

МИНИСТЕРСТВО ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

КОМАНДНО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ
КАФЕДРА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ФИЗИКА

ОПТИКА

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ
ДЛЯ СЛУШАТЕЛЕЙ ФАКУЛЬТЕТА ЗАОЧНОГО ОБУЧЕНИЯ**

МИНСК 2000

УДК 530 (075.8)

Рассмотрено и рекомендовано к изданию внештатным редакционно-издательским советом института.

Составители: А.В.Ильюшонок,
В.И.Терешенков.

Рецензент: зам.декана физического факультета БГУ, кандидат физ.-мат. наук, доцент Е.А.Ушаков.

По тематическому плану внутриинститутских изданий учебно-методической литературы на 2000 год. Поз. 20.

Для слушателей второго курса факультета заочного обучения. Предназначено для оказания помощи в выполнении контрольных работ №5 и №6 курса физики.

© Командно-инженерный институт МЧС Беларуси, 2000 г.

© Составление: Ильюшонок А.В., Терешенков В.И., 2000 г.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для оказания помощи слушателям факультета заочного обучения КИИ в изучении раздела физики “Оптика и квантовая физика”.

Пособие содержит программу раздела, список рекомендуемой литературы, учебные материалы и контрольные задания. В учебных материалах кратко изложены теоретические сведения, знание которых необходимо для выполнения контрольных заданий, а также приведены примеры решения типовых задач. Кроме того, в пособии даны общие указания по выполнению контрольных работ.

ПРОГРАММА РАЗДЕЛА КУРСА ФИЗИКИ “ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА”

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Предварительные сведения

Световая волна. Волновой фронт. Волновая поверхность. Принцип Гюйгенса. Геометрическая оптика, законы геометрической оптики. Тонкая линза. Световой поток. Фотометрические величины и единицы.

Интерференция

Интерференция монохроматических волн. Квазимонохроматические волны. Когерентность. Временная и пространственная когерентность. Интерферометры. Применение интерференции света в технике.

Дифракция

Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля. Дифракция Френеля на круглом отверстии и непрозрачном диске. Дифракция Фраунгофера. Дифракция на одной и многих щелях. Дифракционная решетка. Дифракция рентгеновских лучей. Принцип голографии.

Взаимодействие электромагнитных волн с веществом

Распространение света в веществе. Поглощение света. Рассеяние света. Дисперсия света.

Поляризация света

Естественный и плоско-поляризованный свет. Закон Малюса. Поляризация при отражении. Двойное лучепреломление. Искусственная оптическая анизотропия. Вращение плоскости поляризации.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Тепловое излучение

Тепловое излучение и его характеристики. Законы теплового излучения. “Ультрафиолетовая катастрофа”. Гипотеза Планка. Формула Планка для излучательной способности абсолютно черного тела.

Квантовые свойства света

Фотоэффект. Формула Эйнштейна для фотоэффекта. Фотоны. Масса, энергия и импульс фотона. Эффект Комптона. Давление света. Корпускулярно-волновой дуализм. Принцип дополнительности Бора.

Линейчатые спектры атомов.

Теория атома водорода по Бору. Опыт Франка и Герца.

Квантовое состояние

Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов. Измерения в микромире. Соотношения неопределенностей Гейзенберга. Волновая функция, ее статистический смысл. Свойства волновой функции.

Уравнение Шредингера

Временное уравнение Шредингера. Стационарное уравнение Шредингера. Собственные значения и собственные функции. Свободная частица. Частица в бесконечно глубокой потенциальной яме. Туннельный эффект. Гармонический осциллятор.

Атом водорода в квантовой механике

Уравнение Шредингера для атома водорода. Сферические координаты. Энергия электрона в атоме водорода. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа. Полное число электронных состояний. Вырождение состояний. Пространственное распределение электронов в атоме водорода. Спектр атома водорода.

Химические элементы

Спин микрочастицы. Фермионы и бозоны. Принцип неразличимости тождественных частиц. Принцип запрета Паули. Электронные состояния в атоме. Таблица Менделеева. Молекула и химическая связь.

Элементы спектроскопии и люминесценции

Молекулярные спектры. Поглощение. Спонтанное и вынужденное испускание. Люминесценция и ее виды. Спектральный и люминесцентный анализ. Лазеры.

Атомное ядро

Размеры и состав ядра. Массовое число, зарядовое число. Энергия связи ядра и ядерные силы. Радиоактивное излучение и его виды. Ядерные реакции. Деление и слияние ядер.

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Элементарные частицы

Методы регистрации и наблюдения элементарных частиц. Античастицы. Классификация элементарных частиц. Кварки. Структурная организация вещества во Вселенной. Сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное взаимодействие. Единая теория поля.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. –Т. 2, 3. – М.: Наука. 1982.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. –М.: Высшая школа. 1999.
3. Наркевич И.И., Волмянский Э.И., Лобко С.И. Физика для ВТУЗов. Электричество и магнетизм. Оптика. Строение вещества. –Мн.: Высшая школа. 1994.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. –М.: Высшая школа, 1999.
5. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: Наука, 1976.

Дополнительная

1. Ильюшонок А.В., Слабко И.И., Терешенков В.И. Оптика и квантовая физика. Методическое пособие по лабораторному практикуму. Мн.: ВПТУ, 1996, 42 с.
2. Фирганг Е.В., Руководство к решению задач по курсу общей физики. –М.: Высшая школа”, 1978
3. Чертов А.Г., Воробьев А.А., Федоров М.В. Задачник по физике с примерами решения задач и справочными материалами. М.: Высшая школа. 1973.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

1. Во время изучения раздела курса физики “Оптика и квантовая физика” слушатель факультета заочного обучения обязан представить в Училище две контрольные работы (№5 и №6) в сроки, определенные графиком.

2. Номера задач, которые слушатель должен включить в контрольную работу, определяются по таблице вариантов. Вариант слушателя – последняя цифра номера его зачетной книжки. Задачи, номера которых начинаются с цифры “5”, относятся к контрольной работе №5, а задачи, номера которых начинаются цифрой “6” – к контрольной работе №6.

3. Каждую контрольную работу нужно выполнять в отдельной тетради. Условия задач в работе необходимо переписывать полностью, без сокращений. Для замечаний преподавателя на страницах тетради надо оставить поля.

4. Решение задач следует сопровождать подробными исчерпывающими пояснениями. В тех случаях, когда это возможно, нужно сделать чертеж.

5. Решать задачу надо в общем виде, т.е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи, не производя вычислений промежуточных величин.

6. После получения расчетной формулы для проверки ее правильности следует подставить в правую часть формулы вместо символов физических величин обозначения единиц измерения этих величин, произвести необходимые действия и убедиться в том, что полученная единица соответствует искомой величине.

7. Числовые значения физических величин при подстановке их в расчетную формулу следует выражать в единицах СИ. Допускается выражать в произвольных, но одинаковых единицах числовые значения однородных величин, стоящих в числителе и знаменателе дроби и имеющих одинаковые степени.

7. В конце контрольной работы следует указать, какой литературой пользовался слушатель при изучении данного раздела курса (название, автор, место и год издания).

7. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, слушатель обязан представить ее на повторную рецензию, включив в повторную работу те задачи, решения которых оказались неверными. Повторную работу необходимо представлять вместе с незачтенной.

Таблица вариантов

Вариант	Номера задач к контрольным работам №5 (5пп)и №6 (6пп)							
	0	500	510	520	530	540	550	560
600		610	620	630	640	650	660	670
1	501	511	521	531	541	551	561	571
	601	611	621	631	641	651	661	671
2	502	512	522	532	542	552	562	572
	602	612	622	632	642	652	662	672
3	503	513	523	533	543	553	563	573
	603	613	623	633	643	653	663	673
4	504	514	524	534	544	554	564	574
	604	614	624	634	644	654	664	674
5	505	515	525	535	545	555	565	575
	605	615	625	635	645	655	665	675
6	506	516	526	536	546	556	566	576
	606	616	626	636	646	656	666	676
7	507	517	527	537	547	557	567	577
	607	617	627	637	647	657	667	677
8	508	518	528	538	548	558	568	578
	608	618	628	638	648	658	668	678
9	509	519	529	539	549	559	569	579
	609	619	629	639	649	659	669	679

УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

1.1. Основные законы

При падении луча света на границу раздела двух сред он, в общем случае, частично отражается, а частично преломляется; при этом падающий, отраженный и преломленный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным к границе раздела в точку падения.

Закон отражения утверждает, что угол падения луча равен углу отражения.

