x в указанном интервале. Согласно условию задачи $x_1 = l/3$ и $x_2 = 2\,l/3$ тогда вероятность обнаружения микрочастицы в указанном интервале равна площади заштрихованной фигуры (см. рисунок).



Подставим пределы интегрирования $x_1 = l/3$ и $x_2 = 2\,l/3$ в формулу (5), произведем замену

$\sin^2\left(\frac{2\pi}{l}x\right) = \frac{1}{2}(1-\cos\frac{4\pi}{l}x)$ и разобьем интеграл на два:

$$P = \frac{2}{l}\int\limits_{\frac{l}{3}}^{\frac{2l}{3}} \sin^2\frac{2\pi}{l}x\,dx = \frac{1}{l}\left\{\int\limits_{\frac{l}{3}}^{\frac{2l}{3}} dx - \int\limits_{\frac{l}{3}}^{\frac{2l}{3}} \cos\frac{4\pi}{l}x\,dx\right\} =$$

$$= \frac{1}{l}\left\{\frac{l}{3} - \frac{l}{4\pi}\sin\frac{4\pi}{l}x\Big|_{\frac{l}{3}}^{\frac{2l}{3}}\right\} = \frac{1}{3} - \frac{1}{4\pi}(\sin\frac{8\pi}{3} - \sin\frac{4\pi}{3}).$$

Заметив, что $\sin\frac{8\pi}{3} = \sin\frac{2\pi}{3}$, а $\sin\frac{4\pi}{3} = -\sin\frac{\pi}{3}$, получим $P = 0{,}195$.

Ответ: $x_1 = \frac{l}{4}$, $x_2 = \frac{l}{2}$, $x_3 = \frac{3l}{4}$, $P = 0{,}195$.

П р и м е р 8

Вычислить потенциал ионизации и первый потенциал возбуждения атома водорода.

Дано: $n_1 = 1$, $n_2 = \infty$, $n_3 = 2$, $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ Дж·с, $c = 3{,}0\cdot10^{8}$ м/с, $R = 1{,}10\cdot10^{7}$ м$^{-1}$, $E_i = 13{,}6$ эВ $= 13{,}6\cdot1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж.

Определить: $U_{\text{i}} = ?$ $U_1 = ?$

Решение:

Потенциалом ионизации U_{i} называют ту наименьшую разность потенциалов, которую должен пройти в ускоряющем поле электрон, чтобы при столкновении с данным невозбужденным атомом ионизировать его. Работа по удалению электрона из атома A_{i} равна работе сил электрического поля, ускоряющего электрон: $A' = |e|\,U_i$, поэтому

$$A_{\text{i}} = |e|\,U_i\,. \qquad (1)$$

Учитывая квантовый характер поглощения энергии атомом, считаем, что работа ионизации равна кванту энергии, поглощенному атомом водорода при переходе электрона с первой боровской орбиты на бесконечно удаленную орбиту: $A_{\text{i}} = W$. Используя сериальную формулу, записываем:

$$|e|\,U_i = W = h\nu = hc/\lambda = hcR\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \qquad (2)$$

Из (1) и (2) следует: $|e|\,U_i = hcR\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$,

$$U_i = \frac{hcR\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)}{|e|} = \frac{W_i\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)}{|e|}, \qquad (3)$$

где $W_i = hcR$ – энергия ионизации атома водорода.

Подставляя числовые значения, имеем

$$U_i = \frac{13{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 13{,}6 \text{ В},$$

т.е. потенциал ионизации, выраженный в вольтах, и энергия ионизации в эВ численно равны друг другу.

Первый потенциал возбуждения U_1 – та наименьшая разность потенциалов, которую должен пройти в ускоряющем поле электрон, чтобы при столкновении с невозбужденным атомом перевести его в первое возбужденное состояние. Для атома водорода это соответствует переходу электрона с первой боровской орбиты на вторую.

Совершенно аналогично написанному выше имеем

$$|e|U_1 = h\nu = hc/\lambda = hcR\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_3^2}\right) = W_i\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_3^2}\right), \qquad (4)$$

откуда $$U_1 = \frac{W_i\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_3^2}\right)}{|e|},$$

$$U_1 = 13{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot (1 - 1/4)/1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{В} = 3/4 \cdot 13{,}6\ \text{В} = 10{,}2\ \text{В}.$$

Ответ: $U_i = 13{,}6$ В, U_1=10,2 В.

П р и м е р 9

Определить энергию W фотона, соответствующего второй линии в серии Пашена, атома водорода.

Дано: $n_1 = 3$, $n_2 = 5$, $Wi = 13{,}6$ эВ.

Определить: W = ?

Решение:

Энергия фотона, излучаемого атомом водорода при переходе электрона с одной орбиты на другую, определяется соотношением

$$W = h\nu = hc/\lambda = hcR\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right),$$

где $W_i = hcR$ – энергия ионизации атома водорода; W_i = 13,6 эВ, n_1 = 1,2,3 … – номер орбиты, на которую переходит электрон; $n_2 = n_1 + 1$, $n_1 + 2$, …, $n_1 + m$ – номер орбиты, с которой переходит электрон; m – номер спектральной линии в данной серии. Для серии Пашена $n_1 = 3$, для второй линии серии $m = 2$, $n_2 = n_1 + m = 3 + 2 = 5$.

Подставим численные значения:

$$W = 13{,}6 \cdot \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{25}\right) = 0{,}97\ \text{эВ}.$$

Ответ: W = 0,97 эВ.