Согласно *закону преломления*

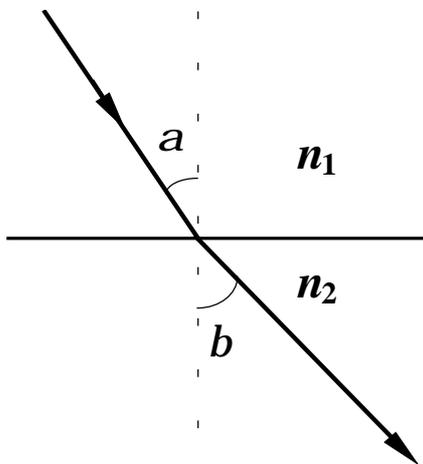


Рис. 1.1

$$\frac{\sin a}{\sin b} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12},$$

где a – угол падения, b – угол преломления (углы отсчитываются от нормали к границе раздела сред), n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления сред, n_{12} – относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой (рис. 1.1).

Предельный угол полного отражения Q_0 определяется соотношением

$$\sin Q_0 = \frac{n_2}{n_1},$$

причем $n_2 < n_1$.

Формула тонкой линзы имеет следующий вид

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Здесь a_1 и a_2 – расстояния от линзы до предмета и его изображения соответственно, R_1 и R_2 – радиусы кривизны сферических поверхностей линзы, n – относительный показатель преломления материала линзы относительно среды. Все расстояния отсчитываются от линзы и подставляются в формулу по знаком “+”, если соответствующие отрезки проходятся вдоль светового пучка и со знаком “–” в противном случае.

Фокусное расстояние F тонкой линзы

$$F = \frac{1}{(n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)}.$$

Для собирающей линзы $F > 0$, для рассеивающей $F < 0$.

Оптическая длина пути L световой волны равна

$$L = n\lambda,$$

где l – геометрическая длина пути волны, n – показатель преломления среды, в которой волна распространяется.

Оптическая разность хода D двух волн равна

$$D = L_2 - L_1.$$

Разность фаз колебаний d , возбуждаемых когерентными волнами в точке наблюдения, следующим образом связана с их оптической разностью хода

$$d = 2\pi \frac{D}{l_0},$$

где l_0 – длина волны в вакууме.

Условие максимального усиления волн при интерференции имеет вид

$$d = 2\pi m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Это условие эквивалентно условию

$$D = ml_0, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Аналогично, при выполнении условия

$$d = 2\pi \left(m + \frac{1}{2} \right),$$

или эквивалентного ему условия

$$D = l_0 \left(m + \frac{1}{2} \right)$$

волны максимально ослабляют друг друга в точке наблюдения.

Оптическая разность хода волн, отраженных поверхностями плоскопараллельной пластинки (пленки), равна

$$D = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 a} + \frac{l_0}{2},$$

где d – толщина пленки, n – показатель преломления материала пленки, a – угол падения световой волны.

Эта же формула используется для приближенного определения оптической разности хода волн, отраженных поверхностями тонкой пленки переменной толщины.

Радиусы темных колец Ньютона при наблюдении в отраженном свете равны

$$r_m = \sqrt{R I m}, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

где R – радиус кривизны линзы.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете

$$r_m = \sqrt{R I \left(m - \frac{1}{2} \right)}, \quad m = 1, 2, \dots$$

Картина колец Ньютона при наблюдении в проходящем свете является дополнительной к картине колец в отраженном свете, т.е. напротив темных (светлых) колец в отраженном свете наблюдаются светлые (темные) кольца в проходящем свете.

Радиусы зон Френеля вычисляются по формуле

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} I m}, \quad m = 1, 2, \dots,$$

где a – расстояние от источника света до волновой поверхности, b – расстояние от точки наблюдения до ближайшей к ней точки этой волновой поверхности, I – длина волны.

Положение дифракционных минимумов интенсивности (темных полос) при дифракции Фраунгофера на одной щели определяется формулой

$$b \sin j = \pm m I \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

где b – ширина щели, m – номер дифракционного минимума.

Основная формула теории дифракционных решеток, определяющая положение главных дифракционных максимумов при нормальном падении света на решетку

$$d \sin j = \pm m I,$$

где d – период решетки, j – угол, под которым наблюдается дифракционный максимум, m – номер дифракционного максимума.

Изменение интенсивности света при его распространении в веществе подчиняется *закону Бугера*, согласно которому интенсивность света при его распространении в веществе убывает по экспоненциальному закону, т.е.

$$I = I_0 \cdot e^{-ad},$$

где I_0 – интенсивность падающего света, I – интенсивность света, прошедшего через вещество, a – коэффициент поглощения, d – толщина слоя вещества.

Закон Рэлея утверждает, что если размеры неоднородностей среды значительно меньше длины световой волны, то интенсивность рассеянного света пропорциональна четвертой степени частоты, т.е.

$$I \sim \nu^4.$$

Согласно *закону Малюса*, если на поляризатор падает плоскополяризованный свет интенсивности I_0 , то интенсивность прошедшего света I равна

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где φ – угол между плоскостью поляризатора и плоскостью поляризации падающего света.

Угол падения Θ_B , удовлетворяющий условию

$$\operatorname{tg} \Theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

называется *углом Брюстера*.

Закон Брюстера гласит, что при угле падения, равном углу Брюстера, отраженный луч полностью плоско поляризован.

1.2. Примеры решения задач

Пример 1. Фокусное расстояние собирающей линзы $F = 10$ см. На каком расстоянии a от линзы нужно поместить предмет, чтобы его мнимое изображение получилось на расстоянии $b = 25$ см от линзы?

Решение.

По формуле тонкой линзы

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{F}.$$

Поскольку все расстояния отсчитываются от линзы, из условия задачи следует $a_1 = -a$, $a_2 = -b$ (поскольку мнимое изображение и сам предмет находятся с одной стороны от линзы).

Для собирающей линзы $F > 0$. Следовательно

$$\frac{1}{(-b)} - \frac{1}{(-a)} = \frac{1}{F}, \quad \frac{1}{a} = \frac{F + b}{Fb},$$

$$a = \frac{Fb}{F + b} = \frac{0,1 \cdot 0,25}{0,1 + 0,25} = 0,0714 \quad (\text{м}).$$

Пример 2. На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1,3$ падает по нормали пучок белого света. Какова наименьшая толщина пленки, если в отраженном свете она кажется зеленой. Длину волны зеленого света примите равной $0,55$ мкм.

Решение.

Пленка будет казаться зеленой, если световые пучки 1 и 2 с соответствующей длиной волны, отраженные от поверхностей пленки, будут усиливаться в результате интерференции (рис 1.2). Для этого необходимо, чтобы оптическая разность хода D этих волн равнялась целому числу длин волн в вакууме. При нормальном падении света на пленку

$$D = 2nd + \frac{l_0}{2}.$$

Дополнительная разность хода $l_0/2$ возникает потому, что один из пучков (1 на рис. 1.2) отражается от оптически более плотной среды (при отражении от оптически более плотной среды в менее плотную, фаза волны скачком изменяется на π , а при отражении от менее плотной среды фаза не изменяется).

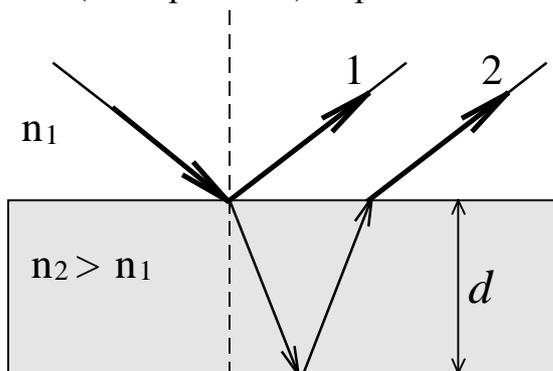


Рис. 1.2.

Следовательно, пленка будет казаться зеленой при толщине, удовлетворяющей условию

$$2nd + \frac{l_0}{2} = m l_0 \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Отсюда находим возможные значения толщины пленки:

$$d_m = \frac{l_0}{2n} \left(m - \frac{1}{2} \right), \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Очевидно, минимальное значение толщины пленки получается при $m = 1$, т.е.

$$d_{\min} = \frac{I_0}{4n} = \frac{0,55 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,3} \approx 10^{-7} \text{ (м)} = 0,1 \text{ (мкм)}.$$

Пример 3. Диаметры двух светлых колец Ньютона в отраженном свете с длиной волны 500 нм равны 4,0 мм и 4,8 мм. Порядковые номера колец не определялись, но известно, что между двумя измеренными кольцами расположено три светлых кольца. Найдите радиус плоско-выпуклой линзы, взятой для опыта.

Решение.

Обозначим буквой k неизвестный номер кольца меньшего диаметра. Из условия задачи следует, что номер второго кольца равен $k + 4$.

По формуле для радиусов светлых колец Ньютона имеем

$$\frac{d_k}{2} = \sqrt{RI \left(k - \frac{1}{2} \right)}, \quad \frac{d_{k+4}}{2} = \sqrt{RI \left(k + 4 - \frac{1}{2} \right)} = \sqrt{RI \left(k + \frac{7}{2} \right)}.$$

Возведя в квадрат и разделив друг на друга левые и правые части этих уравнений, получим

$$\frac{d_k^2}{d_{k+4}^2} = \frac{2k - 1}{2k + 7},$$

откуда легко находим номер кольца:

$$k = \frac{d_{k+4}^2 + 7d_k^2}{2(d_{k+4}^2 - d_k^2)}.$$

Радиус кривизны линзы получим из формулы для радиуса k -го кольца, возведя ее в квадрат:

$$\frac{d_k^2}{4} = RI \left(k - \frac{1}{2} \right) = RI \frac{4d_k^2}{d_{k+4}^2 - d_k^2};$$

$$R = \frac{d_{k+4}^2 - d_k^2}{16k} = \frac{(4,8)^2 - 4^2}{16 \cdot 500 \cdot 10^{-9}} \cdot 10^{-6} = 0,88 \text{ (м)}.$$

Пример 4. Радиус четвертой зоны Френеля для плоской волновой поверхности $r_4 = 3$ мм. Определите радиус двадцать пятой зоны.

Решение.

Плоскую волновую поверхность можно рассматривать как предельный случай сферической поверхности бесконечного радиуса. Поэтому выражение для радиусов зон Френеля в случае плоской волновой поверхности можно получить воспользовавшись формулой для радиусов зон сферической волновой поверхности

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m l},$$

где a – расстояние от источника до волновой поверхности, b – расстояние от точки наблюдения до ближайшей к ней точки этой поверхности. Интересующая нас ситуация реализуется при удалении источника света на бесконечность. Следовательно,

$$r_m = \lim_{a \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{ab}{a+b} m l} = \lim_{a \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{b}{1+(b/a)} m l} = \sqrt{b m l}.$$

По условию задачи

$$r_4 = \sqrt{b l \cdot 4}, \quad r_{25} = \sqrt{b l \cdot 25},$$

поэтому

$$\frac{r_{25}}{r_4} = \sqrt{\frac{25}{4}}, \quad r_{25} = r_4 \frac{5}{2} = 7,5 \text{ мм}.$$

Пример 5. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения лучей, соответствующих второй светлой дифракционной полосе, равен 1° . Скольким длинам волн падающего света равна ширина щели?

Решение.

Углы отклонения лучей, соответствующие дифракционным максимумам при дифракции на одной щели, определяются с помощью формулы (следует иметь в виду, что эта формула является приближенной)

$$b \cdot \sin j = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) l, \quad m = 1, 2, \dots,$$

где b – ширина щели.

Второй светлой дифракционной полосе (считая от центрального дифракционного максимума) соответствует $m = 2$.

Поэтому

$$b \cdot \sin 1^\circ = \frac{5}{2} l, \quad \frac{b}{l} = \frac{5}{2 \cdot \sin 1^\circ} \approx 143.$$

Пример 6. Сколько штрихов на каждый миллиметр длины содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете с длиной волны 0,6 мкм максимум пятого порядка отклонен на угол 18°?

Решение.

Воспользовавшись основной формулой теории дифракционных решеток

$$d \cdot \sin j = m l,$$

находим период решетки

$$d = \frac{m \cdot l}{\sin j}.$$

Число штрихов на 1 мм длины найдем, разделив длину этого интервала (10^{-3} м) на период решетки:

$$n = \frac{10^{-3}}{d} = \frac{10^{-3} \cdot \sin j}{m l} = \frac{10^{-3} \cdot \sin 18^\circ}{5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}} = 103.$$

Пример 7. На поляризатор падает пучок естественного света интенсивности I_0 . Определите интенсивность света на выходе из поляризатора.

Решение.

Пучок естественного света можно рассматривать как смесь двух пучков, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Интенсивность каждого из этих поляризованных пучков равна половине интенсивности пучка естественного света. Выберем плоскость поляризации одного из пучков совпадающей с плоскостью поляризатора. Этот пучок пройдет через поляризатор без изменения интенсивности. Пучок же, поляризованный в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризатора, через него не проходит. Следовательно

$$I = \frac{1}{2} I_0.$$

Пример 8. Предельный угол полного отражения пучка на границе жидкости с воздухом равен 43°. Каким должен быть угол падения пучка из воздуха на поверхность жидкости, чтобы отраженный луч был полностью поляризован?

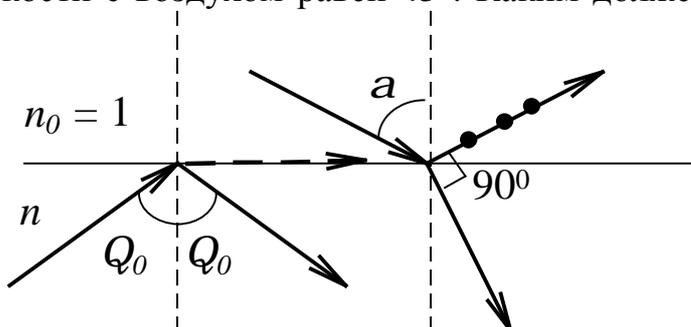


Рис 1.3.

чтобы отраженный луч был полностью поляризован?

Решение.

Обозначим показатель преломления жидкости через n (для воздуха показатель преломления примерно равен 1). Предельный угол полного от-

ражения Q_0 определяется соотношением (рис. 1.3):

$$\sin Q_0 = \frac{1}{n},$$

откуда находим показатель преломления жидкости:

$$n = \frac{1}{\sin Q_0}.$$

По условию задачи угол падения луча из воздуха на поверхность жидкости равен углу Брюстера, следовательно

$$\operatorname{tga} = n = \frac{1}{\sin Q_0},$$

$$a = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\sin Q}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{0,682}\right) \approx 55^\circ 45'.$$

1.3. Задачи к контрольной работе № 5

500. Луч света, идущий в среде с показателем преломления n_1 , падает на границу раздела этой среды со средой, показатель преломления которой равен n_2 . Определите, при каком угле падения отраженный луч будет перпендикулярен преломленному лучу.

501. На плоскопараллельную пластинку толщины d падает световой луч. Определите боковое смещение луча (от первоначального направления) на выходе из пластинки, если угол падения луча равен α , а показатель преломления вещества пластинки равен n .

502. На поверхности водоема глубиной $h = 5$ м плавает круглый плот, центр которого находится над точечным источником света, помещенном на дно водоема. Найдите минимальный радиус плота, при котором источник света нельзя увидеть через поверхность воды, показатель преломления которой $n = 1,33$.

503. Стеклянный сосуд прямоугольной формы наполнен жидкостью и освещается лампочкой, расположенной под сосудом вблизи его дна. При каком минимальном показателе преломления жидкости лампочку нельзя увидеть сквозь боковые стенки сосуда?

504. Определите, на каком расстоянии от собирающей линзы надо поместить предмет, чтобы расстояние между предметом и его действительным изображением было минимальным. Фокусное расстояние линзы равно F .

505. Расстояние между двумя точечными источниками света равно 24 см. Где между ними следует поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием $F = 9$ см, чтобы изображения обоих источников получились в одной и той же точке?

506. Оптическая сила тонкой стеклянной линзы $D = 5$ дп. Когда эту линзу помещают в жидкость с показателем преломления n_2 , она действует как рассеивающая с фокусным расстоянием, равным 10 см. Определить показатель преломления n_2 жидкости, если показатель преломления стекла линзы $n_1 = 1,5$.

507. Тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием 25 см проецирует изображение предмета на экран, отстоящий от линзы на расстоянии 5 см. Экран придвинули к линзе на 18 см. На сколько следует переместить предмет, чтобы опять получить его четкое изображение на экране?

508. Источник света находится на расстоянии 90 см от экрана. Тонкая собирающая линза, помещенная между источником света и экраном, дает четкое изображение источника при двух положениях. Определите фокусное расстояние линзы, если расстояние между обоими положениями линзы равно 30 см.

509. Для некоторого сорта стекла показатель преломления для красных лучей равен 1,4835, а для фиолетовых равен 1,4996. Вычислите расстояние между фокусами двояковыпуклой линзы, сделанной из этого сорта стекла, если линза ограничена сферическими поверхностями с одинаковыми радиусами кривизны, равными 10 см.

510. Два точечных когерентных источника света находятся в спирте ($n = 1,36$) на расстоянии 2 см друг от друга. Определите оптическую разность хода для точки, лежащей на расстоянии 20 см от одного из источников по направлению нормали к прямой, соединяющей источники.