П р и м е р 10

Электрон в возбужденном атоме водорода находится в 3*p*-состоянии. Определить изменение магнитного момента, обусловленного орбитальным движением электрона, при переходе атома в основное состояние.

Решение:

Изменение Δp_m магнитного момента найдем как разность магнитных моментов: p_{m2} конечного (основного) состояния и $p_{м1}$ начального (возбужденного) состояния, т.е.

$$\Delta p_m = p_{m2} - p_{m1}.$$

Магнитный момент орбитального движения электрона зависит только от орбитального квантового числа l:

$$\Delta p_m = \mu_Б \sqrt{l(l+1)},$$

где $\mu_Б$ – магнетон Бора.

В основном состоянии $l = 0$ и $p_{m2} = 0$, в возбужденном ($3p$) состоянии $l=1$ и $p_{m1} = \mu_Б \sqrt{2}$.

Изменение магнитного момента

$$\Delta p_m = -\mu_Б \sqrt{2}.$$

Знак «минус» показывает, что в данном случае магнитный момент уменьшился.

Подставив значение $\mu_0 = 0{,}927 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл, получим

$$\Delta p_м = -0{,}927 \cdot 10^{-23} \cdot 1{,}41 \text{ Дж/Тл} = -1{,}31 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}.$$

Ответ: $\Delta p_м = -1{,}31 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл.

П р и м е р 11

Рассчитать ширину запрещенной зоны ΔW носителей тока в теллуре, если при нагревании от $T_1 = 300$ К до $T_2 = 400$ К его проводимость возрастает в 5 раз.

Дано: $T_1 = 300$ К, $T_2 = 400$ К, $\sigma_2 / \sigma_1 = 5$.

Определить: ΔW = ?

Решение:

Так как теллур является полупроводником, его собственная проводимость σ зависит от температуры T по закону

$$\sigma = \sigma_0\, e^{-\Delta W/2kT},$$

где σ_0 – величина, слабо меняющаяся с температурой; ΔW – ширина запрещенной зоны; k –постоянная Больцмана. Используя это соотношение, запишем формулы проводимости теллура при температурах T_1 и T_2:

$$\sigma_1 = \sigma_0\, e^{-\Delta W/2kT_1},$$

$$\sigma_2 = \sigma_0\, e^{-\Delta W/2kT_2}.$$

Поделив эти выражения, имеем

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = e^{\frac{\Delta W}{2k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)}.$$

Прологарифмируем это выражение и выразим ширину запрещенной зоны:

$$\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) = \frac{\Delta W}{2k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right),$$

$$\Delta W = 2k\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}\cdot\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right).$$

После подстановки числовых данных получим

$$\Delta W = 2\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot\frac{300\cdot 400}{400-300}\cdot ln\, 5 = 0{,}53\cdot 10^{-19}\ \text{Дж} = 0{,}33\ \text{эВ}.$$

Ответ: $\Delta W = 0{,}53\cdot 10^{-19}$ Дж = 0,33 эВ.

П р и м е р 12

Удельное сопротивление чистого германия при некоторой температуре ρ = 0,47 Ом·м. Подвижности электронов и дырок равны соответственно b_n = 0,38 м^2/(В·с), b_p = 0,18 м^2/(В·с). Вычислить их концентрацию n при этой температуре.

Дано: ρ = 0,47 Ом·м, b_n = 0,38 м^2/(В·с), b_p = 0,18 м^2/(В·с).

Определить: n = ?

Решение:

Удельная электропроводность собственных полупроводников определяется выражением

$$\sigma = en\left(b_n + b_p\right).$$

Электропроводность полупроводника связана с удельным сопротивлением ρ следующим образом:

$$\sigma = \frac{1}{\rho},$$

тогда $$en(b_n + b_p) = 1/\rho,$$

отсюда концентрация электронов и дырок

$$n = \frac{1}{e\rho\left(b_n + b_p\right)}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$n = \frac{1}{1,6\cdot 10^{-19}\cdot 0,47\cdot(0,38+0,18)} = 2,3\cdot 10^{19}\,\text{м}^{-3}.$$

Ответ: $n = 2,3\cdot 10^{19}$ м$^{-3}$.

П р и м е р 13

Определить концентрацию n_p дырок и их подвижность, если коэффициент Холла R_H = 3,8·10^{-4} м^3/Кл и удельное электросопротивление полупроводника ρ = 1,0·10^{-2} Ом·м.

Дано: R_H=3,8·10^{-4} м^3/Кл, ρ=1,0·10^{-2} Ом·м, $|e|$=1,6·10^{-19} Кл.

Определить: n_p = ?

Решение:

Концентрация дырок n_p связана с коэффициентом Холла, который для полупроводников, обладающих носителями только одного знака, выражается формулой

$$R_H = \frac{3\pi}{8}\frac{1}{|e|n_p},$$

где $|e|$ – модуль элементарного заряда.

Отсюда

$$n_{\text{р}} = \frac{3\pi}{8}\frac{1}{|e|R_{\text{Н}}}.$$

Удельное сопротивление полупроводников выражается формулой

$$\rho = \frac{1}{|e|\left(n_n b_n - n_p b_p\right)},$$

где $n_{\text{п}}$ и $n_{\text{р}}$ – концентрация электронов и дырок; $b_{\text{п}}$ и $b_{\text{р}}$ – их подвижности.

При отсутствии электронной проводимости ($b_n = 0$) эта формула примет вид

$$\rho = \frac{1}{|e|n_p b_p}.$$

Отсюда искомая подвижность

$$b_p = \frac{1}{|e|n_p\rho}.$$

$$n_{\text{р}} = \frac{3\cdot 3{,}14}{8\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 3{,}8\cdot 10^{-4}} = 1{,}9\cdot 10^{22}\ \text{м}^{-3}.$$

$$b_p = \frac{1}{1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 1{,}9\cdot 10^{22}\cdot 1{,}0\cdot 10^{-2}} = 3{,}3\cdot 10^{-2}\ \text{м}^2/\left(\text{В}\cdot\text{с}\right).$$

Ответ: $n_{\text{р}} = 1{,}9\cdot 10^{22}$ м$^{-3}$, $b_{\text{р}} = 3{,}3\cdot 10^{-2}$ м^2/(В·с).

П р и м е р 14

Определить, сколько ядер распадается в m = 2 мг радиоактивного изотопа церия $^{144}_{58}\text{Ce}$ в течение: 1) Δt_1= 1,0 с; 2) Δt_2 =1,0 год.

Дано: m = 2 мг = $2\cdot 10^{-6}$ кг, M = 0,144 кг/моль, $N_{\text{А}}$ = 6,02 моль$^{-1}$, Δt_1= 1,0 с, Δt_2 =1,0 год = 365·24·3600 с.

Определить: ΔN_1 = ? ΔN_2 = ?

Решение:

Согласно кинетическому закону радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N – число нераспавшихся ядер в момент времени t; N_0 – число нераспавшихся ядер в момент времени $t = 0$; λ – постоянная радиоактивного распада, связанная с периодом полураспада соотношением $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$. По табл. П.2.1, определим период полураспада изотопа церия ${}^{144}_{58}\mathrm{Ce}$: $T = 285$ суток = $= 285 \cdot 24 \cdot 3600$ с.

Число ядер, распавшихся за время t, определяется следующим соотношением:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0\,(1 - e^{-\lambda t})\,. \qquad (1)$$

1. Если промежуток времени Δt, за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада, $\Delta t << T$, то число распавшихся ядер можно определить по формуле

$$\Delta N = \lambda N_0 \Delta t. \qquad (2)$$

Учитывая, что $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, $N_0 = \frac{m}{M} N_A$, формула (2) примет вид

$$\Delta N_1 = \frac{\ln 2}{T}\,\frac{m}{M} N_A \Delta t_1\ ,$$

где m – масса радиоактивного препарата; M – его молярная масса; N_A – постоянная Авогадро.

2. Если же промежуток времени Δt, за который определяется число распавшихся ядер, и период полураспада T одного порядка, то воспользуемся выражением (1), которое справедливо для любого промежутка времени Δt. Учитывая выражения для N_0 и λ, получаем

$$\Delta N_2 = \frac{m}{M} N_A\ (1 - e^{-\frac{\ln 2}{T}\Delta t_2}).$$

Так как $e^{ln2} = 2$, то

$$\Delta N_2 = \frac{m}{M} N_A\ (1 - 2^{-\frac{\Delta t}{T}})\,.$$

Подставим численные значения:

$$\Delta N_1 = \frac{\ln 2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 1}{285 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 0{,}144} = 2{,}35 \cdot 10^4,$$

$$\Delta N_2 = \frac{2\cdot10^{-6}\cdot6{,}02\cdot10^{23}}{0{,}144}\left(1-2^{\frac{365}{285}}\right) = 5\cdot10^{18}.$$

Ответ: $\Delta N_1 = 2{,}35\cdot10^4$ ядер, $\Delta N_2 = 5\cdot10^{18}$ ядер.

П р и м е р 15

Определить начальную активность A_0 радиоактивного магния $^{27}_{12}Mg$ массой m = 0,2 мкг, а также активность A по истечению времени t = 1 ч. Предполагается, что все атомы изотопа радиоактивны.

Дано: m = 0,2 мкг = $0{,}2\cdot10^{-6}$ г = $0{,}2\cdot10^{-9}$ кг, t = 1 ч = 3600 с, M = 0,027 кг/моль.

Определить: A_0 = ? A = ?

Решение:

Начальная активность изотопа

$$A_0=\lambda N_0, \qquad (1)$$

где λ – постоянная радиоактивного распада; N_0 – количество атомов изотопа в начальный момент времени (t = 0).

Если учесть, что $\lambda = \dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}$, $N_0 = \dfrac{m}{M}N_A$, то формула (1) примет вид

$$A_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}\frac{mN_A}{M}.$$

По табл. П. 2.1 определим период полураспада изотопа магния: T = 10 мин = 600 с.

Произведем вычисления:

$$A_0 = \frac{\ln 2}{600}\cdot\frac{0{,}2\cdot10^{-9}\cdot6{,}02\cdot10^{23}}{0{,}027} = 5{,}15\cdot10^{12}\ \text{Бк}.$$

Активность изотопа уменьшается со временем по следующему закону:

$$A=A_0e^{-\lambda t}. \qquad (2)$$

Заменив в формуле (2) постоянную распада λ через период полураспада T, получаем

$$A = A_0e^{-\ln 2\cdot\frac{t}{T_{1/2}}} = A_0\left(e^{\ln 2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Так как $e^{\ln 2} = 2$, то окончательно получаем

$$A = \frac{A_0}{2^{t/(T_{1/2})}}.$$

Сделав подстановку числовых значений, получим

$$A = \frac{5{,}15 \cdot 10^{12}}{2^{3600/600}} = 8{,}05 \cdot 10^{10}\,\text{Бк}.$$

Ответ: A_0 = 5,15·10^{12} Бк, $A = 8{,}05 \cdot 10^{10}$ Бк.