511. На сколько изменится оптическая разность хода, если два точечных когерентных источника, находящиеся на расстоянии 2 см друг от друга в воздухе, поместить в сероуглерод ($n = 1,63$)? Задачу решить для точки, лежащей на расстоянии 30 см от одного из источников по направлению нормали к прямой, соединяющей источники.

512. Два когерентных источника, находящиеся в сероуглероде ($n = 1,63$) на расстоянии 2 см испускают световые волны в одинаковой фазе с частотой $5 \cdot 10^{14}$ Гц. Чему равняется разность фаз колебаний, приходящих в точку, удаленную на 50 см от одного из источников в направлении нормали к прямой, соединяющей источники?

513. Тонкая проволока лежит между двумя стеклянными плоскопараллельными пластинами параллельно их линии соприкосновения, вследствие чего в отраженном свете наблюдается интерференционная картина с расстоянием между соседними полосами 1,5 мм. Проволочка расположена на расстоянии 7,5 см от линии соприкосновения пластин и имеет диаметр 0,01 мм. Определите длину волны падающего света.

514. Определите преломляющий угол стеклянного клина, если на его нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,52 мкм и число интерференционных полос, приходящихся на 1 см, равно 8. Показатель преломления стекла для указанной длины волны равен 1,49.

515. На пленку толщиной 367 нм падает под углом Q пучок белого света. Показатель преломления материала пленки равен 1,4. В какой цвет будет окрашен свет, отраженный пленкой, при $Q = 30^\circ$ и $Q = 60^\circ$.

516. На стеклянную пленку с показателем преломления 1,33 падает белый свет под углом 45° . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый ($\lambda = 600$ нм) цвет?

517. Тонкий слой прозрачного вещества с $n = 1,3$ помещен на стеклянную ($n = 1,4$) пластинку. Пластинка освещается монохроматическим светом с длиной волны 640 нм, падающим по нормали. Определите минимальную толщину слоя, при которой отраженный свет имеет наименьшую интенсивность.

518. Найдите минимальную толщину пленки с показателем преломления 1,33, при которой свет с длиной волны 0,64 мкм испытывает максимальное отражение, а свет с длиной волны 0,4 мкм не отражается совсем. Угол падения света равен 30° .

519. По нормали к поверхности клина падает пучок белого света. Интерференция наблюдается в отраженном свете через красный светофильтр ($\lambda_1 = 6,31 \cdot 10^{-5}$ см). Расстояние между соседними красными полосами равно при этом 3 мм. Затем тот же клин наблюдается через синий ($\lambda_1 = 4,0 \cdot 10^{-5}$ см) светофильтр. Определите расстояние между соседними синими полосами.

520. Найдите радиус кривизны линзы, применяемой для наблюдения колец Ньютона, если расстояние между вторым и третьим светлыми кольцами равно 0,5 мм. Освещение производится светом с длиной волны 550 \AA , а наблюдение ведется в отраженном свете.

521. Определите расстояние между десятым и одиннадцатым светлыми кольцами Ньютона, наблюдаемыми в отраженном свете, если расстояние между вторым и третьим кольцами равно 0,3.

522. Найдите показатель преломления жидкости, заполняющей пространство между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плоско-выпуклой линзой, если при наблюдении в отраженном свете ($l = 0,6$ мкм) радиус десятого темного кольца Ньютона оказался равным 2,1 мм. Радиус кривизны линзы 1 м.

523. Оптическая сила плосковыпуклой линзы с показателем преломления 1,5 равна 0,5 диоптрии. Линза выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определите радиус седьмого темного кольца Ньютона в проходящем свете, если длина световой волны равна 0,5 мкм.

524. Во сколько раз изменится радиус колец Ньютона, если пространство между плосковыпуклой линзой и плоскопараллельной пластинкой заполнить сероуглеродом с показателем преломления 1,6?

525. Определите толщину воздушного промежутка между линзой и пластинкой в том месте, где наблюдается пятое темное кольцо в отраженном свете. Длина световой волны равна 6560 \AA .

526. Наблюдение колец Ньютона ведется в отраженном свете. Радиусы двух соседних темных колец равны 4 мм и 4,38 мм. Радиус кривизны линзы равен 6,4 м. Найдите порядковые номера колец и длину волны падающего света.

527. Наблюдение колец Ньютона производится в проходящем свете. Какое по порядку светлое кольцо, соответствующее длине волны 5791 \AA , совпадает со следующим светлым кольцом, соответствующим длине волны 5770 \AA ?

528. После того как пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнили жидкостью, радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете уменьшились в 1,25 раза. Найдите показатель преломления жидкости.

529. Плосковыпуклая стеклянная линза с фокусным расстоянием 1 м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 1,1 мм. Определите длину световой волны.

530. Вычислите радиусы первых пяти зон Френеля, если расстояние от точечного источника света до волновой поверхности равно 1 м, расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения также 1 м, длина волны равна $5 \cdot 10^{-7}$ м.

531. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света. На расстоянии $0,5 l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром 1 см. Чему равно расстояние l , если преграда закрывает только центральную зону Френеля? Длина световой волны равна $6 \cdot 10^{-5}$ см.

532. Вычислите радиусы первых пяти зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1 м. Длина волны равна $5 \cdot 10^{-7}$ м.

533. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии 4 м от точечного источника монохроматического света с длиной волны $5 \cdot 10^{-7}$ м. Посредине между экраном и источником света помещена диафрагма с круглым отверстием. При каком радиусе отверстия центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет наиболее темным?

534. На диафрагму с круглым отверстием падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $6 \cdot 10^{-7}$ м. На экране наблюдается дифракционная картина. При каком наибольшем расстоянии между диафрагмой и экраном в центре дифракционной картины все еще будет наблюдаться темное пятно? Диаметр отверстия равен 1,96 мм.

535. Точечный источник света с длиной волны 0,5 мкм расположен на расстоянии 1 м перед диафрагмой с круглым отверстием радиусом 1 мм. Найдите расстояние от диафрагмы до точки наблюдения, для которой число зон Френеля в отверстии равно трем.

536. Между точечным источником света и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием, радиус которого можно менять в процессе опыта. Расстояния от диафрагмы до источника и экрана равны 100 см и 125 см соответственно. Определите длину волны света, если максимум освещенности в центре дифракционной картины наблюдается при радиусе отверстия 1 мм и следующий максимум при радиусе отверстия 1,29 мм.

537. Расстояние между точечным источником света A и точкой наблюдения B равно 2 м. На каком расстоянии от точки A надо поместить диафраг-

му с отверстием, диаметр которого 1,8 мм, чтобы при рассмотрении из точки **B** в отверстии укладывалось три зоны Френеля? Длина волны света равна 6000 \AA .

538. Расстояние между точечным источником света **A** и точкой наблюдения **B** равно 2 м. Диафрагма с отверстием радиуса 1 мм перемещается из точки, отстоящей от точки **A** на 1 м в точку, отстоящую от **A** на 1,75 м. Сколько раз будет при этом наблюдаться затемнение в точке **B**, если длина волны света равна 5000 \AA ?

539. На грань кристалла каменной соли падает параллельный пучок света рентгеновских лучей ($\lambda = 1,47 \text{ \AA}$). Определите расстояние между атомными плоскостями кристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается, когда лучи падают под углом $\varphi = 31^\circ 30'$ к поверхности кристалла.

540. Монохроматическое излучение с длиной волны 0,6 мкм падает параллельным пучком по нормали на плоскость со щелью шириной 10 мкм. Определите угол, на который отклонится пучок лучей, дающий дифракционный минимум первого порядка.

541. Нормально к плоскости щели падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 0,546 мкм. Вычислите ширину щели, если дифракционный минимум первого порядка наблюдается под углом 2° к первоначальному направлению лучей.

542. На щель падает по нормали параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный максимум света?

543. Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 4000 \AA падает нормально на щель шириной 20 мкм. За щелью помещена линза с фокусным расстоянием 50 см, с помощью которой можно наблюдать дифракционные полосы на экране. Определите расстояние между темными полосами первого и второго порядков.

544. На щель шириной 4 мкм падает по нормали монохроматический свет с длиной волны 0,52 мкм. Определите общее число дифракционных минимумов, наблюдаемых на удаленном экране.

545. На узкую щель падает по нормали пучок лучей с длиной волны 4900 \AA . Дифракционная картина наблюдается на экране с помощью линзы с фокусным расстоянием 40 см. Определите ширину щели, если ширина центрального дифракционного максимума равна 60 см.

546. При прохождении в некотором веществе пути d интенсивность света уменьшается в два раза. Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении пути $3d$?

547. Определите, во сколько раз интенсивность молекулярного рассеяния синего света ($\lambda = 460$ нм) превосходит интенсивность рассеяния красного света ($\lambda = 650$ нм).