П р и м е р 16

При бомбардировке изотопа бора ${}^{10}_{5}\text{B}$ нейтронами ${}^{1}_{0}n$ образуются α-частица ${}^{4}_{2}\text{He}$ и новое ядро. Определить, какое это ядро, записать уравнение соответствующей ядерной реакции и рассчитать ее энергию. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

Дано: $m_{{}^{10}_{5}B}$ = 10,01294 а.е.м., $m_{{}^{1}_{0}n}$ = 1,00867 а.е.м., $m_{{}^{4}_{2}He}$ = 4,00260 а.е.м.

Определить: ${}^{A}_{Z}X$ = ? Q = ?

Решение:

Запишем уравнение ядерной реакции:

$${}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{A}_{Z}X.$$

Для того чтобы определить, какое ядро образовалось в ходе этой реакции, необходимо определить зарядовое (Z) и массовое (A) число нового ядра. Для этого учтем, что при ядерных превращениях выполняются законы сохранения числа нуклонов и заряда:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4,$$

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4.$$

Подставим численные значения и определим Z и A и запишем уравнение реакции:

$$10 + 1 = 4 + A, \quad A = 7,$$

$$5 + 0 = 2 + Z, \quad Z = 3,$$

$${}^{10}_{5}\text{B} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{7}_{3}\text{Li}.$$

Таким образом, в результате ядерной реакции образовалось ядро ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$, массу которого определим по табл. П. 2.2: $m_{{}^{7}_{3}\mathrm{Li}} =$ 7,01601 а.е.м.

Найдем энергию реакции:

$$Q = 931{,}4\left[\left(m_B + m_n\right) - \left(m_{He} + m_{Li}\right)\right] \text{ МэВ.}$$

Подставим численные значения:

$$Q = 931{,}4 \cdot [\,(10{,}01294 + 1{,}00867) - (4{,}00260 + 7{,}01601)] = 2{,}79 \text{ МэВ.}$$

Численные расчеты показывают, что $Q > 0$, т.е. в этой реакции энергия выделяется.

Ответ: $Q = 2{,}79$ МэВ.

Таблица вариантов для выполнения контрольной работы

Вари-ант	Номера задач								
1	401	411	421	431	441	451	461	471	481
2	402	412	422	432	442	452	462	472	482
3	403	413	423	433	443	453	463	473	483
4	404	414	424	434	444	454	464	474	484
5	405	415	425	435	445	455	465	475	485
6	406	416	426	436	446	456	466	476	486
7	407	417	427	437	447	457	467	477	487
8	408	418	428	438	448	458	468	478	488
9	409	419	429	439	449	459	469	479	489
0	410	420	430	440	450	460	470	480	490

Задачи для контрольной работы № 4

401. Мощность излучения абсолютно черного тела N = 34 кВт. Найти температуру T этого тела, если известно, что площадь его поверхности равна S =0,6 м^2.

402. Температура вольфрамовой спирали в электрической лампочке мощностью N = 25 Вт равна T = 2450 К. Отношение ее энергетической светимости к энергетической светимости абсолютно черного тела при данной температуре равно 0,3. Найти величину излучающей поверхности спирали.

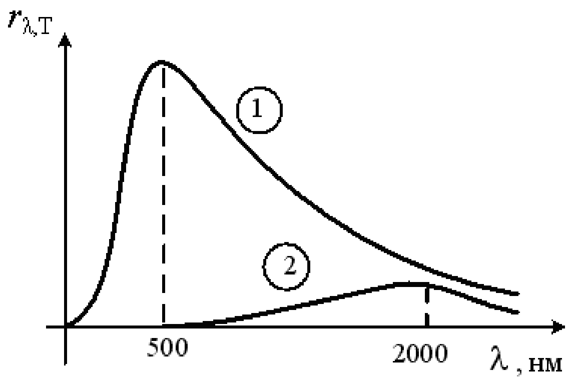
403. При нагревании абсолютно черного тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от 0,69 до 0,5 мкм. Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость тела?

404. Энергетическая светимость абсолютно черного тела R_T =10 кВт/м^2. Определить длину волны, соответствующую максимуму спектральной плотности энергетической светимости тела.

405. Температура абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 1000 до 3000 К. Насколько изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости?

406. Абсолютно черное тело находится при температуре T_1 = 2900 К. В результате остывания этого тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на $\Delta\lambda$ = 9 мкм. Определить температуру T_2, до которой тело охладилось.

407. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Кривая 2 соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 1450 К. Определить, какой температуре соответствует кривая 1.



408. Поверхность тела нагрета до температуры 1000 К. Затем одна половина этой поверхности нагревается на 100 К, другая охлаждается на 100 К. Во сколько раз изменится энергетическая светимость поверхности этого тела?

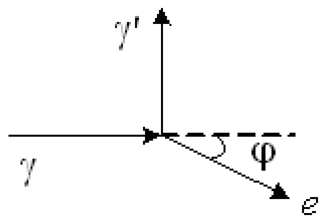
409. Какую энергию теряет за одну минуту раскаленная поверхность площадью 0,2 см^2 при температуре T = 2000 К. Поглощательная способность данной поверхности a = 0,5.

410. Принимая Солнце за черное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина

волны λ = 500 нм, определить массу, теряемую Солнцем за время t = 10 мин за счет излучения. Радиус Солнца $R = 6{,}95\cdot10^8$ м.

411. Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта λ_0 = 307 нм, а максимальная кинетическая энергия W_{kmax} фотоэлектрона равна 1 эВ?

412. На рисунке показаны направления падающего фотона (γ), рассеянного фотона (γ') и электрона отдачи (e). Угол рассеяния $\theta = 90°$, направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол $\varphi = 30°$. Считая, что импульс электрона отдачи равен P_e, определить импульс рассеянного фотона P'. Нарисовать векторную диаграмму импульсов.



413. Плоский серебряный электрод освещается монохроматическим излучением с длиной волны λ = 83 нм. Определить, на какое расстояние от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если вне электрода имеется задерживающее электрическое поле напряженностью E = 10 В/см. «Красная граница» фотоэффекта для серебра равна λ_0 = 264 нм.

414. Фотон с энергией $W_ф$ = 0,51 МэВ рассеялся под углом $\theta = \pi/2$ на свободном электроне. Определить долю энергии фотона, приходящуюся на рассеянный фотон.

415. На фотоэлемент с катодом из лития падают лучи с длиной волны λ = 200 нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов U_{min}, которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

416. Фотон с первоначальной энергией $W_ф$ = 0,4 эВ испытал комптоновское рассеяние под углом $\theta = 90^0$ на свободном электроне. Определить энергию $W'_ф$ рассеянного фотона и кинетическую энергию электрона

отдачи (ответ выразить в джоулях и электронвольтах). Нарисовать векторную диаграмму импульсов.

417. Фотоны с энергией $W_ф$=4,9 эВ вырывают электроны из металла с работой выхода A =4,5 эВ. Найти максимальный импульс p_{max}, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона.

418. Фотон с энергией $W_ф$ = 0,25 МэВ на первоначально покоившемся свободном электроне. Определить кинетическую энергию электрона отдачи, если длина волны рассеянного фотона изменилась на 20%.

419. Какова была длина волны λ_0 рентгеновского излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения графитом под углом θ = 60° длина волны рассеянного излучения оказалась равной λ = 24,5 пм? Нарисовать векторную диаграмму импульсов.

420. Задерживающее напряжение для платиновой пластинки (работа выхода для платины $A_{вых1}$ = 6,3 эВ) составляет $U_{з1}$ = 3,7 В. При тех же условиях для другой пластинки задерживающее напряжение равно $U_{з2}$ = 5,3 В.

421. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию W_{min} электрона, движущегося внутри сферической области диаметром d = 0,1 нм.

422. Во сколько раз длина волны де Бройля меньше неопределенности ее координаты, если относительная неопределенность импульса микрочастицы составляет 1%?

423. Протон обладает кинетической энергией $W_к$=1 кэВ. Определить величину дополнительной энергии ΔW, которую необходимо ему сообщить для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась в три раза.

424. Электрон с кинетической энергией W = 15 эВ находится в металлической пылинке диаметром d = 1 мкм. Оценить относительную неточность $\Delta\upsilon/\upsilon$, с которой может быть определена скорость электрона.

425. Используя соотношение неопределенностей энергии и времени, определить естественную ширину $\Delta\lambda$ спектральной линии излучения атома при переходе его из возбужденного состояния в основное. Среднее

время жизни атома в возбужденном состоянии принять равным 10^{-8} с, а длину волны излучения равной $\lambda = 600$ нм.

426. Предполагая, что неопределенность координаты движущейся частицы равна дебройлевской длине волны, определить относительную неточность $\Delta p/p$ импульса этой частицы.

427. Атом испускает фотон с длиной волны $\lambda = 800$ нм. Продолжительность излучения $\tau = 10$ нс. Определить наибольшую неточность $(\Delta\lambda)$, с которой может быть измерена длина волны излучения.

428. Электрон образует след в камере Вильсона, если его кинетическая энергия не меньше $W = 1000$ эВ. Чему равна относительная неопределенность импульса электрона $\Delta p/p$, если толщина следа составляет $l = 10^{-6}$ м. Является ли электрон в данных условиях квантовой или классической частицей?

429. Приняв, что минимальная энергия нуклона в ядре равна $W = 10$ МэВ, оценить, исходя из соотношения неопределенностей, линейные размеры ядра.

430. Электронный пучок ускоряется в электронно-лучевой трубке разностью потенциалов $U = 0{,}5$ кВ. Принимая, что неопределенность импульса составляет 0,1 % от его числового значения, определить неопределенность координаты электрона. Являются ли электроны в данных условиях квантовой или классической частицей?

431. Частица в потенциальном ящике шириной l находится в основном состоянии ($n = 1$). Построить график зависимости плотности вероятности $|\psi_1(x)|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0 < x < l$) плотность вероятности $|\psi_1(x)|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{3} < x < \frac{2l}{3}$.

432. Частица в потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками находится в возбужденном состоянии ($n = 2$). Построить график зависи-

мости плотности вероятности $|\psi_2(x)|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0< x <l$) плотность вероятности $|\psi_2(x)|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{4}<x<\frac{3l}{4}$.

433. Частица в одномерном потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками находится в возбужденном состоянии (n = 3). Построить график зависимости плотности вероятности $|\psi_3(x)|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0<x<l$) плотность вероятности $|\psi_3(x)|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{3}<x<\frac{2l}{3}$.