548. При прохождении света через пластинку его интенсивность уменьшилась на 10%. Во сколько раз уменьшится интенсивность света после прохождения пяти таких пластинок?

549. Монохроматический пучок света интенсивности I_0 падает нормально на поверхность плоскопараллельной пластинки толщиной l . Коэффициент поглощения вещества пластинки линейно изменяется вдоль нормали к ее поверхности от a_1 до a_2 . Коэффициент отражения от каждой поверхности равен r . Пренебрегая вторичными отражениями, определите интенсивность света на выходе из пластинки.

550. По нормали к поверхности дифракционной решетки падает монохроматический свет. Постоянная решетки в 4,8 раза больше длины волны. Определите общее число дифракционных максимумов, которые можно наблюдать в данном случае.

551. На дифракционную решетку падает по нормали пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядков частично перекрываются. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница ($\lambda = 760$ нм) спектра третьего порядка?

552. Пучок белого света падает по нормали на дифракционную решетку, содержащую 800 штрихов на 1 мм. Определите длину спектра 1-го порядка на экране, расположенном в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 1,4 м. Длины волн видимого света лежат в интервале от 400 нм до 760 нм.

553. На дифракционную решетку, содержащую 120 штрихов на 1 мм, падает по нормали монохроматический свет. Угол между направлениями на максимумы второго порядка равен 18° . Определите длину волны света, падающего на решетку.

554. На дифракционную решетку падает по нормали монохроматический свет с длиной волны 440 нм. Угол между направлениями на максимумы первого и второго порядков равен $1^\circ 48'$. Определите число штрихов на 1 мм решетки.

555. Период дифракционной решетки равен 4 мкм. На решетку падает по нормали свет с длиной волны, равной 0,52 мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

556. Период дифракционной решетки в 6 раз больше длины волны монохроматического света, падающего по нормали на ее поверхность. Определите угол между максимумами 2-го порядка.

557. Свет от ртутной лампы падает нормально на дифракционную решетку, ширина которой 5 см. Общее число штрихов решетки равно 10000. Определите угол между фиолетовыми ($I_1 = 0,405$ мкм) и желтыми ($I_2 = 0,577$ мкм) лучами в спектре первого порядка.

558. Определите период решетки, которая позволяла бы наблюдать спектральную линию для длины волны $4000 \overset{\circ}{\text{Å}}$ только в одном порядке.

559. Вычислите наибольший угол, на который может отклониться пучок монохроматического света дифракционной решетки, имеющей 10000 штрихов при ширине решетки 4 см. Длина волны нормально падающего света равна $5460 \overset{\circ}{\text{Å}}$.

560. Угол между плоскостями анализатора и поляризатора увеличен с 45° до 60° . Во сколько раз уменьшилась при этом интенсивность света, выходящего из анализатора?

561. Анализатор в два раза уменьшает интенсивность света, приходящего от поляризатора. Определите угол между плоскостями поляризатора и анализатора.

562. Найдите угол между плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшилась в 4 раза.

563. Определите, во сколько раз ослабляется естественный свет, пройдя через 2 поляризатора, если их плоскости составляют угол 45° , а в каждом из них теряется 15% падающего света.

564. Плоскополяризованный свет интенсивности I_0 проходит последовательно через 2 поляризатора, плоскости которых образуют с плоскостью поляризации исходного луча углы 30° и 60° (углы отсчитываются от плоскости колебаний в исходном луче в одну сторону). Определите интенсивность света на выходе из второго поляризатора.

565. Естественный свет проходит через систему, состоящую из двух поляризаторов, плоскости которых образуют угол α . В каждом из поляризаторов теряется 10% падающего на него света. Найдите угол α , если интенсивность света на выходе из системы составляет 10% интенсивности падающего на нее света.

566. Во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через 3 поляризатора, если угол между плоскостями 1-го и 2-го поляризаторов равен 30° , а угол между плоскостями 2-го и 3-го поляризаторов равен 60° ?

567. Пучок естественного света падает на систему из 6 поляризаторов, плоскость каждого из которых повернута на угол 30° относительно плоскости предыдущего. Во сколько раз уменьшится интенсивность света?

568. Естественный свет падает на систему из трех последовательно расположенных поляризаторов, причем плоскость среднего поляризатора составляет угол 60° с плоскостями двух других поляризаторов. В каждом из поляризаторов теряется 20% падающего на него света. Во сколько раз уменьшится интенсивность света после прохождения системы?

569. Вертикально поляризованный свет интенсивности I_0 проходит 9 поляризаторов. Плоскость первого поляризатора составляет 10° с вертикалью, плоскость второго повернута еще на 10° и т.д.. Плоскость 9-го повернута на 90° . Определите интенсивность света на выходе из девятого поляризатора.

570. Идущий в воздухе луч света падает на поверхность жидкости под углом 58° . Определите угол преломления луча, если отраженный луч максимально поляризован.

571. При отражении света от кристалла некоторого вещества угол полной поляризации равен 57° . Найдите скорость распространения света в этом кристалле.

572. Пучок света переходит из жидкости в стекло. При этом угол падения луча равен 70° , а угол преломления равен 45° . При каком угле падения отраженный луч будет полностью поляризован?

573. Луч света падает под углом Брюстера на стеклянную пластинку с показателем преломления 1,8. На сколько надо изменить угол падения, чтобы получить полностью поляризованный отраженный луч, если пластинку поместить в жидкость с показателем преломления 1,4?

574. Для некоторого вещества предельный угол полного отражения равен 47° . Найдите для этого вещества угол полной поляризации.

575. Определите показатель преломления стекла, если отраженный от его поверхности луч света полностью поляризован при угле преломления 30° .

576. На стеклянную пластинку с показателем преломления 1,4 падает световой луч. Определите угол между падающим и отраженным лучами, если отраженный луч полностью поляризован.

577. Определите угол полной поляризации при отражении света от стекла с показателем преломления 1,57.

578. Световой пучок падает на стеклянную пластинку, нижняя поверхность которой находится в жидкости. Показатели преломления стекла и жидкости равны 1,6 и 1,3 соответственно. Определите угол падения пучка на поверхность пластинки, при котором луч, отраженный от границы стекло–вода, будет полностью поляризован.

579. Луч света идет в жидкости и отражается от стеклянного дна сосуда с показателем преломления 1,5. Отраженный луч полностью поляризован при

угле падения 42° . Найдите показатель преломления жидкости и угол, под которым должен падать луч на дно сосуда, чтобы наступило его полное отражение.

2. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

2.1. Основные формулы

Закон Стефана-Больцмана утверждает, что энергетическая светимость R^* абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры T , т.е.

$$R^* = sT^4.$$

Здесь s – постоянная Стефана-Больцмана.

Длина волны l_m , на которую приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела, определяется *правилом смещения Вина*

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

где b – постоянная Вина.

Энергия фотона e равна

$$e = hu = hw = \frac{hc}{l},$$

где h – постоянная Планка, $h = h/2\pi$, n – частота световой волны, l – ее длина, c – скорость света в вакууме.

Масса фотона m

$$m = \frac{e}{c^2} = \frac{hu}{c^2} = \frac{hw}{c^2} = \frac{h}{cl}.$$

Импульс фотона p

$$p = mc = \frac{hu}{c} = \frac{hw}{c} = \frac{h}{l}.$$

Формула Эйнштейна для фотоэффекта имеет вид

$$hn = A + T_{\max},$$

где A – работа выхода электрона, T_{\max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Если энергия фотона существенно меньше энергии покоя электрона $m_0c^2 = 0,51$ МэВ, для вычисления T_{\max} используется нерелятивистская формула

$$T_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Если же энергия фотона сравнима с энергией покоя электрона либо превосходит ее, для вычисления T_{\max} необходимо пользоваться релятивистской формулой для кинетической энергии:

$$T = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

В релятивистском случае работой выхода электрона можно пренебречь.

Красная граница фотоэффекта определяется соотношениями

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где ν_0 и λ_0 – минимальная частота и соответствующая ей максимальная длина волны света, вызывающего фотоэффект.

Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии определяется формулой

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{h}{m_0c} (1 - \cos Q),$$

где λ_0 и λ – длины волн падающего и рассеянного фотонов, m_0 – масса покоя электрона, Q – угол рассеяния фотона.

Релятивистская зависимость энергии частицы от импульса выглядит следующим образом:

$$E = c\sqrt{m_0^2c^2 + p^2}.$$

Зависимость импульса p частицы от ее кинетической энергии T в релятивистском случае имеет вид

$$p = \sqrt{\frac{T^2}{c^2} + 2m_0T}.$$

Световое давление равно (при нормальном падении света на поверхность)

$$p = \frac{\Phi}{c} (1 + R).$$

Здесь Φ – плотность потока энергии излучения, R – коэффициент отражения.

Длина волны де Бройля

$$l = \frac{h}{p},$$

где p – импульс частицы.

Соотношение неопределенностей для координаты и соответствующей проекции импульса частицы имеет вид

$$Dx \cdot Dp_x \geq h,$$

где Dx – неопределенность координаты частицы, Dp_x – неопределенность соответствующей проекции импульса.

Модуль момента импульса электрона при его движении на стационарной боровской орбите в атоме водорода может принимать только квантовые значения:

$$L_n = mV_n r_n = n \cdot \hbar$$

где m – масса электрона, V_n – скорость электрона на n -ой орбите, r_n – радиус этой орбиты, n – главное квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Радиус n -ой стационарной орбиты электрона равен

$$r_n = a_0 \cdot n^2,$$

где a_0 – первый боровский радиус.

Возможные для электрона в атоме водорода значения энергии определяются формулой

$$E_n = -\frac{E_i}{n^2},$$

где E_i – энергия ионизации атома водорода.

Частоты спектральных линий водорода даются обобщенной формулой Бальмера

$$u = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где R – постоянная Ридберга, n и k – целые числа, равные главным квантовым числам состояний, между которыми происходят переходы с излучением (поглощением) света.

Вероятность обнаружения частицы на интервале d_x при одномерном движении равна

$$dP = |Y(x)|^2 dx = Y^*(x)Y(x)dx,$$

где $\Psi(x)$ – волновая функция, описывающая движение частицы, звездочка означает комплексное сопряжение.

Собственные волновые функции, описывающие движение частицы в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме, имеют следующий вид:

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

где l – ширина ямы.

Соответствующие собственные значения энергии равны

$$E_n = \frac{p^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2,$$

где m – масса частицы, n – квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид

$$Y = Y(r) = A e^{-r/a_0},$$

где A – постоянная, r – расстояние точки от ядра, a_0 – первый боровский радиус.

Среднее значение $\langle F \rangle$ физической величины F вычисляется в квантовой механике по формуле

$$\langle F \rangle = \int \Psi^* F \Psi dV.$$

где dV – элемент объема.

2.2 Примеры решения задач

Пример 1. Нить лампы накаливания излучает как абсолютно черное тело, имеющее температуру 2400 К. Вычислите, сколько фотонов испускается с 1 см^2 поверхности за 1 с, если среднюю энергию кванта излучения можно считать равной $2,75 kT$ (k – постоянная Больцмана).

Решение.

По закону Стефана-Больцмана энергия, излучаемая единицей площади поверхности абсолютно черного тела за единицу времени (энергетическая светимость) R^* , равна

$$R^* = s \cdot T^4,$$

где $s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Очевидно, энергия, излучаемая площадью поверхности S за время t , равна

$$W = R^* \cdot S \cdot t = S \cdot T^4 \cdot S \cdot t.$$

Разделив эту энергию на энергию одного фотона, находим интересующее нас число фотонов.

$$N = \frac{W}{E_\phi} = \frac{S T^4 S t}{2,75 k T} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (2400)^4 \cdot 10^{-4} \cdot 1}{2,75 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2400} = 2,1 \cdot 10^{21}.$$

Пример 2. Определите длину волны, массу и импульс фотона с энергией 1 МэВ. Сравните массу этого фотона с массой покоя электрона.

Решение.

Энергия фотона связана с его длиной волны соотношением

$$e_\phi = \frac{hc}{l}.$$

Откуда следует

$$l = \frac{hc}{e_\phi} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,24 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}.$$

Импульс фотона

$$p = \frac{h}{l} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{1,24 \cdot 10^{-12}} = 5,3 \cdot 10^{-22} \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right).$$

Масса фотона m_ϕ равна

$$m_\phi = \frac{e}{c^2} = \frac{h}{c \cdot l} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{3 \cdot 10^8 \cdot 1,24 \cdot 10^{-12}} = 18 \cdot 10^{-31} \text{ (кг)}.$$

Масса покоя электрона равна $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Следовательно, масса фотона с энергией 1 МэВ близка к удвоенной массе покоя электрона.

Пример 3. На платиновую пластинку падают ультрафиолетовые лучи. Для прекращения фототока нужно приложить задерживающую разность потенциалов $U_1 = 3,7$ В. Если платиновую пластинку заменить пластинкой из другого металла, то задерживающую разность потенциалов следует увеличить до $U_2 = 6$ В. Определите работу выхода электронов с поверхности этого металла, если работа выхода электрона с поверхности платины равна 6,3 эВ.

Решение.

Энергию фотонов, вызывающих фотоэффект, легко найти, применив формулу Эйнштейна в случае фотоэффекта с платиновой поверхности

$$e_{\text{ф}} = A_{\text{пл}} + T_{\text{max}},$$

где T_{max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Фототок прекращается, когда работа сил электрического поля, препятствующих движению электрона, сравняется с T_{max} . Таким образом,

$$e_{\text{ф}} = A_{\text{пл}} + eU_1,$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряда электрона.

При фотоэффекте из металла с работой выхода, равной A , будем иметь

$$e_{\text{ф}} = A_{\text{пл}} + eU_1 = A + eU_2,$$

откуда легко находим

$$\begin{aligned} A &= A_{\text{пл}} + e(U_1 - U_2) = \\ &= 6,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} + 1,6 \cdot 10^{-19}(3,7 - 6) = 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)} = 4 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

Пример 4. Какая доля энергии фотона при эффекте Комптона приходится на электрон отдачи, если рассеяние фотона происходит на угол 180° ? Энергия фотона до рассеяния равна $0,255$ МэВ.

Решение.

Длина волны рассеянного фотона λ равна

$$l = l_0 + \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos Q) = l_0 + 2 \frac{h}{m_0 c},$$

где $l_0 = \frac{hc}{e_0}$ – длина волны падающего фотона, e_0 – его энергия.

Следовательно,

$$l = \frac{hc}{e_0} + 2 \frac{h}{m_0 c} = hc \left(\frac{1}{e_0} + \frac{2}{m_0 c^2} \right);$$

Энергия рассеянного фотона

$$e = \frac{hc}{l} = \frac{1}{\left(\frac{1}{e_0} + \frac{2}{m_0 c^2} \right)} = \frac{e_0 \cdot m_0 c^2}{m_0 c^2 + 2e_0}.$$

Из закона сохранения энергии следует, что

$$e_0 = e + T,$$

где T – кинетическая энергия электрона отдачи.

Отсюда находим

$$T = e_0 - e = e_0 - \frac{e_0 \cdot m_0 c^2}{m_0 c^2 + 2e_0} = \frac{2e_0^2}{m_0 c^2 + 2e_0}.$$

Доля h энергии падающего фотона, которая приходится на электрон отдачи, равна

$$h = \frac{T}{e_0} = \frac{2e_0}{m_0 c^2 + 2e_0} = \frac{1}{\frac{m_0 c^2}{2e_0} + 1} = \frac{1}{\frac{0,51}{0,51} + 1} = 0,5,$$

поскольку энергия покоя электрона $m_0 c^2 = 0,51$ МэВ.

Пример 5. На поверхность площадью 10 см^2 падает по нормали пучок фотонов интенсивностью $10^{18} \text{ фотон} \cdot \text{с}^{-1}$. Длина волны падающего света равна 400 нм . Определите величину светового давления на поверхность, если коэффициент отражения равен $0,75$.

Решение.

Величина светового давления равна

$$p = \frac{F}{c}(1 + R),$$

где Φ – энергетическая освещенность поверхности (количество энергии, падающей на единицу площади за единицу времени). Очевидно,

$$F = e_F \cdot \frac{\tilde{F}}{S},$$

где e_f – энергия одного фотона, \tilde{F} – интенсивность пучка фотонов, S – площадь поверхности.

Следовательно

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{hc}{l} \cdot \frac{\tilde{\Phi}}{S}, & p &= \frac{hc}{cl} \cdot \frac{\tilde{\Phi}}{S}(1 + R) = \frac{h\tilde{\Phi}}{lS}(1 + R) = \\ & & &= \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{18}}{400 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^{-4}}(1 + 0,75) = 0,03 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Па}). \end{aligned}$$

Пример 6. Докажите, что в атоме водорода на боровских стационарных орбитах укладывается целое число длин волн де Бройля.

Решение. Радиусы стационарных орбит электрона в атоме водорода по теории Бора равны

$$r_n = a_0 \cdot n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

где a_0 – первый боровский радиус.