434. Частица в одномерно потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками находится в возбужденном состоянии (n=4). Построить график зависимости плотности вероятности $|\psi_4(x)|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0<x<l$) плотность вероятности $|\psi_4(x)|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{4}<x<\frac{4l}{4}$.

435. Частица в потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками находится в возбужденном состоянии (n=2). Построить график зависимости плотности вероятности $|\psi_2(x)|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0<x<l$) плотность вероятности $|\psi_2(x)|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{4}<x<\frac{l}{2}$.

436. Частица в одномерном потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками находится в возбужденном состоянии (n = 3).

Построить график зависимости плотности вероятности $\left|\psi_3(x)\right|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0<x<l$) плотность вероятности $\left|\psi_3(x)\right|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{3}<x<l$.

437. Электрон в потенциальном ящике шириной l находится в возбужденном состоянии (n=4). Построить график зависимости плотности вероятности $\left|\psi_2(x)\right|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0<x<l$) плотность вероятности $\left|\psi_4(x)\right|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что электрон, находящийся в возбужденном состоянии (n=4), будет обнаружен в интервале $0<x<\frac{l}{4}$.

438. Частица в потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками шириной l находится в возбужденном состоянии (n = 2). Построить график зависимости плотности вероятности $\left|\psi_2(x)\right|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0< x <l$) плотность вероятности $\left|\psi_2(x)\right|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $0<x<\frac{l}{4}$.

439. Частица в одномерном потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками находится в возбужденном состоянии (n=3). Построить график зависимости плотности вероятности $\left|\psi_3(x)\right|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0< x <l$) плотность вероятности $\left|\psi_3(x)\right|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{6}<x<\frac{l}{2}$.

440. Частица в одномерно потенциальном ящике с абсолютно непроницаемыми стенками находится в возбужденном состоянии (n=4). Построить график зависимости плотности вероятности $\left|\psi_4(x)\right|^2$ от координаты x. Определить: 1) в каких точках интервала ($0< x <l$) плотность вероятности $\left|\psi_4(x)\right|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна; 2) вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале $\frac{l}{8}<x<\frac{l}{2}$.

441. Найти радиусы первых трех боровских электронных орбит в атоме водорода и скорость электрона на них.

442. Найти численное значение кинетической, потенциальной и полной энергии электрона на первой боровской орбите.

443. Определить скорость υ электронов, падающих на антикатод рентгеновской трубки, если минимальная длина волны λ_{min} в сплошном спектре рентгеновского излучения равна 1нм.

444. Найти период обращения электрона на первой боровской орбите в атоме водорода и его угловую скорость.

445. Фотон с энергией W = 16,5 эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость υ будет иметь электрон вдали от ядра?

446. Определить коротковолновую границу λ_{min} сплошного спектра рентгеновского излучения, если рентгеновская трубка работает под напряжением U = 30 кВ.

447. Определить энергию фотона, соответствующего K_α линии в характеристическом рентгеновском спектре марганца (Z = 25).

448. Определить длину волны λ, соответствующую третьей спектральной линии в серии Лаймана.

449. Атомарный водород, возбужденный светом определенной длины волны, при переходе в основное состояние испускает только три спектральных

линии. Определить длины волн этих линий и указать, каким сериям они принадлежат.

450. Фотон с энергией W = 12,12 эВ, поглощенный атомом водорода, находящимся в основном состоянии, переводит атом в возбужденное состояние. Определить главное квантовое число n этого состояния.

451. Определить возможные значения проекции момента импульса L_z орбитального движения электронов в атоме на направление внешнего магнитного поля. Электрон находится в d-состоянии.

452. Атом водорода, находившийся первоначально в основном состоянии, поглотил квант света с энергией W=10,2 эВ. Определить изменение момента импульса ΔL орбитального движения электрона. В возбужденном атоме электрон находится в p-состоянии.

453. Вычислить полную энергию W, орбитальный момент импульса L и орбитальный магнитный момент p_m электрона, находящегося в 2p-состоянии в атоме водорода.

454. Атом водорода, находившийся первоначально в основном состоянии, поглотил квант с энергией W =12,09 эВ. Определить энергию электрона в возбужденном состоянии и возможные значения орбитального момента импульса электрона в возбужденном состоянии.

455. Электрон в атоме водорода перешел из состояния $3d$ в состояние $2p$. Найти приращение энергии ΔW электрона и модуля орбитального магнитного момента электрона p_m при таком переходе.

456. Вычислить энергию, орбитальный механический и орбитальный магнитный момент электрона, находящегося в $3d$ - состоянии в атоме водорода.

457. Атом водорода, находившийся первоначально в основном состоянии, поглотил квант с энергией W =10,2 эВ. Определить энергию электрона в возбужденном состоянии и возможные значения орбитального магнитного момента электрона в возбужденном состоянии.

458. Электрон в атоме водорода перешел из состояния 4s в состояние $3p$. Найти приращение энергии ΔW электрона и модуля орбитального механического момента электрона L при таком переходе.

459. Атом водорода, находившийся первоначально в в основном состоянии, поглотил квант света с энергией 10,2 эВ. Определить изменение момента импульса орбитального движения электрона. В возбужденном состоянии электрон находится в p- состоянии.

460. 1-s электрон атома водорода, поглотив фотон с энергией W = 12,09 эВ, перешел в возбужденное состояние с максимально возможным орбитальным квантовым числом. Определить изменение момента импульса орбитального движения электрона.