Из условия квантования Бора

$$m v_n r_n = h n = \frac{h}{2p} n$$

следует, что импульс электрона на n -й боровской орбите

$$p_n = m v_n = \frac{h n}{2p r_n},$$

а соответствующая длина волны де Бройля равна

$$l_n = \frac{h}{p_n} = \frac{2p r_n}{n} = 2p a_0 n.$$

Очевидно, что число длин волн де Бройля, укладывающихся на стационарной орбите, равно

$$N = \frac{2p r_n}{l_n} = \frac{2p a_0 n^2}{2p a_0 n} = n.$$

Пример 7. Вычислите по теории Бора период вращения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом 3.

Решение.

Период вращения электрона равен

$$T_n = \frac{2p r_n}{v_n}.$$

где r_n – радиус орбиты, v_n – скорость движения.

Из условия квантования Бора

$$m v_n r_n = n h \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

находим

$$v_n = \frac{n h}{m r_n},$$

поэтому

$$T_n = \frac{2p r_n \cdot m r_n}{n h} = \frac{4p^2 m r_n^2}{n h}.$$

Учитывая, что $r_n = a_0 n^2$ ($a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м – радиус первой боровской орбиты), окончательно находим

$$T_3 = \frac{4p^2 m a_0 n^2}{nh} = \frac{4p^2 m a_0 n}{h} = \frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5,3 \cdot 10^{-11} \cdot 3}{6,6 \cdot 10^{-34}} = 8,65 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Пример 8. Волновая функция частицы имеет вид

$$Y = A \frac{\exp\left(-\frac{r}{a}\right)}{r},$$

где r – расстояние от силового центра, a – постоянная. Найдите: а) значение коэффициента A , б) среднее расстояние $\langle r \rangle$ частицы от центра.

Решение.

Значение коэффициента A найдем из условия нормировки для волновой функции

$$\int Y^* Y dv = 1.$$

Учитывая, что плотность вероятности $Y^* Y$ сферически симметрична, в качестве элемента объема возьмем объем шарового слоя радиуса r и толщиной dr : $dv = 4\pi r^2 dr$. Тогда

$$\int Y^* Y dv = 4\pi A^2 \int_0^\infty \frac{e^{-2r/a}}{r^2} \cdot r^2 dr = 4\pi A^2 \int_0^\infty e^{-2r/a} dr = 4\pi A^2 \cdot \frac{a}{2}.$$

Следовательно

$$2\pi a A^2 = 1, \quad A = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}}.$$

Среднее расстояние частицы от центра равно

$$\begin{aligned} \langle r \rangle &= \int \Psi^* r \Psi dv = 4\pi A^2 \int_0^\infty \frac{e^{-r/a}}{r} \cdot r \cdot \frac{e^{-r/a}}{r} \cdot r^2 dr = \\ &= \frac{2}{\pi a} \int_0^\infty r e^{-2r/a} dr = \int_0^\infty r d(e^{-2r/a}) = \\ &= - \left[r e^{-2r/a} \Big|_0^\infty - \int_0^\infty e^{-2r/a} dr \right] = - \frac{a}{2} e^{-2r/a} \Big|_0^\infty = \frac{a}{2}. \end{aligned}$$

2.3. Задачи к контрольной работе № 6

600. Определите поглощательную способность серого тела, если оно при температуре 727°C с поверхности 10 см^2 испускает поток энергии, равный 25 Вт .

601. Пластика с зачерненной поверхностью помещена перпендикулярно падающим лучам в вакууме. Определите энергию, поглощенную 1 см^2 поверхности в минуту, если установившаяся температура пластинки равна 327°C .

602. Поток энергии, излучаемый смотровым окошком печи, равен 10 кДж/мин . Определите температуру печи, если площадь окошка равна 5 см^2 ?

603. Температура вольфрамовой спирали в 25-ваттной лампочке равна 2450 К . Спираль излучает как серое тело с поглощательной способностью $0,3$. Найдите величину излучающей поверхности спирали.

604. Мощность излучения абсолютно черного тела равна 34 Вт . Найдите температуру тела, если площадь его поверхности равна $0,8\text{ м}^2$.

605. Определите, какое количество энергии с 10 см^2 поверхности за 5 с излучает абсолютно черное тело, если максимум его испускательной способности приходится на длину волны в 4500 \AA .

606. Найдите величину излучающей поверхности абсолютно черного тела, если длина волны, при которой максимальна испускательная способность, равна 750 нм , а мощность излучения равна 15 кВт .

607. Длина волны, на которой максимальна испускательная способность абсолютно черного тела, изменилась при его нагревании от $0,72$ до $0,48\text{ мкм}$. Во сколько раз изменилась при этом мощность излучения?

608. При остывании абсолютно черного тела, имевшего температуру 2820 К , длина волны, на которой максимальна его испускательная способность, изменилась на 15 мкм . Определите конечную температуру тела.

609. Найдите, какую мощность надо подводить к зачерненному шару диаметром 3 см , чтобы поддерживать его температуру на 30 К выше температуры окружающей среды, равной 20°C . Подводимая мощность теряется только вследствие лучеиспускания.

610. Кинетическая энергия электрона равна энергии фотона с длиной волны 5600 \AA . Найдите скорость движения электрона.

611. Какую энергию должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя протона?

612. С какой скоростью должен двигаться протон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны 4600 \AA ?

613. Определите энергию, массу и импульс фотона с длиной волны $0,02 \text{ \AA}$.

614. При какой температуре средняя кинетическая энергия атомов гелия равна энергии фотона с длиной волны 1 мкм ?

615. Энергия фотона равна средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа, имеющего температуру 27° C . Определите длину волны фотона.

616. При какой температуре среднее значение импульса молекулы водорода равно импульсу фотона с длиной волны 1 \AA ?

617. Атом водорода летит со скоростью 4 км/с . Вычислите, на сколько процентов изменится скорость атома вследствие отдачи при излучении в направлении движения фотона с длиной волны, равной $0,1 \text{ мкм}$.

618. Скорость электрона составляет $0,9$ скорости света в вакууме. Найдите частоту фотона, энергия которого равна кинетической энергии электрона.

619. Определите скорость электрона, импульс которого равен импульсу фотона с длиной волны, равной $0,1 \text{ \AA}$.

620. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 2800 \AA . Найдите работу выхода электрона из этого металла и максимальную скорость электронов, вырываемых из этого металла светом с длиной волны 1600 \AA .

621. Определите максимальную кинетическую энергию электронов, вырываемых из металла светом с длиной волны 2000 \AA , если красная граница фотоэффекта для этого металла равна 2800 \AA .

622. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 2850 \AA . Чему равно минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект?

623. Найдите частоту света, вырывающего с поверхности металла электроны, которые полностью задерживаются обратным потенциалом в 3 В . Красная граница фотоэффекта для этого металла равна $6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. Найдите также работу выхода электрона из этого металла.

624. Найдите величину задерживающего потенциала для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом, длина волны которого равна 2400 \AA .

625. Кванты света с энергией $5,3 \text{ эВ}$ вырывают электроны из металла с работой выхода $4,6 \text{ эВ}$. Найдите максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете одного электрона.

626. Красная граница фотоэффекта для цинка равна 2900 \AA . Какая часть энергии фотона, вызывающего фотоэффект, расходуется на работу выхода, если максимальная скорость фотоэлектронов равна 10^8 см/с ?

627. Определите максимальную скорость электронов, вырываемых из металла γ -излучателем с длиной волны $0,01 \text{ \AA}$.

628. Максимальная скорость фотоэлектронов, вылетающих из металла при его облучении γ -квантами, равно $2,8 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Вычислите энергию γ -квантов.

629. Найдите максимальную скорость электронов, вылетающих из металла при облучении его γ -квантами с энергией $1,53 \text{ МэВ}$.

630. В эффекте Комптона энергия рассеяния фотона равна половине энергии падающего фотона. Угол рассеяния равен $\pi/2$. Определите энергию и импульс рассеяния фотона.

631. Найдите угол, на который был рассеян фотон с энергией $1,53 \text{ МэВ}$, если кинетическая энергия электрона отдачи равна $0,51 \text{ МэВ}$.

632. Фотон с энергией $1,53 \text{ МэВ}$ при рассеянии на свободном электроне потерял $1/3$ своей энергии. Определите импульс электрона отдачи.

633. Энергия падающего фотона при комптоновском рассеянии равна $0,8 \text{ МэВ}$. Найдите энергию электрона отдачи, если длина волны фотона изменилась на 20% .

634. При эффекте Комптона фотон рассеян на угол 60° . Определите импульс электрона отдачи, если энергия фотона до рассеяния равна $1,02 \text{ МэВ}$.

635. Фотон с энергией $0,51 \text{ МэВ}$ при эффекте Комптона был рассеян на угол 60° . Определите кинетическую энергию электрона отдачи.

636. При рассеянии на свободном электроне фотон с энергией $0,51 \text{ МэВ}$ потерял треть этой энергии. Вычислите угол рассеяния Θ .