461. Собственный полупроводник имеет при некоторой температуре удельное сопротивление ρ = 0,5 Ом·м. Определить концентрацию n носителей тока, если подвижность электронов b_n= 0,38 $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и дырок b_p= 0,18 $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

462. Тонкая пластинка из кремния шириной b = 2 см помещена перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля (B = 0,5 Тл). При плотности тока j = 2 мкА/мм^2, направленного вдоль пластины, холловская разность потенциалов U_H оказалась равной U_H = 2,8 В. Определить концентрацию n носителей тока.

463. Подвижность электронов и дырок в кремнии соответственно равна $b_n = 1{,}5 \cdot 10^3$ $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $b_p = 5 \cdot 10^2$ $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Вычислить постоянную Холла R_H для кремния, если его удельное сопротивление ρ = 6,2·10^2 Ом·м.

464. Удельное сопротивление кремния с примесями ρ = 10^2 Ом·м. Определить концентрацию n_p дырок и их подвижность b_p. Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью и постоянная Холла R_H = 4·10^{-4} м^3/Кл.

465. Сравнить электропроводность чистого германия при t_1 = – 40 °С и t_2 = 100 °С. Энергия активации свободных носителей заряда для германия ΔW = 0,72 эВ.

466. Германиевый образец нагревают от t_1 = 0 °С до t_2 = 17 ^{0}С. Принимая ширину запрещенной зоны ΔW = 0,72 эВ, определить, во сколько раз возрастает при этом его электропроводность.

467. Найти минимальную энергию, необходимую для образования пары электрон-дырка в полупроводниковом кристалле GaAs, если его проводимость уменьшится в 10 раз при изменении температуры от t_1=20 °С до t_2 = – 3 °С.

468. Во сколько раз возрастет сопротивление R образца из чистого германия, если его температура понизится от T_1 = 300 К до T_2 = 250 К. Энергия активации свободных носителей заряда для германия ΔW = 0,70 эВ.

469. Во сколько раз изменится собственная проводимость полупроводника при повышении температуры от 300 до 310 K ? Ширина запрещенной зоны полупроводника ΔW =0,30 эВ.

470. Концентрация n носителей в кремнии равна $5\cdot10^{10}$ см$^{-3}$, подвижность электронов b_n = 0,15 $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и дырок b_p = $0{,}05\,\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Определить сопротивление кремниевого стержня длиной $l = 5$ см и сечением S = 2 мм^2.

471. Принимая, что все атомы изотопа йода ${}^{131}_{53}\text{I}$ массой m = 1 мкг радиоактивны, определить активность A изотопа через время t = 3 сут.

472. Определить, какая доля радиоактивного изотопа ${}^{255}_{89}\text{Ac}$ распадается в течение времени t = 6 сут.

473. Активность A некоторого изотопа за время t =10 сут уменьшилась на 20%. Определить период $T_{1/2}$ полураспада этого изотопа.

474. Определить массу m изотопа ${}^{131}_{53}\text{I}$, имеющего активность A = 37 ГБк.

475. Покоившееся ядро полония $^{200}_{84}\mathrm{Po}$ испускает α-частицу с кинетической энергией W_α = 5,77 МэВ. Записать реакцию α-распада и определить скорость отдачи дочернего ядра.

476. Счетчик α-частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал N_1=1400 частиц в минуту, а через время t = 4 ч – только N_2 = 400. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

477. Во сколько раз уменьшилась активность препарата $^{32}_{15}\mathrm{P}$ через время t = 4 сут?

478. Определить удельную активность a (число распадов в 1 с на 1 кг вещества) изотопа $^{238}_{92}\mathrm{U}$.

479. Определить число N ядер, распадающихся в течение времени: 1) t_1=1 мин; 2) t_2 = 5 сут, в радиоактивном изотопе фосфора $^{32}_{15}\mathrm{P}$ массой m = 1мг.

480. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период T полураспада.

481. Определить зарядовое число Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой x, в символической записи ядерной реакции $^{44}_{20}\mathrm{Ca} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \to ^{41}_{19}\mathrm{K} + x$. Определить энергетический эффект этой реакции. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

482. В результате соударения α-частицы $^{4}_{2}\mathrm{He}$ с ядром углерода $^{14}_{6}\mathrm{C}$ образовалось ядро кислорода $^{17}_{8}\mathrm{O}$ и новая частица. Определить, какая это частица, записать уравнение ядерной реакции и определить ее энергию. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

483. Определить зарядовое Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой x, в символической записи ядерной реакции $^{14}_{7}\mathrm{N} + x \to ^{17}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$. Указать, какая это частица, и вычислить для нее удельную энергию связи.

484. Определить зарядовое число Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой x, в символической записи ядерной реакции $^{9}_{4}\mathrm{Be}$ + $^{4}_{2}\mathrm{He} \to$

$\rightarrow {}^{12}_{6}C$ + *x*. Рассчитать энергию этой реакции. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

485. Сколько энергии выделяется при образовании m = 1 г гелия ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ из протонов и нейтронов?

486. В результате соударения дейтрона ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ с ядром бериллия ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$ образовалось новое ядро и нейтрон. Определить порядковый номер и массовое число образовавшегося ядра, записать уравнение ядерной реакции и вычислить энергию, выделяющуюся при реакции.

487. В результате реакции ядра алюминия ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$ и α – частицы ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ появился протон ${}^{1}_{1}p$ и новое ядро. Определить, какое это ядро, записать уравнение соответствующей ядерной реакции и рассчитать ее энергию. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

488. В результате взаимодействия дейтрона ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ с некоторым ядром образовалась α-частица ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ и протон: $x + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}p$. Определить порядковый номер и массовое число исходного ядра. Вычислить энергетический эффект этой реакции. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

489. Ядро фтора ${}^{19}_{9}\mathrm{F}$ захватило протон ${}^{1}_{1}p$ и испустило α-частицу ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Определить, какое ядро образовалось в этой реакции. Записать уравнение ядерной реакции, рассчитать ее энергию. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

490. Определить энергию (в электронвольтах), которую можно получить при расщеплении 1 г урана ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$, если при расщеплении каждого ядра выделяется энергия 200 МэВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Фундаментальные физические постоянные

Гравитационная постоянная	$G = 6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2
Скорость света в вакууме	$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ м/с
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12{,}5663706144 \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Постоянная Планка	$H = 6{,}626176 \cdot 10^{-34}$ кг
Масса покоя электрона	$m_e = 9{,}109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1{,}6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1{,}6749543 \cdot 10^{-27}$ кг
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e = 1836.15152$
Элементарный заряд	$E = 1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Отношение заряда электрона к его массе	$e/m_e = 1{,}7588047 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1{,}6605655 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Авогадро	$N_A = 6{,}022045 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F = 96{,}48456 \cdot 10^{3}$ Кл/моль
Молярная газовая постоянная	$R = 8{,}31441$ Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k = 1{,}380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П. 2.1

Период полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ изотопа	Период полураспада
Магний	${}^{27}_{12}Mg$	10 минут
Актиний	${}^{225}_{89}Ac$	10 суток
Иридий	${}^{192}_{77}Ir$	75 суток
Фосфор	${}^{32}_{15}P$	14,3 суток
Торий	${}^{229}_{90}Th$	$7 \cdot 10^3$ лет
Радон	${}^{222}_{86}Rn$	3,8 суток
Кобальт	${}^{60}_{27}Co$	5,3 года
Стронций	${}^{90}_{38}Sr$	28 лет
Йод	${}^{131}_{53}I$	8 суток
Уран	${}^{238}_{92}U$	$4{,}5 \cdot 10^9$ лет
Церий	${}^{144}_{58}Ce$	285 суток

Таблица П. 2.2

Масса покоя некоторых элементарных ядер и нейтральных атомов

Частица, элемент	Изотоп	Масса, *а.е.м.*
Нейтрон	${}_{0}^{1}n$	1,00867
Водород	${}_{1}^{1}H$	1,00783
	${}_{1}^{2}H$	2,01410
Гелий	${}_{2}^{3}He$	3,01603
	${}_{2}^{4}He$	4,00260
Литий	${}_{3}^{6}Li$	6,01513
	${}_{3}^{7}Li$	7,01601
Бериллий	${}_{4}^{8}Be$	8,00513
	${}_{4}^{9}Be$	9,01219
Бор	${}_{5}^{10}B$	10,01294
Углерод	${}_{6}^{12}C$	12,00000
Азот	${}_{7}^{14}N$	14,00307
Кислород	${}_{8}^{17}O$	16,99913
	${}_{8}^{16}O$	15,99491
Фтор	${}_{9}^{19}F$	18,99840
Алюминий	${}_{13}^{27}Al$	26,98154
Кремний	${}_{14}^{30}Si$	29,97377
Калий	${}_{19}^{41}K$	40,96184
Кальций	${}_{20}^{44}Ca$	43,95549

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валишев М. Г. Курс общей физики: учебное пособие / М. Г. Валишев, А. А. Повзнер. СПб.: Лань, 2009. 576 с.

2. Валишев М. Г. Курс общей физики. В 9 ч. Ч. 6. Квантовая оптика. Квантовая механика. Атом водорода. Многоэлектронные атомы: учеб. пособие / М. Г. Валишев, А. А. Повзнер. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. 76 с.

3. Валишев М. Г. Курс общей физики. В 9 ч. Ч. 7. Физика ядра и элементарных частиц: учеб. пособие / М. Г. Валишев, А. А. Повзнер. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. 2007. 48 с.

4. Валишев М. Г. Курс общей физики. В 9 ч. Ч. 9. Физика твердого тела: учеб. пособие / М. Г. Валишев, А. А. Повзнер. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. 66 с.

5. Детлаф А. А. Курс физики : учеб. пособие для студентов втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. 6-е изд., стер. М. : Академия, 2007. 720 с.

6. Трофимова Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инженер.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. 14-е изд., стер. М. : Академия, 2007. 560 с.

7. Чертов А. Г. Задачник по физике : учеб. пособие для втузов / А. А. Чертов, А. А. Воробьев. 7-е изд., перераб. и доп. М. : Физматлит, 2003. 640 с.

8. Трофимова Т. И. Сборник задач по курсу физики с решениями / Т. И. Трофимова, З. Г. Павлова. М. : Высшая школа, 2001. 591 с.

9. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. 3-е изд., испр. и доп. СПб. : Книжный мир, 2008. 328 с.

Учебное издание

Физика

Квантовая оптика. Элементы квантовой механики.

Физика атома и атомного ядра

Составитель **Сакун** Галина Васильевна

Редактор *О.В. Байгулова*

Компьютерный набор *Н. Н. Анохиной*

Подписано в печать 12.11.2010 Формат 60× 84 1/16.

Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 3,66.

Уч.- изд. л. 2,3. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел УрФУ

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

rio@mail.ustu.ru

Ризография НИЧ УрФУ

620002, Екатеринбург, ул.Мира, 19