637. Найдите максимальное изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии на свободном протоне.

638. Фотон, с энергией в 2 раза превышающей энергию покоя электрона, испытал лобовое столкновение с покоившимся свободным электроном. Найдите радиус кривизны траектории электрона отдачи в магнитном поле с

индукцией 0,12 Тл. Электрон отдачи движется перпендикулярно к направлению поля.

639. Рентгеновские лучи с длиной волны $0,2 \text{ \AA}$ испытывают комптоновское рассеяние под углом 60° . Найдите изменение длины волны рентгеновских лучей при рассеянии, а также энергию и импульс электрона отдачи.

640. Пучок параллельных лучей падает нормально на зеркальную поверхность. Поток излучения равен 0,9 Вт. Определите силу давления, испытываемую этой поверхностью.

641. На поверхность площадью 300 см^2 падает 60 Дж световой энергии за 2 минуты. Найдите величину светового давления в случае зеркальной и в случае зачерненной поверхности.

642. Пучок лучей с длиной волны 600 нм падает нормально на зеркальную поверхность, производя давление 200 мкН/м^2 . Определите число фотонов, падающих в единицу времени на единицу площади поверхности.

643. Пучок параллельных лучей с длиной волны 400 нм падает нормально на зачерненную поверхность, оказывая на нее давление 100 мкН/м^2 . Найдите концентрацию фотонов в потоке (т.е. число фотонов в единице объема излучения).

644. Определите плотность потока световой энергии, падающей на зеркальную поверхность, если световое давление при нормальном падении лучей равно $19,62 \text{ мкН/м}^2$.

645. На зеркало с площадью поверхности $4,5 \text{ см}^2$ падает по нормали пучок света. Найдите импульс, полученный зеркалом, если плотность потока падающей на него энергии равна 20 Вт/см^2 , а продолжительность освещения равна 5 с.

646. На расстоянии 3 с от точечного изотропного монохроматического ($\lambda = 300 \text{ нм}$) источника расположена площадка площадью 15 мм^2 перпендикулярно падающим лучам. Определите число фотонов, падающих на площадку за 3 с. Мощность излучения равна 50 Вт.

647. В центре сферической зеркальной колбы радиусом 15 см находится точечный источник монохроматического излучения ($\lambda = 100 \text{ нм}$) мощностью 2 кВт. Определите световое давление на внутреннюю поверхность колбы.

648. Световые лучи падают по нормали на зеркальную поверхность, находящуюся на расстоянии $r = 20 \text{ см}$ от точечного изотропного источника, производя давление 1,5 мПа. Найдите мощность излучения источника.

649. Колба электрической лампы представляет собой сферу радиусом 5 см. Часть стенки колбы изнутри посеребрена. Лампа потребляет мощность 40 Вт, из которых 90% тратится на излучении. Определите, на сколько световое

давление на посеребренную часть стенки колбы отличается от давления газа в колбе, равного 10^{-7} мм.рт.ст.

650. Параллельный пучок электронов падает нормально на узкую щель шириной $b = 40$ мм. На экране, находящемся на расстоянии $l = 40$ мм от щели, ширина центрального дифракционного максимума равна 10 мкм. Определите скорость электронов.

651. Электрон обладает кинетической энергией $T = 1,02$ МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля для этого электрона, если его кинетическая энергия уменьшится в два раза?

652. Кинетическая энергия электрона равна утроенному значению его энергии покоя ($3m_0c$). Определите длину волны де Бройля для такого электрона.

653. Определите длину волны де Бройля для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $U = 1,02 \cdot 10^6$ В.

654. Протон движется со скоростью $v = 0,9c$ ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Чему равна его длина волны де Бройля.

655. Вычислите длину волны де Бройля для нейтрона, который движется с тепловой скоростью при температуре 25^0 С.

656. Оцените с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию электрона, движущегося в области размером $\sim 0,2$ нм.

657. Используя соотношения неопределенностей оцените ширину потенциальной ямы, в которой минимальная энергия электрона $E_{\min} = 20$ эВ.

658. Электрон находится в бесконечно глубокой потенциальной яме. С помощью соотношения неопределенностей оцените ширину ямы, если минимальная энергия электрона равна 10 кэВ.

659. С помощью соотношения неопределенностей оцените минимально возможную энергию электрона в атоме водорода.

660. Вычислите для электрона в атоме водорода радиус r_2 второй стационарной орбиты и его скорость v_2 в рамках теории Бора.

661. Определите по теории Бора изменение потенциальной и кинетической энергии электрона при излучении атомом водорода фотона с частотой $6,28 \cdot 10^{14}$ Гц.

662. В рамках теории бора вычислите период T_2 вращения электрона и его угловую скорость w_2 , если электрон находится в атоме водорода в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом $n = 2$.

663. На сколько изменится период вращения электрона в атоме водорода, если при переходе в невозбужденное состояние атом излучил фотон с длиной волны $l = 97,5$ нм?

664. Определите, на сколько изменилась потенциальная энергия электрона в атоме водорода при излучении фотона с длиной волны $\lambda = 435$ нм.

665. В каких пределах Δl должны лежать длины световых волн, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого света радиус электронной орбиты увеличился в 9 раз?

666. Фотон выбивает из атома водорода, находящегося в возбужденном состоянии с $n = 2$, электрон с кинетической энергией $T = 20$ эВ. Определите длину волны этого фотона.

667. Атом водорода, находящийся в основном состоянии, поглощает квант излучения с $\lambda = 102,6$ нм. Вычислите в рамках теории Бора радиус электронной орбиты возбужденного атома.

668. Атомарный водород освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 100 нм. Определите длины волн спектральных линий, которые появятся в спектре водорода.

669. Определите границы спектральной области, в которой лежат линии серии Бальмера.

670. Частица находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной $l = 1$ нм. Определите в электрон-вольтах наименьшую разность энергетических уровней частицы.

671. В одномерной потенциальной яме шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками находится частица в основном состоянии. Найдите вероятность пребывания частицы в области $l/3 \leq x \leq 2l/3$.

672. В бесконечно глубокой потенциальной яме шириной l находится частица в третьем возбужденном состоянии ($n = 3$). Определите, в каких точках интервала $0 < x < l$ плотность вероятности нахождения частицы имеет максимальное и минимальное значения.

673. Частица находится в основном состоянии в прямоугольной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной l . Во сколько раз отличаются вероятности нахождения частицы: w_1 – в крайней трети и w_2 – в крайней четверти ящика?

674. Частица находится в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной l . Определите, в каких точках интервала $0 < x < l$ плотности вероятности нахождения частицы на втором и третьем энергетических уровнях совпадают. Вычислите плотность вероятности для этих точек. Решение поясните графиком.

675. Найдите для основного состояния атома водорода наиболее вероятное расстояние электрона от ядра.

676. Вычислите для основного состояния атома водорода среднее значение $\langle F \rangle$ кулоновской силы, действующей на электрон.

677. Для основного состояния атома водорода найдите среднее значение $\langle U \rangle$ потенциальной энергии.

678. Волновая функция основного состояния гармонического осциллятора имеет вид

$$Y_0(x) = \sqrt{\frac{a}{\sqrt{p}}} \exp\left(-\frac{a^2 x^2}{2}\right),$$

где $a = \sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}}$ (m – масса, ω – собственная частота осциллятора). Определите среднее значение потенциальной энергии $\langle U \rangle$ осциллятора в этом состоянии.

679. Волновая функция некоторой частицы имеет вид

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{pa\sqrt{2p}}} \cdot \frac{\exp(-r^2/a^2)}{r},$$

где a – константа, r – расстояние частицы от силового центра. Найдите среднее расстояние $\langle r \rangle$ частицы от центра.

ПРИЛОЖЕНИЕ

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Элементарный электрический заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Стефана-Больцмана	S	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м ² К ⁴
Постоянная Вина	b	$2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Ридберга	R	$3,3 \cdot 10^{-15}$ Гц
Радиус первой боровской орбиты	a_0	$0,53 \cdot 10^{-10}$ м
Энергия ионизации атома водорода	E_i	13,6 эВ
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Масса покоя электрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	m_p	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	m_n	$1,68 \cdot 10^{-27}$ кг

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Программа раздела курса физики “Оптика и квантовая физика”	4
Рекомендуемая литература	6
Общие методические указания по выполнению контрольных работ.	7
Таблица вариантов	8
Учебные материалы	9
1. Волновая оптика	9
1.1. Основные формулы	9
1.2. Примеры решения задач	12
1.3. Задачи к контрольной работе № 5	18
2. Квантовая физика	27
2.1. Основные формулы	27
2.2. Примеры решения задач	30
2.3. Задачи к контрольной работе № 6	36
Приложение. Некоторые физические постоянные	43